

# ANSCHLUSSPROJEKTE

## Integrale Planung und Herstellung von ressourceneffizienten Betonbauteilen aus mineralischer Faserverbundbewehrung und gradiertem Beton | Design and production of resource-efficient concrete components made of mineral fibre composite reinforcement and graded concrete

- ▶ David Nigl<sup>1</sup>, Daniel Schmeer<sup>1</sup>, Walter Haase<sup>1</sup>, Benjamin Schönemann<sup>2</sup>, Katrin Lenz<sup>3</sup>, Steffen Steier<sup>3</sup>, Oliver Sawodny<sup>2</sup>, Philip Leistner<sup>3</sup>, Lucio Blandini<sup>1</sup>, Werner Sobek<sup>1</sup>
- ▶ <sup>1</sup> Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK), Universität Stuttgart
- ▶ <sup>2</sup> Institut für Systemdynamik (ISYS), Universität Stuttgart
- ▶ <sup>3</sup> Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, Stuttgart

Das Ziel des vorliegenden Projektes war es, eine sortenreine und gewichtsoptimierte Betonbauweise unter Einsatz mineralischer und lastpfadgerechter Faserverbundbewehrungen zur vorwettbewerblichen Anwendung weiterzuentwickeln, um damit neue Geschäftsfelder für KMU im Bereich des Bauwesens zu eröffnen sowie längerfristig den Technologiestandort Baden-Württemberg zu stärken. Dabei knüpft das Projekt nahtlos an die Arbeiten aus dem SPP 1542 – *Leicht bauen mit Beton* – an. Der vorliegende Kurzbericht fasst die Forschungsergebnisse zusammen. Für eine ausführlichere Beschreibung der Arbeiten sowie die Darstellung der Ausgangslage wird auf [1] sowie auf die Homepage [2] verwiesen.

Der Erreichung des Projektziels widmete sich ein interdisziplinäres Forschungskonsortium, bestehend aus dem Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK), dem Institut für Systemdynamik (ISYS), beide von der Universität Stuttgart, sowie dem Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP). In diesem Rahmen befasste sich das ILEK mit der Weiterentwicklung bestehender Entwurfs- und Berechnungsmethoden von Bauteilen aus Gradientenbeton. In enger Zusammenarbeit von ISYS und ILEK wur-

The objective of the current project is to further develop a weight-optimised concrete construction method using mineral and load-path compatible fibre-composite reinforcements for pre-commercial applications. The outcome of the project could open new business opportunities for small- and mid-size enterprises in the construction sector and, in the longer term, strengthen Baden-Württemberg as a technology hub. The project seamlessly ties in with the previous work from SPP 1542, the results of which are summarised in this short report. For a more detailed description of the work readers are referred to [1] as well as to the homepage [2].

The project involves an interdisciplinary research consortium consisting of the Institute for Lightweight Structures and Conceptual Design (ILEK) and the Institute for System Dynamics (ISYS), both at the University of Stuttgart, as well as the Fraunhofer Institute for Building Physics (IBP). Within this framework, ILEK dealt with the further development of existing design and calculation methods of graded concrete components. Through close cooperation between ISYS and ILEK, an automated production method of mesograded components was developed and implemented. IBP contributed to the ecological

de ein Konzept für die automatisierte Herstellung von mesogradierten Bauteilen entwickelt und umgesetzt. Das IBP übernahm die Aufgabe der prozessbegleitenden Kosten- sowie ökologischen Nachhaltigkeitsbewertung der im Projekt entwickelten Prozesse und Materialien.

Bei der Herstellung von mesogradierten Betonbauteilen erfolgt zunächst das Verlegen der unteren Bewehrungslage in die Schalung. Anschließend werden Hohlkugeln aus Beton nach dem Vorbild einer kubisch primitiven Packung in der Schalung platziert und die obere Bewehrungslage eingebracht. Nach dem Einbau von Bewehrung und Hohlkörpern beginnt ein am ILEK entwickelter, schichtweiser Gießprozess. Für den schichtweisen Gießprozess wird ein sehr fließfähiger und selbstverdichtender Beton mit einem geringen Größtkorn erforderlich, um die Zwischenräume der Hohlkugeln vollständig auszufüllen. Das Einbringen des Betons setzt einen zeitlich geregelten Prozess voraus, damit die Lage- und Auftriebssicherheit der Hohlkörper gewährleistet sind und ein vollständiger Schichtverbund sichergestellt wird. Von entscheidender Bedeutung ist der Haftverbund zwischen Hohlkugel und Betonschicht, wobei die Haftkraft größer sein muss als die Auftriebskraft der Kugel [3].

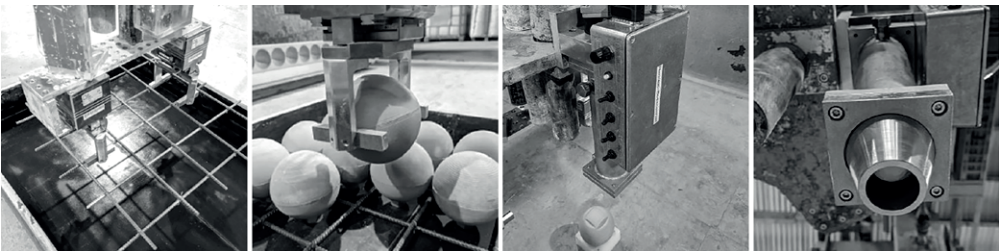
Die Bewehrung wird, mit wenigen Ausnahmen bei der Herstellung von Betonfertigteilen, sowohl in der Baupraxis als auch beim Herstellungsverfahren gradierteter Betonbauteile immer noch händisch im Bauteil verlegt. Um diesen Prozess weitestgehend zu automatisieren, wur-

and economic assessments of the processes and materials developed in the project.

During the production of mesograded concrete components, the process starts with the placement of the lower reinforcement layer in the formwork. Then, hollow concrete spheres are placed in the formwork based on a cubic packing, followed by the placement of the upper reinforcement layer. Afterwards, a layer-by-layer casting process starts, which was developed at ILEK. For the layered casting process, a highly-flowable and self-compacting concrete (SCC) with a small grain size is required to fill the spaces between the hollow spheres. The pouring of the concrete is time-controlled to prevent the buoyancy of the hollow spheres from changing their positions, as well as to ensure sufficient layer bonding. The bond between the hollow sphere and the concrete layer is of high importance, whereby the adhesive force must be greater than the buoyancy force of the sphere [3].

With few exceptions, the reinforcement is typically laid manually both in conventional construction and in the production process of graded concrete components. In order to automate this process as far as possible, an experimental gripping system was designed and implemented by ISYS. Employing this system, tasks such as gripping and placing of hollow spheres and reinforcement bars were successfully performed (Fig. 1).

The automation of the layered casting process in the production of mesograded components



**Bild 1:** Validierung der Handhabungsaufgaben; von links nach rechts: Greifen eines Bewehrungssystems aus Stahlstäben, Ablage eines Hohlkörpers, Prototyp der Extrusionseinheit in zwei Ansichten | **Fig. 1:** Validation of the handling tasks; from left to right: gripping of steel reinforcement bars, placing of a hollow body, prototype of the extrusion unit shown in two views | Source: ISYS

de vom ISYS ein prototypisches Greifersystem konzipiert und am Versuchsstand integriert. Die Handhabungsaufgaben wie das Greifen und Platzieren von Hohlkörpern oder von Bewehrungskomponenten wurden erfolgreich im Betrieb validiert (Bild 1).

Die Umsetzung des schichtweisen Gießverfahrens in der Fertigung von mesogradierten Bauteilen sollte ebenfalls weitestgehend automatisiert erfolgen. Dies bedurfte einer Weiterentwicklung der vorhandenen Anlagentechnik. Ein wichtiger Aspekt ist dabei die positionsgenaue Materialdosierung. Zu diesem Zweck wurde gemeinsam von ILEK und ISYS eine Extrusionseinheit für den zielgerichteten Materialaustrag in die Zwischenräume der Hohlkörper konzipiert und als Prototyp umgesetzt (Bild 1).

Im Rahmen des Projektes wurden am ILEK skalierte Musterbauteile entworfen, hergestellt und geprüft. Die Bewehrung wurde dabei auf der Materialebene und auf der Ebene des Entwurfs der Bewehrungsführung optimiert. Hinsichtlich der Materialität fokussierten sich die Untersuchungen auf den Einsatz einer Stahl- als auch Basaltfaserverbundbewehrung. Zum jetzigen Stand der Forschung kann festgehalten werden, dass die gleiche Basaltmasse wie Stahlmasse zur Bewehrung des Bauteils erforderlich wird.

Seitens des ILEK erfolgte eine weitere Studie zur Reduktion der Bewehrungsmenge, durch eine beanspruchungsgerechte Bewehrungsverteilung im Bauteil. Abweichend von der konventionellen Bewehrungsführung nach Fachwerka-

is also being pursued, which requires further development of the existing technology to allow accurate dosing of the concrete. For this purpose, ILEK and ISYS jointly designed an extrusion unit to discharge material into the spaces between the hollow spheres. The prototype of the extrusion unit is shown in Fig. 1.

Small-scale concrete components were designed, fabricated and tested at ILEK to validate design and calculation methods. The reinforcement material and layout have been optimised for these components. In terms of materiality, investigations were focused on the use of steel and basalt-mineral fibre composite reinforcements. Results so far have shown that a 1 : 1 ratio of basalt and steel mass is required for the reinforcement of the components.

ILEK developed new reinforcement designs which are not based on conventional truss analogy. One design method is based on topology-optimisation (Fig. 2) and allows up to 10% mass savings with respect to conventional methods.

In order to quantify the material savings, full-scale concrete components were designed. A single-span floor slab with a length of 7.20 m and a width of 2.40 m served as an example. The reference flat slab (M) has a thickness of 28 cm and thus a concrete volume of 4.84 m<sup>3</sup>, with reinforcement steel requirements of 22 kg/m<sup>2</sup>. On the other hand, a mesograded slab (G) with equivalent performance has a thickness of 26 cm, a concrete volume of 2.88 m<sup>3</sup> and steel require-

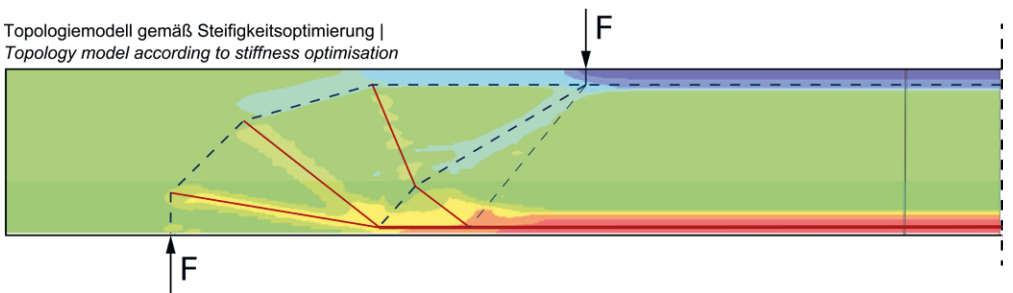


Bild 2: Bewehrungsführung in Analogie zu einem Topologiemodell | Fig. 2: Reinforcement layout in analogy to a topology model | Source: ILEK

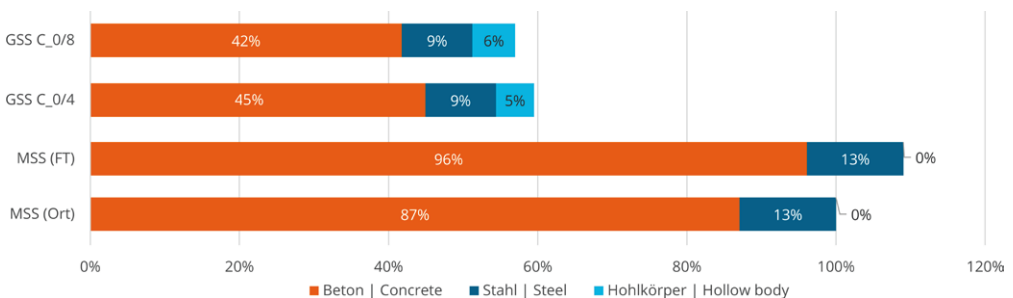
analogie können durch die Berücksichtigung von z. B. Topolgiemodellen (Bild 2) bis zu 10 % Masse eingespart werden.

Nach der experimentellen Bestätigung der Berechnungsmethoden erfolgte die Auslegung von Bauteilen im Realmaßstab, um deren Einsparpotentiale zu beziffern. Als Beispiel diene eine einachsig spannende Geschossdecke von 7,20 m Länge und 2,40 m Breite. Das massive Referenzbauteil (M) hat eine Höhe von 28 cm und folglich ein Betonvolumen von 4,84 m<sup>3</sup>, bei einer erforderlichen Bewehrungsmenge von 22 kg/m<sup>2</sup>. Die gradierte Variante (G) weist bei gleicher Leistungsfähigkeit dagegen eine Deckenhöhe von 26 cm, bei einem Betonverbrauch von 2,88 m<sup>3</sup> und einen Stahlverbrauch von 15,5 kg/m<sup>2</sup> auf. Die Einsparung an Bewehrungsstahl beträgt damit 30 % und der Betonverbrauch kann um 40 % reduziert werden.

Seitens des IBP erfolgte eine ökologische und ökonomische Analyse der o. g. Bauteile. Die ökologische Bewertung der Materialinputs ist in Bild 3 veranschaulicht und verdeutlicht das ökologische Potential der Masseneinsparung durch die Mesogradierung. Zum finalen Projektstand können bei der materiellen Zusammensetzung der Bauteile bis zu 43 % der Treibhausgase durch den Einsatz mineralischer Hohlkugeln vermieden werden. Die ökonomische Bewertung zeigt, dass durch die Massenreduktion ebenfalls eine Reduktion der Material- und Energiekosten von über 25 % zu erreichen ist.

ments of 15.5 kg/m<sup>2</sup>. Thus, up to 30% and 40% savings of reinforcement and concrete are achieved, respectively.

IBP conducted an ecological and economic analysis of the aforementioned concrete components. The ecological evaluation of the material requirements is illustrated in Fig. 3. Up to 43% of the greenhouse gases reductions can be achieved by embedding concrete hollow spheres in the components. Furthermore, the economic evaluation indicates that more than 25% of material and energy cost reductions can be achieved from mass savings.



**Bild 3:** Treibhauspotential der Materialinputs für die mesogradierten Musterbauteile in Abhängigkeit der Betonrezeptur (GSS C\_0/8 und GSS C\_0/4) gegenüber dem Referenzbauteil aus Ort- bzw. Fertigteilbeton (MSS (Ort) und MSS (FT)) | **Fig. 3:** Global warming potential of the material inputs for the mesograded components depending on the concrete mixture (GSS C\_0/8 and GSS C\_0/4) compared to the reference components made of in-situ or precast concrete (MSS (Ort) and MSS (FT)) | Source: IBP

## Literatur | References

- [1] Schmeer, D.; Schönemann, B.; Lenz, K.; Steier, S.; Haase, W.; Blandini, L.; Sobek, W.; Sawodny, O.; Leistner, P.: *Integrale Planung und Herstellung von ressourceneffizienten Betonbauteilen aus mineralischer Faserverbundbewehrung und gradiertem Beton. Kurzbericht zum Abschlussbericht, Stuttgart, 2021*
- [2] Homepage des Projekts: <https://ressourceneffizienz-und-klimaneutralitaet.de/wissenspool/ressourceneffizienz-durch-funktionale-gradierung-von-betonbauteilen/> (geprüft am | accessed on 10.01.2022)
- [3] Schmeer, D.: *Mesogradierung von Betonbauteilen – Herstellung und Tragverhalten von Betonbauteilen mit integrierten mineralischen Hohlkugeln. Diss., Universität Stuttgart, 2021*

## Projektdaten | Project data

### Allgemeine Angaben | General information

Integrale Planung und Herstellung von ressourceneffizienten Betonbauteilen aus mineralischer Faserverbundbewehrung und gradiertem Beton | Design and production of resource-efficient concrete components made of mineral fibre composite reinforcement and graded concrete

<b>Antragsteller 1   Applicant 1:</b>	Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Werner Sobek
Adresse   Address:	Universität Stuttgart, Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren, Pfaffenwaldring 7+14, 70569 Stuttgart
Kontakt   Contact:	+49 711 685 61760   <a href="mailto:werner.sobek@ilek.uni-stuttgart.de">werner.sobek@ilek.uni-stuttgart.de</a>   <a href="http://www.uni-stuttgart.de/ilek/">http://www.uni-stuttgart.de/ilek/</a>
<b>Antragsteller 2   Applicant 2:</b>	Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Oliver Sawodny
Adresse   Address:	Universität Stuttgart, Institut für Systemdynamik, Waldburgstraße 17+19, 70563 Stuttgart
Kontakt   Contact:	+49 711 685 66302   <a href="mailto:oliver.sawodny@isys.uni-stuttgart.de">oliver.sawodny@isys.uni-stuttgart.de</a>   <a href="https://www.isys.uni-stuttgart.de/">https://www.isys.uni-stuttgart.de/</a>
<b>Antragsteller 3   Applicant 3:</b>	Prof. Dr. Philip Leistner
Adresse   Address:	Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart
Kontakt   Contact:	+49 711 970 3346   <a href="mailto:philip.leistner@ibp.fraunhofer.de">philip.leistner@ibp.fraunhofer.de</a>   <a href="https://www.ibp.fraunhofer.de/">https://www.ibp.fraunhofer.de/</a>
Förderer   Funding:	Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau Baden-Württemberg (3-4332.62-ILEK/1)
Förderzeitraum   Period:	06.12.2018–31.03.2021
Team   Team:	Daniel Schmeer (ILEK) Benjamin Schönemann (ISYS) Katrin Lenz (IBP) Steffen Steier (IBP) Walter Haase (ILEK)
Partner   Partners:	HeidelbergCement AG, Leimen Liebherr Mischtechnik GmbH, Bad Schussenried C-Con GmbH, Sindelfingen Fachverband Beton- und Fertigteilwerke Baden-Württemberg e. V. , Ostfildern Werner Sobek AG, Stuttgart MEVA Schalungs-Systeme GmbH, Haiterbach Sika Deutschland GmbH, Leimen Peter Gross Bau Holding GmbH, St. Ingbert AFBW – Allianz Faserbasierter Werkstoffe Baden-Württemberg, Stuttgart
Homepage   Website:	<a href="https://ressourceneffizienz-und-klimaneutralitaet.de/">https://ressourceneffizienz-und-klimaneutralitaet.de/</a>

## Projektbezogene Publikationen | Project related publications

- Yabg, Y.; Belangé, L.; Gericke, O.; Schmeer, D.; Zhang, L.; Sobek, W. und Schwieger, V.: Monitoring of the production Process of Graded Concrete Component using Terrestrial Laser Scanning. Remote Sensing 13 (2021) 9, 1622 – <https://doi.org/10.3390/rs13091622>
- Schuler, B.; Sawodny, O.: Spray Pattern Analysis Using Wet-Mix Concrete for Model Based Process Control towards Automated Construction. In: Proc. of 2019 IEEE 15<sup>th</sup> Int. Conf. on Automation Science and Engineering (CASE), 22.–26.08.2019 in Vancouver (Kanada), IEEE, 2019, S. 661–666 – DOI: 10.1109/COASE.2019.8842853

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

### Dissertation | Dissertation

- Schmeer, D.: Mesogradierung von Betonbauteilen – Herstellung und Tragverhalten von Betonbauteilen mit integrierten mineralischen Hohlkugeln. Diss., Universität Stuttgart, 2021