

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/348135503>

# Lautern Barrier – Innovative Self-Closing Flood Protection System from UHPFRC Lautern Sperre – Innovatives, selbsttätiges Hochwasserschutzsystem aus UHPFRC

Article · December 2020

CITATIONS

0

READS

297

2 authors:



**Kasem Maryamh**

RPTU - Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern Landau

14 PUBLICATIONS 42 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



**Christian Glock**

RPTU - Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern Landau

84 PUBLICATIONS 113 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Selbstaufschwimmende Hochwassersperrern - self erecting flood barriers [View project](#)



Selbstaufschwimmende Hochwassersperrern - self closing flood barriers [View project](#)

The Department of Concrete Construction and Structural Design at TU Kaiserslautern developed an innovative flood barrier that is self-floating in water, wedges itself on its sides and thus automatically prevents flooding.

Das Fachgebiet Massivbau und Baukonstruktion der TU Kaiserslautern hat eine innovative Hochwassersperre entwickelt, die im Wasserbad selbstständig aufschwimmt, sich an den Seiten verkeilt und so automatisch Überschwemmungen verhindert.

# Lautern Barrier – Innovative Self-Closing Flood Protection System from UHPFRC

## Lautern Sperre – Innovatives, selbsttätiges Hochwasserschutzsystem aus UHPFRC

Kasem Maryamh M. Sc.; Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Glock

The relevance of flood protection is increasing significantly, not least owing to the effects of climate change. Flood and heavy rainfall events cause considerable damage to real estate and public infrastructure. This is why the European Flood Risk Management Directive provides a framework for mitigating the adverse effects of flood events on human health, economic activities, the environment and cultural heritage [1]. Its clear focus is on flood prevention, including the installation of appropriate protective structures. Flood protection measures are currently often based on mobile protective systems whose installation is relatively complex. In practice, such systems can generally not be provided to the required scope and at the necessary erection speed, particularly in the case of heavy rainfall events with short early warning times [2]. This is exactly where the newly developed, innovative, self-closing precast flood barrier consisting of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete (UHPFRC) comes into play. This system requires almost no maintenance while providing safe protection against flooding and a long service life. The new barrier system is primarily designed to protect buildings, for

Die Bedeutung des Hochwasserschutzes nimmt stetig zu, auch bedingt durch den Klimawandel. Dabei führen klassische Hochwasserereignisse ebenso wie das zunehmende Auftreten von Schlagregen zu erheblichen Schäden an Immobilien und öffentlicher Infrastruktur. Die Europäische Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie setzt daher einen Rahmen zur Reduzierung nachteiliger Auswirkungen von Hochwasser auf die menschliche Gesundheit, die wirtschaftlichen Tätigkeiten, die Umwelt und das Kulturerbe [1]. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf der Vorsorge insbesondere durch entsprechende bauliche Maßnahmen. Derzeit wird der Hochwasserschutz oftmals durch mobile Schutzeinrichtungen sichergestellt, die vergleichsweise aufwändig sind und in der Praxis meist nicht in entsprechendem Umfang und der erforderlichen Geschwindigkeit eingerichtet werden können, insbesondere bei Schlagregenereignissen mit geringer Vorwarnzeit [2]. Genau hier setzt die neu entwickelte, innovative selbsttätige Fertigteil-Hochwassersperre aus faserbewehrtem Ultrahochleistungsbeton (UHPFRC) an. Sie soll wartungsfrei einen selbsttätigen und sicheren Hochwasserschutz gewährleisten, verbunden mit einer hohen Lebenserwartung. Ziel ist insbesondere der Schutz von Gebäuden, z. B. an deren Eingängen, den Einfahrten von Tiefgaragen oder an Uferpromenaden, ebenso wie die Schaffung von innerstädtischem temporärem Stauraum auf Straßen und Plätzen.

Fig. 1 : Flood barrier demonstrator in the passive state pre-assembled at the laboratory

Abb. 1: Demonstrator der Hochwassersperre im Ruhezustand als Vormontage im Labor



Figure: Fachgebiet Massivbau, TU Kaiserslautern

### Konzeption der selbsttätigen Hochwassersperre aus UHPFRC

Die Umsetzung solcher Hochwasserschutzsysteme erfolgt heute im In- und Ausland meist mittels Konstruktionen aus metallischen oder textilen Elementen mit entsprechenden Nachteilen hinsichtlich Zuverlässigkeit, Kosten und Einsatzbereich. Zum Zweck einer Optimierung wurde an der TU Kaiserslautern im Rahmen eines BBR-Forschungsprojekts [3] ein neues innovatives Konstruktionsprinzip auf Grundlage von dichten filigranen Elementen aus

instance at their entrances, driveways into underground parking facilities, or embankment promenades, as well as to create temporary retention space on inner-city streets and squares.

### Design principle of the self-closing UHPFRC flood barrier

Both in Germany and in other countries, such flood protection systems are usually designed with metallic or textile elements associated with disadvantages in terms of their reliability, cost, and range of applications. At TU Kaiserslautern, a BBR research project [3] was launched to develop an optimized solution. An innovative design principle was developed that uses high-density, filigree elements consisting of ultra-high-performance concrete (UHPC) in a sandwich construction that is cost-effective, robust, reliable, and durable.

The protective elements should float automatically without requiring additional technical support, functioning independently of a potentially interrupted power supply or emergency services. The core of the protection system are the floating sandwich elements, each with a thin top layer of UHPC, a core of extruded polystyrene rigid foam, and a specially designed watertight concrete joint. These features were developed at TU Kaiserslautern and break new ground in the field of concrete construction. The particular benefit of this system lies in the fact that it can be precast as a single, coherent element, thus allowing for its production in large numbers.

The development process centered on the idea of capitalizing on the effective mechanical properties that sandwich elements provide at a low unit weight. The use of UHPC ensures a dense surface structure with an ideal formability of the surfaces and low friction loss. The latter factors were of particular importance for designing the watertight concrete joint that connects the rotatable, floating barrier with the stationary foundation.

Applying this design principle, development work was divided into two steps: Firstly, an innovative, self-closing system was to be developed featuring an optimized concrete joint zone creating the connection between the barrier and the foundation. Secondly, the structural capacity of this system had to be optimized in order to resist the potential loads both in the passive (traffic loads) and the active state (water pressure).

Initial system designs differed in the detailing of the joints connecting the barrier with the foundation in its passive and active state. In Variant V1 (Fig. 3), the connection was established through a metal axle in a “mortise-and-tenon” pattern as commonly used in timber structures, which provided the benefit of easy formwork placement and assembly. Yet there were also disadvantages, such as potential steel corrosion and the sealant to be applied in the joint area. Variant V2 (Fig. 3) was to overcome these shortfalls by designing the joint as two sliding surfaces in a swivel arrangement ensuring a tight fit. In this design, the barrier links to the foundation through a cylindrical surface that turns around a precisely fitting sleeve. However, the stability of the barrier in its active state continued to be problematic

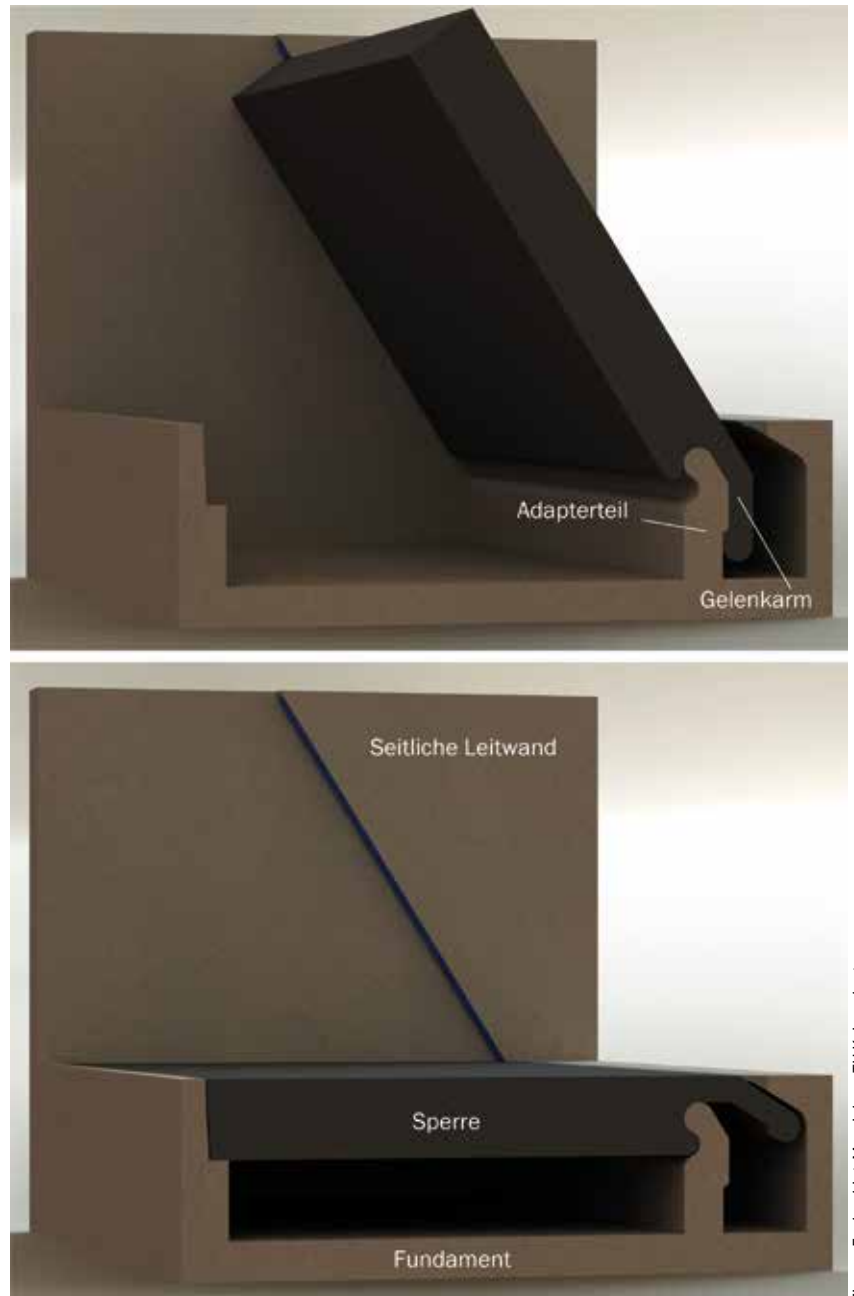


Figure: Fachgebiet Massivbau, TU Kaiserslautern

Ultrahochleistungsbeton (UHPC) in Sandwichbauweise entwickelt, das wirtschaftlich, robust, zuverlässig und dauerhaft ist.

Dabei sollen die Schutzelemente selbsttätig aufschwimmen, ohne jede weitere technische Unterstützung auskommen und daher unabhängig von einer möglicherweise unterbrochenen Stromversorgung und fehlenden Einsatzkräften sein. Kernelement des Schutzsystems bilden die aufschwimmenden Sandwichelemente mit je einer dünnen Deckschicht aus UHPC, einem Kern aus extrudiertem Polystyrol-Hartschaum und einem eigens entwickelten wasserdichten Betongelenk. Beides wurde an der TU Kaiserslautern entwickelt und ist für die Betonbauweise in hohem Maße richtungsweisend und innovativ. Das System ist insbesondere deshalb praxistauglich, da es insgesamt, d. h. als Fertigteil, in großen Stückzahlen hergestellt werden kann.

Zentrale Entwicklungsidee war die Nutzung der guten mechanischen Eigenschaften der Sandwichelemente bei

Fig. 2: Final flood barrier design in the active (top) and passive (bottom) state

Abb. 2: Finaler Hochwassersperrenentwurf im Einsatzzustand (oben) und im Ruhezustand (unten)

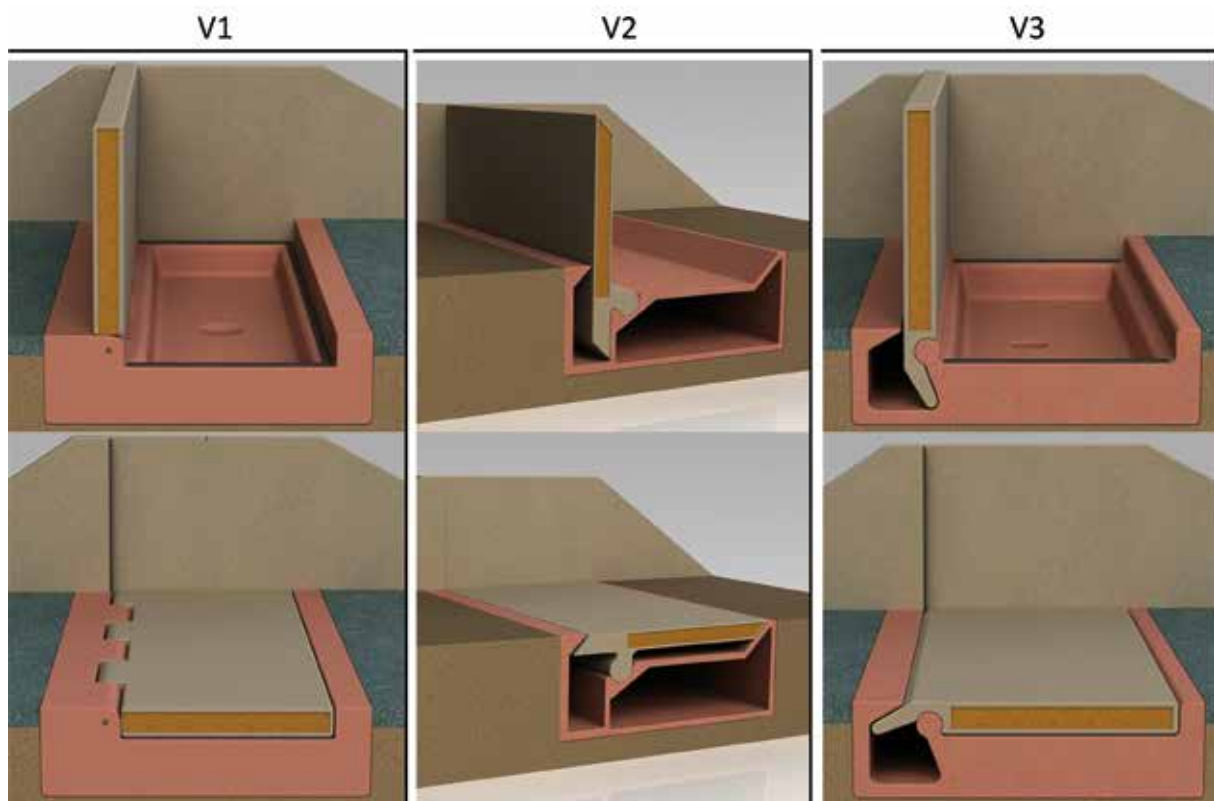


Fig. 3: Flood barrier design variants

Abb. 3: Entwurfsvarianten der Hochwassersperre

Figure: Fachgebiet Massivbau, TU Kaiserslautern

Fig. 4: Barrier formwork with insert and negative checker plate pattern mat

Abb. 4: Schalungsaufbau der Sperre mit Einsatzform und der negativer Riffelblech-Mustermatte

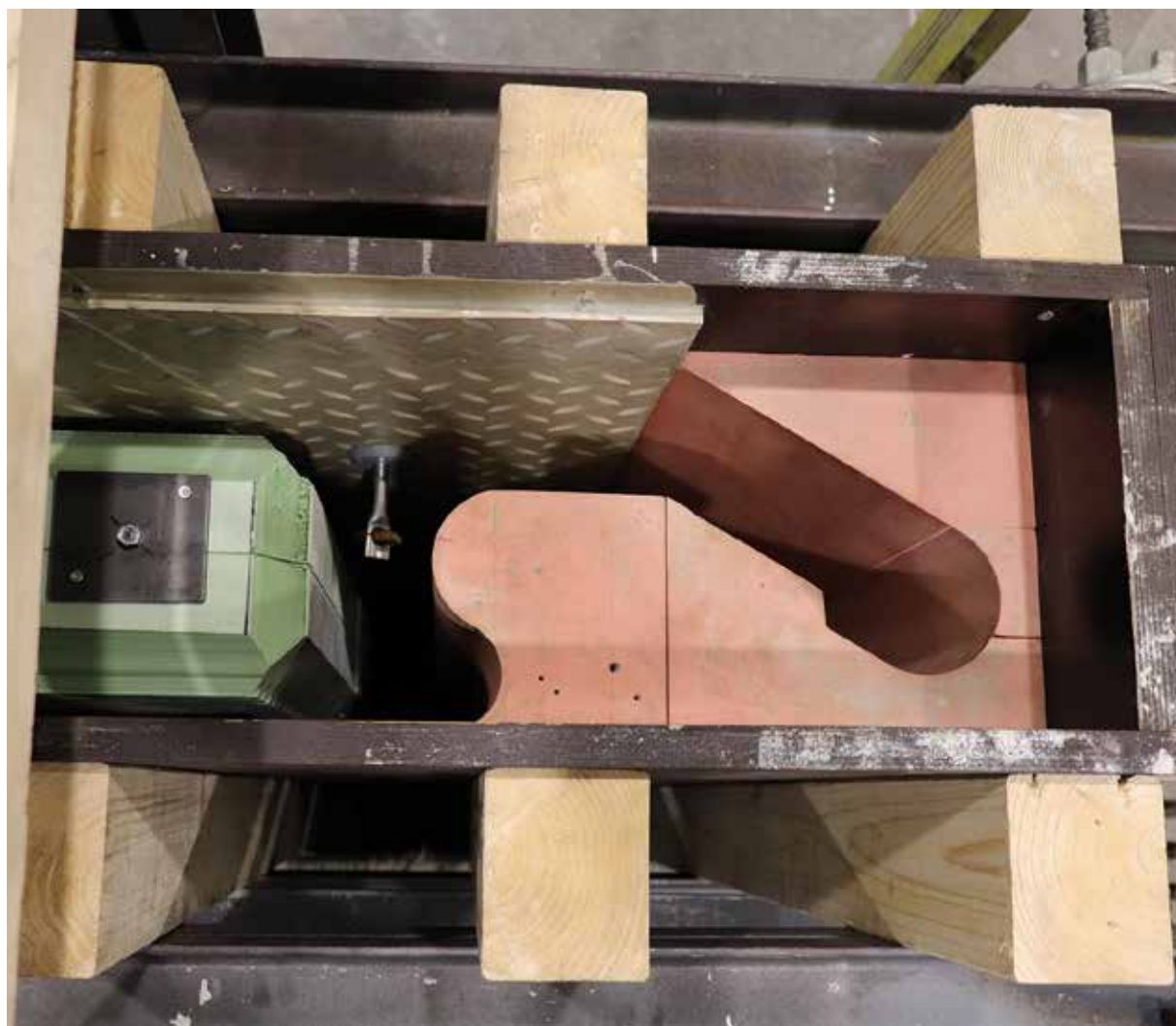


Figure: Fachgebiet Massivbau, TU Kaiserslautern



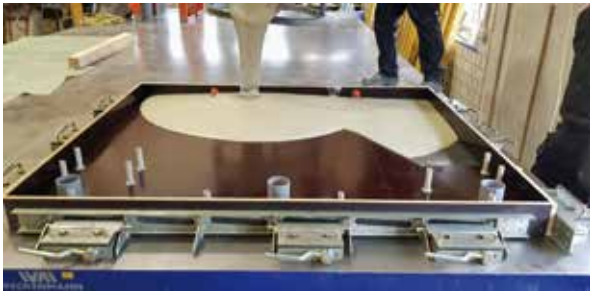


Figure: Fachgebiet Massivbau, TU Kaiserslautern

Fig. 5: Pouring of the lateral enclosing wall

Abb. 5: Betonage der seitlichen Leitwand



Figure: Fachgebiet Massivbau, TU Kaiserslautern

Fig. 6: Component test in the passive state under quasi-static loading

Abb. 6: Untersuchung der Bauteile im Ruhezustand unter quasi-statischer Belastung

because of the large critical forces acting on the joint area. The final design, Variant V3 (Fig. 3), resolved this issue by reducing the mass of the barrier and ensuring firm anchoring in its vertical position.

Variant V3 was identified as the most appropriate solution, and optimized further. The first optimization step involved a modification of the joint (i.e. the joint arm and adapter part) and a limitation of the barrier's rotation to an angle of 60° so as to ensure that it again lowers into its passive state as a result of its own weight when the flood recedes. Further steps included the addition of a lock securing the barrier against vertical forces acting in its active state (water pressure) and of a limit stop whilst also adjusting the dimensions of the entire system (Fig. 2).

#### Development and testing of small prototypes

After completion of the comprehensive theoretical studies on the optimization of the design principle, the barrier and the foundation were pre-dimensioned for the relevant load cases and material characteristics. In this process, the same micro-reinforcement as in the preliminary tests of the sandwich elements was used [4]. The foundation was reinforced with conventional steel rebar. The related calculations and analyses resulted in a total height of 21 cm for the sandwich element of the barrier, including a 2.5 cm UHPC cover on each side, and a 10 cm thick adapter part connecting the barrier with the foundation in order to resist the forces acting at a flood level of up to 100 cm, including traffic loads [5].

geringem Raumgewicht. Dabei gewährleistet die Verwendung von UHPC ein dichtes Oberflächengefüge verbunden mit einer idealen Gestaltbarkeit der Oberflächen und gleichzeitig geringem Reibungsverlust. Dies war insbesondere bei der Konzeption des wasserdichten Betongelenkes an der Verbindung zwischen beweglicher aufschwimmender Sperre und dem stationären Fundament entscheidend.

Diesem Entwurfsprinzip folgend gliederte sich die Entwicklungsarbeit in zwei Schritte: Zunächst war ein neues, innovatives selbsttätiges System mit optimiertem Betongelenkbereich als Bindeglied zwischen Sperre und Fundament zu entwickeln. Im folgenden Schritt galt es, die Tragfähigkeit dieses Systems zu optimieren, um die möglichen Einwirkungen im Ruhezustand (Verkehrslasten) und Einsatzzustand (Wasserdruck) aufnehmen zu können.

Bei den ersten Entwürfen des Systems variiert die Ausbildung des Gelenks zwischen Sperre und Fundament im Ruhe- und Einsatzzustand. In der Variante V1 (Abb. 3) erfolgt die Verbindung durch eine Metallachse in Form von Schlitz und Zapfen analog einer Holzverbindung mit dem Vorteil einer einfachen Schalung und Montage. Von Nachteil sind hier die mögliche Korrosion des Stahls und das notwendige Dichtungsmittel im Gelenkbereich. Entwurf V2 (Abb. 3) soll diese Nachteile mittels der Ausbildung des Gelenks durch das Gleiten zweier Flächen in Form eines Drehgelenks per Formschluss vermeiden. Die Sperre verkoppelt sich hierbei mittels zylindrischer Fläche mit dem Fundament, welche auf einer passgenauen Hülse dreht. Aufgrund der in diesem Fall noch kritischen großen Kräfte im Gelenkbereich war die Stabilität der Sperre im Einsatzzustand problematisch. Im finalen Entwurf V3 (Abb. 3) wird dies behoben, indem die Masse der Sperre reduziert und die Verankerung in der vertikalen Position gewährleistet wird.

Aufgrund der Vorteilhaftigkeit von Variante V3 wurde diese weiter optimiert. Im ersten Optimierungsansatz wurden das Gelenk (Gelenkarm und Adapterteil) modifiziert und die Verdrehung der Sperre auf 60° begrenzt, damit sich diese beim Rückgang des Hochwassers selbsttätig allein aufgrund des Eigengewichtes zum Ruhezustand senkt. Des Weiteren wurden eine Verriegelung gegen die vertikalen Kräfte im Einsatzzustand (Wasserdruck) sowie ein Anschlag ergänzt und die gesamten Abmessungen angepasst (Abb. 2).

#### Entwicklung und Untersuchung kleiner Prototypen

Nach Abschluss der umfangreichen theoretischen Untersuchungen zur Optimierung des Konstruktionskonzepts wurden die Sperre und das Fundament für die maßgebenden Einwirkungen und Materialeigenschaften vordimensioniert. Dabei wurde Mikrobewehrung eingesetzt, die auch in der Entwicklung der Sandwichelemente bei den Vorarbeiten verwendet wurde [4]. Das Fundament wurde mit üblichen Stahlstäben bewehrt. Nach den Berechnungen ergab sich für das Sandwichelement der Sperre eine Gesamthöhe von 21 cm, mit 2,5 cm dicken Deckschichten aus UHPC und einem 10 cm dicken Adapterteil als Verbindung zwischen Sperre und Fundament, um bei einer Aufstauhöhe des Hochwassers bis zu 100 cm den maßgebenden Einwirkungen einschließlich Verkehrslasten standzuhalten [5].



Fig. 7: Assembly of the demonstrator at the campus of TU Kaiserslautern

Abb. 7: Montage des Demonstrators auf dem Campus der TU Kaiserslautern

Figure: Fachgebiet Massivbau, TU Kaiserslautern

Initial experimental tests were carried out on prototypes to investigate the structural capacity and deformation behavior of the system. For these tests, a full-size, 20 cm wide barrier was produced complete with the joint arm and adapter part. This prototype was then subjected to quasi-static and dynamic loading in its passive and active state. The series of experimental tests proved that the structural capacity of the newly developed, self-closing flood barrier was sufficient both in the passive state under traffic load and in the active state under water pressure [3]. In addition, the functionality of the new system was tested and confirmed on a consistent test stand [3, 5].

Further optimization steps were implemented in a follow-on research project because the prototype production process still left room for optimization. Within the EU-funded Brigaid project, efforts concentrated on identifying the optimal reinforcement and modality in order to ensure the envisaged structural capacity, easy workability, and simple production. For this purpose, a full-size demonstrator was designed and built at the campus of TU Kaiserslautern. Four series of six 20 cm wide prototypes were produced to investigate the use of micro-reinforcement, reinforcing mesh and steel fibers and to perform bending tests to examine the structural capacity and deformation behavior of the system in its passive and active state.

The most appropriate reinforcement option identified in the project included 2 vol.-% of steel fibers ( $l_f = 12.5 \text{ mm}$ ,  $d_f = 0.2 \text{ mm}$ ,  $F_{stm} = 2,800 \text{ N/mm}^2$ ) and was suitable for use both in the barrier and in the foundation.

A fine-grained UHPC based on Nanodur supplied by Dyckerhoff was produced to ensure optimal consistency for mixing with steel fibers without triggering sedimentation. Its mean compressive strength  $f_{cm}$  amounted to  $140 \text{ N/mm}^2$  at a fiber ratio of 2 vol.-% and to  $130 \text{ N/mm}^2$  without fibers. The UHPC reached a mean flexural bending strength  $f_{cm}$  of  $22 \text{ N/mm}^2$  (post-

In ersten experimentellen Untersuchungen wurden die Tragfähigkeit und das Verformungsverhalten des Systems anhand von Prototypen untersucht. Hierbei wurde die Sperre mit angeformtem Gelenkarm und Adapterteil im Originalmaßstab mit einer Breite von 20 cm hergestellt und im Ruhezustand sowie im Einsatzzustand unter quasi-statischer und dynamischer Belastung untersucht. Anhand dieser experimentellen Untersuchungen konnte belegt werden, dass das entwickelte selbsttätige Hochwassersperrsystem sowohl im Ruhezustand unter Verkehrslast als auch im Einsatzzustand unter Wasserdruck eine ausreichende Tragfähigkeit hat [3]. Zudem wurde auch die Funktionalität des entwickelten Systems in einer speziell hierfür konzipierten Versuchseinrichtung untersucht [3, 5] und konnte bestätigt werden.

Da die Prototypen Optimierungspotenziale bei der Herstellung aufwiesen, erfolgten weitere Optimierungsschritte in einem anschließenden Forschungsprojekt. Im Rahmen des EU-Förderprojekts „Brigaid“ galt es, die optimale Bewehrungs- und Ausführungsart zu finden, um die angestrebte Tragfähigkeit, die leichte Verarbeitbarkeit und eine einfache Herstellung zu gewährleisten. Dabei wurde ein Demonstrator im Maßstab 1:1 geplant und auf dem Campus der TU Kaiserslautern errichtet. In vier Serien mit jeweils sechs Prototypen (Breite = 20 cm) wurden die Verwendung von Mikrobewehrung, Bewehrungsmatten und Stahlfasern untersucht und auch Biegeversuche zur Tragfähigkeit und dem Verformungsverhalten im Ruhezustand und Einsatzzustand durchgeführt.

Als bestgeeignete Umsetzungsvariante ergab sich die Bewehrung mit 2 Vol.-% Stahlfasern ( $l_f = 12,5 \text{ mm}$ ,  $d_f = 0,2 \text{ mm}$ ,  $F_{stm} = 2.800 \text{ N/mm}^2$ ), welche auch für die Sperre und das Fundament zugleich einsetzbar war.

Als Beton kam ein feinkörniger UHPC auf Basis von Nanodur der Firma Dyckerhoff mit optimaler Konsistenz zum Mischen mit Stahlfasern ohne Sedimentation zum Einsatz. Die mittlere Druckfestigkeit  $f_{cm}$  betrug  $140 \text{ N/mm}^2$  mit 2 Vol.-% Fasern und  $130 \text{ N/mm}^2$  ohne Fasern; die







Fig. 8: Lifting the barrier element into position

Abb. 8: Einhängen des Sperrelementes

Figure: Fachgebiet Massivbau, TU Kaiserslautern

cracking with fibers) and of  $13 \text{ N/mm}^2$  without fibers. Styrodur XPS 5000 CS supplied by BASF was used for the 16 cm core of the sandwich structure chosen for the self-floating barrier. A firm bond between the concrete and the core was ensured by 10 mm wide, 5 mm deep grooves milled into the top and bottom sides of the core 28 mm apart from each other.

#### Development and production of full-size elements

The results of the small-scale preliminary tests were subsequently used for producing all full-size components of the demonstrator (i.e. the barrier and the foundation) from ultra-high-performance fiber-reinforced concrete (UHPRFC) without any discrete reinforcement. The full-size demonstrator was 330 cm wide and 205 cm long; it comprised two identically designed systems, each including a 150 cm wide barrier and foundation and two enclosing lateral walls. The design included the production of stationary elements, such as the foundations and enclosing lateral walls, according to a segmented construction with the required openings. Furthermore, the demonstrator design ensured a non-slip profiling of the barrier surface to allow for the safe passing of vehicles, snow clearance, protection against dirt, and easy flushing of the system for cleaning purposes after the flood event. Besides the full-size demonstrator, additional components were produced for investigating the load-bearing and deformation behavior of large elements.

The partially complex shape of the joint within the barrier and the foundation required the milling of highly precise form inserts made from ureol (a polyurethane-based, microcellular material for model-making), which

mittlere Biegezugfestigkeit  $f_{ctm}$  lag bei  $22 \text{ N/mm}^2$  (mit Fasern nach Riss) und  $13 \text{ N/mm}^2$  ohne Fasern. Als Kern der Sandwichkonstruktion der aufschwimmenden Sperre kam Styrodur XPS 5000 CS der Firma BASF mit einer Dicke von 16 cm zum Einsatz. Der Verbund zwischen Beton und Kern wurde durch gefräste Rillen (Breite 10 mm, Tiefe 5 mm und Abstand 28 mm) an der Unter- und Oberseite des Kerns gewährleistet.

#### Entwicklung und Herstellung großmaßstäblicher Elemente

Auf Grundlage der Ergebnisse aus den kleinteiligen Voruntersuchungen wurden abschließend die gesamten Bauteile des Demonstrators, d. h. Sperre und Fundament, im Maßstab 1:1 aus faserbewehrtem Ultrahochleistungsbeton (UHPRFC) ohne jegliche diskrete Bewehrung hergestellt. Der Großdemonstrator war 330 cm breit und 205 cm lang und bestand aus zwei baugleichen Systemen mit je einer Sperre und einem Fundament von 150 cm Breite sowie zwei seitlichen Leitwänden. Dabei war vorgesehen, die nicht beweglichen Elemente, wie Fundamente und seitliche Leitwände, in Segmentbauweise mit den erforderlichen Öffnungen auszuführen. Zudem wurde in der Ausführung auch auf eine rutschfeste Profilierung der Oberfläche der Sperre für die sichere Überfahrt, die Räumbarkeit von Schnee, den Schutz vor Verschmutzung und die leichte Spülung der Anlage nach Eintreten des Hochwasserfalles geachtet. Neben dem Großdemonstrator wurden weitere Bauteile zur Untersuchung des Trag- und Verformungsverhaltens an großen Elementen hergestellt.

Als Schalung der teilweise komplexen Geometrie des Gelenkes in der Sperre und dem Fundament wurden hochpräzise Elemente aus Ureol (mikrozellulärer Modellbau-



were then fastened inside the securely stiffened wooden formwork. Three threaded rods were used to fix the core to the formwork bottom in order to resist concrete buoyancy (Fig. 4). Both the barrier and the foundation were cast in vertically positioned forms. The fiber-reinforced concrete was poured into the form at the end of the joint arm and adapter part so that it could flow and spread evenly along the cross-section of the barrier and the foundation. This concrete pouring method ensures the most effective dispersion of fibers into the components' tensile zones [6]. The enclosing lateral walls were cast in horizontal forms, with the fiber-reinforced concrete poured over the top wall edge according to the same principle (Fig. 5).

#### Experimental tests on full-size elements

Simultaneously with the prototype testing scheme, three-point bending tests substituting traffic loading were performed on the full-size elements in their passive state (Fig. 6). The first specimen was statically loaded to failure, the second specimen was subjected to five cycles and statically loaded to 50 kN and subsequently to failure. A 50 kN load is equivalent to the maximum traffic load in urban areas and to the wheel load of a firefighting vehicle. The tests proved that cyclical loading caused only a minimal plastic deflection of about 0.5 mm in

werkstoff auf Polyurethan-Basis) gefräst und in der sicher ausgesteiften Holzschalung befestigt. Der Kern wurde mit drei Gewindestangen in der Schalungssohle befestigt, um den Betonauftriebskräften zu widerstehen (Abb. 4). Die Betonage der Sperre ebenso wie des Fundamentes erfolgte in senkrecht aufgestellten Schalungen; der Faserbeton wurde dabei im Endpunkt des Gelenkarms und des Adapterteils eingefüllt, damit sich dieser entlang des Querschnitts der Sperre bzw. des Fundaments fließend verteilen konnte. Dies sichert die effektivste Faserverteilung in die Zugreiche der Bauteile [6]. Die seitlichen Leitwände wurden in waagrecht liegender Schalung betoniert, wobei der Faserbeton nach demselben Prinzip über die obere Wandkante eingefüllt wurde (Abb. 5).

#### Experimentelle Untersuchungen an großmaßstäblichen Elementen

Analog zu den Untersuchungen an den Prototypen wurden 3-Punkt-Biegeversuche an den großmaßstäblichen Elementen im Ruhezustand als Ersatzverkehrslast durchgeführt (Abb. 6). Dabei wurden der erste Probekörper statisch bis zum Versagen und der zweite Probekörper in fünf Zyklen statisch bis zu 50 kN und abschließend bis zum Versagen belastet. Eine Belastung von 50 kN stellt die maximale Verkehrsbelastung im Stadtgebiet dar und entspricht der Radlast eines Feuerwehrwagens. Es konnte gezeigt wer-



Fig. 9: "Real-life" functioning of the flood barrier after water accumulation

Abb. 9: Reale Funktion der Hochwassersperre nach Wasseranstau

Figure: Fachgebiet Massivbau, TU Kaiserslautern



Fig. 10: Front view of the demonstrator in its activated position

Abb. 10: Frontalansicht des Demonstrators in aktivierter Position

Figure: Fachgebiet Massivbau, TU Kaiserslautern

the center. The fracture load amounted to 200 kN at a deflection of about 20 mm. The load–displacement curve was approximately linear up to about 100 kN, with first cracks occurring under a load of 80 kN. The punching failure mechanism occurred in the upper cover layer upon load application. Overall, the test results confirmed the robustness of the system under high loads.

#### Assembly and test run of the full-size demonstrator

Towards the end of 2019, the full-size demonstrator was erected at the campus of TU Kaiserslautern in the final phase of the project. This process involved the placement of the precast foundations on a previously prepared subbase. Steel rods were used to insert the enclosing lateral walls into the corresponding openings, and the structural segments were tensioned (Fig. 7, 8). A silicone sealant was applied to all joints. Prior to the

den, dass die zyklische Belastung nur minimale plastische Durchbiegungen mit ca. 0,5 mm im Mittelfeld verursacht. Die Bruchlast trat bei 200 kN und einer Durchbiegung von etwa 20 mm auf. Das Last-Verformungs-Verhalten war bis zu einer Last von etwa 100 kN annähernd linear, wobei erste Risse unter einer Belastung von 80 kN entstanden. Der Versagensmechanismus in Form von Durchstanzen unter der Lasteinleitung trat in der oberen Deckschicht auf. Insgesamt bestätigten die Ergebnisse die Robustheit des Systems unter hohen Lasten.

#### Montage und Testlauf des Großdemonstrators

Zum Projektabschluss konnte Ende 2019 der Großdemonstrator auf dem Campus der TU Kaiserslautern errichtet werden. Dabei wurden die als Fertigteil produzierten Fundamente auf einer zuvor hergestellten Sauberkeitsschicht positioniert, die seitlichen Leitwände mittels Stahlstäben

installation and use of the barrier, high-pressure grease was applied to the contact zone of the joint between the barrier and the foundation in order to reduce friction and to ensure water tightness. In the final step, the demonstrator was filled with water, and its structural capacity was successfully proven under realistic loading (i.e. a truck driving over the surface) (Fig. 10).

### Conclusion

The above-described innovative, self-erecting precast flood barrier made from ultra-high-performance fiber-reinforced concrete makes a major contribution to mitigating flood damage. Production and testing of a full-size demonstrator under realistic conditions proved that the flood barrier developed at TU Kaiserslautern meets all requirements in terms of functionality, durability, and structural capacity. The individual development steps showed that the chosen design composed of a sandwich element with UHPFRC covers is ideally suited for precast production, which also ensures the low-maintenance use of the system, particularly of its watertight concrete joint. It would thus be desirable for the system to become commercially available after further testing.

### Acknowledgements

We thank the Federal Office for Building and Regional Planning (BBR) and the Brigaid EU project for their funding, as well as BASF for having supplied Styrodur and Dyckerhoff for having supplied Nanodur. We also thank the Department of Hydraulic Engineering and Water Management at TU Kaiserslautern for their support in the field of flood management.

in die dafür vorgesehenen Öffnungen eingeführt und die Bausegmente verspannt (Abb. 7, 8). Alle Fugen wurden dabei mit Silikonmasse abgedichtet. Zur Reduzierung der Reibung und zur Gewährleistung der Wasserdichtheit am Gelenk zwischen Sperre und Fundament wurde die Kontaktfläche vor dem Anbau und Einsatz der Sperre mit Hochdruckfett geschmiert. Abschließend wurde die Pilotanlage mit Wasser angestaut und ihre Tragfähigkeit unter wirklichkeitsnaher Belastung (Befahrung durch LKW) erfolgreich demonstriert (Abb. 10).

### Fazit

Die vorgestellte innovative selbsttätige Fertigteil-Hochwassersperre aus faserbewehrtem Ultrahochleistungsbeton liefert einen wichtigen Beitrag zur Begrenzung von Hochwasserschäden. Die Ausführung eines Großdemonstrators und der Test unter realen Einsatzbedingungen zeigt, dass die an der TU Kaiserslautern entwickelte Hochwassersperre allen Anforderungen hinsichtlich Funktionalität, Dauerhaftigkeit und Tragfähigkeit gerecht wird. Die verschiedenen Entwicklungsschritte belegen, dass sich die gewählte Konstruktion bestehend aus einem Sandwechelement mit Deckschichten aus UHPFRC für eine Anwendung in Fertigteilbauweise ideal eignet. Dabei gewährleistet diese einen wartungsfreien Einsatz insbesondere auch des wasserdichten Betongelenkes. Es wäre wünschenswert, wenn nach weiteren Tests das System Anwendung im Markt findet.

### Danksagung

Wir danken dem Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) und dem EU-Projekt „Brigaid“ für die finanzielle Unterstützung sowie der Firma BASF für ihre Unterstützung mit Styrodur und der Firma Dyckerhoff für das zur Verfügung gestellte Nanodur. Unser Dank gilt auch dem Fachgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU Kaiserslautern für die Unterstützung im Bereich Hochwassermanagement.

### REFERENCES / LITERATUR

- [1] EG Hochwasserrisikomanagement Richtlinie (EG HWRM RL) (2007): Richtlinie 2007/60/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2007 über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken.
- [2] DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (2014): Merkblatt DWA-M 533 Hochwassergepasstes Planen und Bauen; Hennef; Entwurf.
- [3] Schnell, J.; Jüpner, R.; Maryamh, K. und Eiden, M. (2019): Bemessung und Konstruktion von selbstaufschwimmenden Hochwassersperren in Beton-Sandwichbauweise: „Selbstaufschwimmende Hochwassersperren“ Schlussbericht. BBR Forschungsvorhaben.
- [4] Schnell, J.; Kohlmeyer, C.; Bayer, D.; Müller, F. (2013): Werkstoffgerechtes Konstruieren mit Hochleistungsbetonen, in: Beton- und Stahlbetonbau 108, Heft 6, S. 404-413.
- [5] Schnell, J. und Maryamh, K. (2018): Konstruktion und Bemessung selbsttätiger Hochwassersperren aus Hochleistungsbeton, in: Beton- und Stahlbetonbau 113, Heft 6, S. 423-432.
- [6] Maryamh, K.; Hauch, K.; Redenbach, C. und Schnell, J. (2020): Influence of production parameters on the fiber geometry and the mechanical behavior of ultra-high performance, in: Structural Concrete. 2020; 1– 15. <https://doi.org/10.1002/suco.202000105>



**Kasem Maryamh** (1981); 2000 bis 2005 Studium des Bauingenieurwesens (Bachelor) und von 2006 bis 2007 Diplom im konstruktiven Ingenieurbau an der Universität Damaskus in Syrien; 2006-2011 Berufserfahrung als Bauleiter und Tragwerksplaner bei u.a. Mahrukat, Lahmeyer Int. und China Dalian International Group CDIG; 2012-2014 Studium des Bauingenieurwesens an der Universität Kassel (Master of Science); seit 2014 wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachgebiet Massivbau und Baukonstruktion an der TU Kaiserslautern.



**Christian Glock** (1974); Studium des Bauingenieurwesens an der Technischen Universität Darmstadt; ab 1999 Mitarbeiter der Bilfinger Berger AG (jetzt Bilfinger SE); 2004 Promotion an der Technischen Universität Darmstadt; 2007 bis 2012 Mitglied der Geschäftsleitung der Niederlassung Project Development der Bilfinger Hochbau GmbH; 2013 bis 2017 Mitglied der Geschäftsführung Bilfinger Hochbau GmbH (heute Implenia Hochbau GmbH); seit 2017 Professur für Massivbau an der Technischen Universität Kaiserslautern; Mitglied in Gremien des DIN, CEN und des DBV sowie Sachverständiger beim DIBt.