

## **Beton zbrojony tkaniną – od badań do zastosowania**

### **Textile reinforced concrete – from research to application**

#### **1. Wprowadzenie**

Jedenaście lat temu Niemiecka Fundacja ds. Badań powołała dwa współpracujące ze sobą ośrodki badawcze 528 i 532 przy Uniwersytecie Technicznym w Dreźnie oraz przy Uniwersytecie w Akwizgranie. Zespoły te zajmowały się podstawowymi badaniami nad zastosowaniem tkanin technicznych w budownictwie. Od tego czasu, w ramach około 40 projektów, prowadzono prace badawczo-rozwojowe dotyczące tego „nowego” kompozytu.

Dzisiaj praktyczne zastosowanie tkanin do zbrojenia betonu jest ciągle w stadium początkowym. Po dziesięciu latach badań podstawowych pierwszy projekt pilotażowy wykazał, iż obszar zastosowań betonu zbrojonego tkaninami może być bardzo szeroki.

W artykule przedstawiono po raz pierwszy nowy materiał budowlany, którym jest beton zbrojony tkaninami. Po przedyskutowaniu czynników przemawiających za i przeciw temu kompozytowi opisano kilka przykładów jego zastosowań.

#### **2. Beton zbrojony tkaniną**

##### **2.1. Wzmocnienie betonu tkaniną**

Naprężenia rozciągające występujące w betonie przenoszone są przez tkaninę umieszczoną w strefie rozciąganej. W związku z towarzyszącej temu zbrojeniu eliminacji stali zbrojeniowej, to rozwiązanie nie wymaga już odpowiedniej otuliny. Z tego względu ten nowy materiał budowlany umożliwia rozwój innowacyjnych kierunków zastosowania w obszarze nowych konstrukcji, a także konserwacji budynków. Jako przykład możliwości wykorzystania betonu zbrojonego tkaniną, na rysunku 1 pokazano filigranową strukturę łukową wykonaną z betonu zbrojonego tkaniną (1). Na rysunku 10 (2) pokazano kładkę dla pieszych o rozpiętości 100 metrów, którą wykonano w Albstadt. Stanowi ona przykład innego zastosowania tego materiału. W dalszym ciągu pokazano inne przykłady.

Ogólnie, w porównaniu do tradycyjnych tworzyw, beton zbrojony tkaniną jest szczególnie przydatny w zastosowaniach do:

- elementów cienkościennych (o grubości  $\geq 10$  mm) o dużej nośności,

#### **1. Introduction**

Eleven years ago, the Deutsche Forschungsgemeinschaft, DFG (German Research Foundation) established both collaborative research centres 528 and 532 at TU Dresden and RWTH Aachen University to basically investigate the use of technical textiles in civil engineering. Since then, researchers have been engaged in about 40 projects developing this “new” composite material.

Today, the practical application of textile reinforced concrete is still at its beginning. After a decade of fundamental research, the first pilot projects, however, impressively illustrate the enormous field of application of textile reinforced concrete.

Within the framework of this paper, firstly textile reinforced concrete as new building material is explained. The pros and cons of the building material have been discussed on the basis of the illustrated findings, some applications of textile reinforced concrete are shown as example.

#### **2. Textile reinforced concrete, that is...**

##### **2.1. Strengthening of textile reinforced concrete**

In textile reinforced concrete, the developing tensile stresses are transferred by technical textiles placed in the concrete of the tension zone. Due to the associated elimination of the steel reinforcement there is no longer a requirement of a minimum concrete cover. Hence, this new building material enables the development of innovative and challenging fields of application in the area of new construction as well as building conservation. As an example of a new construction Figure 1 shows a filigree arch structure made of textile reinforced concrete (1). The 100-m-long footbridge made of textile reinforced concrete in Albstadt stands for a further application in new construction [Figure 10] (2). In general, as compared to conventional materials, textile reinforced concrete is advantageous in the following applications:

- thin-walled components (thickness  $\geq 10$  mm) with high load bearing capacity,
- complex component geometries obtained by easily shapeable technical textiles,

- elementów o skomplikowanej geometrii, otrzymanych z łatwych do kształtowania, a nawet trójwymiarowych tkanin technicznych,
- wykonywania specjalnych powierzchni,
- lekkich elementów posiadających zdolność do przenoszenia dużych obciążeń.

## 2.2. Tkaniny

Do wytwarzania technicznych tkanin stosuje się ciągły rowing szklany lub węglowy. Składa się on z wiązki włókien w liczbie przekraczającej 500 o średnicy od 12 do 30  $\mu\text{m}$  (rysunek 2). W trakcie wytwarzania włókna pokrywa się warstewką polimeru o grubości kilku nm. Z rowingu wykonuje się tkaninę. Ułożenie rowingu, a także wielkości oczek można zmieniać. Na rysunku 3 pokazano przykładowo tkaninę wykonaną z włókien szklanych.

W trakcie produkcji elementu betonowego tkaninę techniczną (np. taką jaką pokazano na rysunku 3) wprowadza się do betonu jako zbrojenie. Rysunki 4 i 5 ilustrują kompozyt, jakim jest beton zbrojony tkaniną.

Na rysunku 5 pokazano zdjęcie z mikroskopu skaningowego zabetonowanego rowingu z włókien szklanych. Obserwowana próbka została nasycona żywicą epoksydową aby zapobiec przesunięciu włókien podczas przygotowywania preparatu. Czarne pola na zdjęciu stanowią pustki między włóknami wypełnione żywicą epoksydową. Pokazano tu, uwięzione przez rowing znajdujący się w betonie, pory powietrzne i matrycę cementową; powoduje to nieregularne rozmieszczenie włókien w przekroju próbek.

Jak wynika z obrazu przekroju próbki betonowej, tylko pewna ilość włókien (włókna „zewnątrzne”) mają bezpośredni kontakt z betonem i tylko one stanowią wzmocnienie betonu przenosząc występujące w nim naprężenia. „Wewnętrzne” włókna stykają się z innymi włóknami oraz z porami. W związku z tym zdolność do przenoszenia obciążeń przez rowing w betonie zależy głównie od udziału wewnętrznych i zewnętrznych włókien na długości kontaktu z betonem (zakotwienia).

Pełne wykorzystanie tkaniny zbrojącej beton do przenoszenia obciążenia jest możliwe w przypadku wprowadzenia do betonu rowingu po uprzednim jego scaleniu w wyniku zanurzenia w polimerze. Całkowite scalenie tkaniny w polimerze zapewnia uśrednienie tego materiału zbrojącego i pozwala na wykorzystanie zarówno zewnętrznych jak i wewnętrznych włókien (rysunek 6). W tym celu do scalenia rowingu wykorzystuje się polimery styrenowo-butadienowe lub akrylowe oraz reaktywne żywice epoksydowe.

## 2.3. Beton

Rodzaj betonu zależy od obszaru jego zastosowania. Zwykle wymiar kruszywa w betonach zbrojonych tkaninami nie przekracza 4 mm i z tego względu są one nazywane betonami drobnoziarnistymi. Natomiast w wytwórniach elementów prefabrykowanych stosuje się często ciekłe mieszanki betonowe w celu dobrego osadzenia tkaniny w kompozycie. W przypadku konserwacji konstrukcji wyko-

- special surfaces,
- high load bearing capacity with low weight of components.

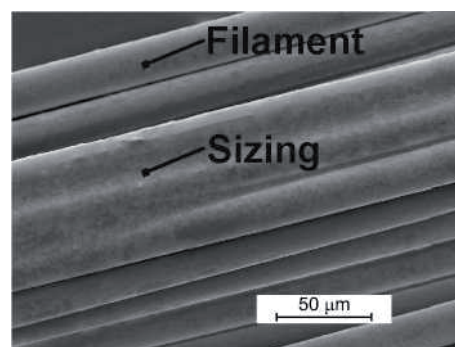
## 2.1. The textile

Continuous glass and/or carbon rovings are used to manufacture the technical textiles. These rovings consist of a bundle of more than 500 filaments with a diameter of between 12 and 30  $\mu\text{m}$  [Figure 2]. To process the filaments, they are covered with a sizing (polymer with a thickness of few nm) during the manufacturing process. Textiles (fabrics) are made from the rovings. The arrange-



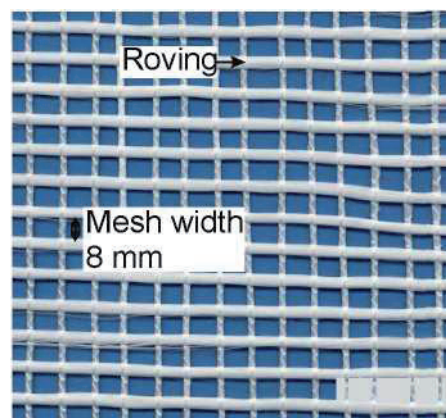
Rys. 1. Łuk o strukturze romboidalnej z betonu zbrojonego tkaniną

Fig. 1. Arc with a rhombic structure made of textile reinforced concrete (1)



Rys. 2. Zdjęcie skaningowe rowingu ze szkła odpornego na alkalia (AR).

Fig. 2. Scanning electron image of an AR-glass roving.



Rys. 3. Przykład tkaniny z włókien szklanych odpornych na alkalia (AR)

Fig. 3. Example of a textile made of AR-glass

Tablica 1 / Table 1

SKŁADY MIESZANEK Z BETONÓW DROBNO-KRUSZYWOWYCH W kg/m<sup>3</sup>  
USED FINE-GRAINED CONCRETE MIXES

Składniki Components	M9-15 (2)	PZ0899-01 (5)	EP-3.1.2-10 (5)	T1 (6)
CEM I 52.5 R	-	490	458	-
CEM II/A-LL 42.5 R	450	-	-	-
CEM III/B 325	-	-	-	628
Popiół lotny Fly ash	100	175	164	265.6
Metakaolinit Metacaolin	31.5	-	-	-
Pył krzemionkowy Silica fume	-	35	33	100.5
Polimer / Polymer	-	-	65	-
Woda / Water	213.8	280	288	214.6
Piasek / Sand 0/1 mm	-	-	-	942
Piasek / Sand 0-4 mm	1457	-	-	-
Piasek / Sand 0.2-0.6 mm	-	714	667	-
Pył krzemionkowy* Silica dust*	-	499	467	-
Mikrosfery Microspheres	3	-	-	-
Superplastyfikator* Superplasticiser*	unspeci- fied	10.5	1.2	10.5

\* litr/m<sup>3</sup>

rzystuje się mieszanki o większej lepkości, aż do zapraw stosowanych do natrysków, w połączeniu z układanymi warstwami tkaniny.

W tablicy 1 pokazano przykładowe składy betonów drobnoziarnistych.

Trzema pierwszymi mieszankami z tablicy 1 wypełniono formy, w których uprzednio umieszczono tkaniny, natomiast mieszankę T1 układano z zastosowaniem „mokrej” technologii natrysku pod ciśnieniem 15-20 barów (6). Domieszka dyspersji polimerowej [EP-3,1,2-10] dodawana do spoiwa powoduje zmniejszenie nasiąkliwości stwardniałego betonu, co powoduje wzrost trwałości zbrojenia, które stanowią włókna ze szkła AR - to jest odporne na środowisko zasadowe (7). Ostatnie badania wykazały, że zwykły torkret z kruszywem o uziarnieniu do 6 mm można także stosować wspólnie z tkaninami, przy wykorzystaniu „suchej” technologii natrysku.

„Dry mix” method i „Wet mix” method to dwie metody natrysku. W przypadku pierwszej suche składniki spotykają się z wodą dopiero w dyszy torkretnicy, a w przypadku drugiej tłoczy się wcześniej przygotowaną mieszankę betonową.

### 3. Właściwości betonu zbrojonego tkaniną

Krzywe na rysunku 7 ilustrują sposób zachowania się betonów zbrojonych tkaninami przy rozciąganiu. Tkaninę z włókien ze szkła AR połączono z drobnoziarnistym betonem PZ-0899-01. Stoso-

ment of the rovings as well as the mesh width can be varied. Figure 3 exemplarily shows an AR-glass textile.

When a concrete component is produced, the technical textiles [e. g. Figure 3] are embedded into the concrete as reinforcement. Figure 4 and Figure 5 give an impression of the composite textile reinforced concrete.

Figure 5 illustrates a scanning electron microscope image (SEM image) of an AR-glass roving embedded into concrete. The sample was grouted with epoxy resin to prevent a dislocation of the filaments during sample preparation. The black areas in the element contrast image are pores filled with epoxy resin. The rovings embedded into the concrete thus show entrapped air and binder; the result is an irregular distribution of the filaments in each sample cross-section.

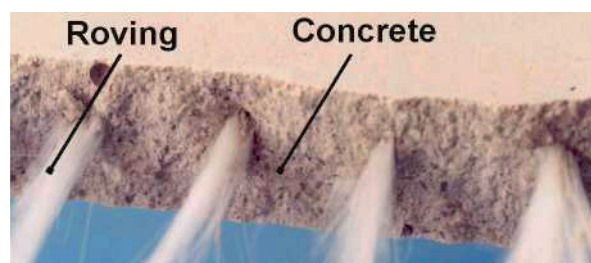
Figure 5 makes it clear that only a certain number of filaments (“outer” filaments) have a direct contact with the concrete and they transmit the forces of the reinforcement into the concrete via shear stresses. The “inner” filaments are in contact with the other filaments and with the pores, respectively. Thus, the load

bearing behaviour of a roving in the concrete mainly depends on the percentage of inner and outer filaments over the embedment length.

The use of the total reinforcement cross-section for the load transfer is possible by immersing the textiles in polymers. The total immersion of the textiles with polymers homogenises the reinforcement material and it enables the activation of the inner and outer filaments (Figure 6). Dispersions on the basis of styrene-butadiene or acrylate as well as reactive resins on the basis of epoxy resin are used to immerse the textiles.

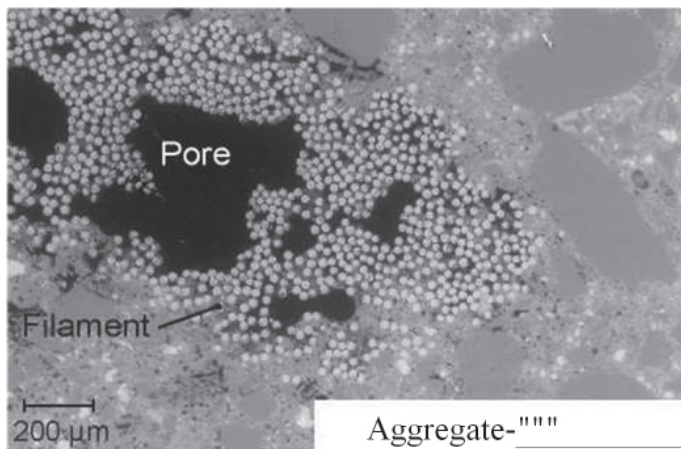
### 2.2. The concrete

The type of concrete varies depending on the field of application. Generally, the aggregate size of textile reinforced concretes is up to 4 mm; therefore they are called fine-grained concretes. Whereas



Rys. 4. Rowing szklany (AR) w betonie

Fig. 4. Embedment of the AR-glass rovings of a textile into the concrete



Rys. 5. Zdjęcie skaningowe rowingu szklanego (AR) w betonie

Fig. 5. SEM image of an AR-glass roving in the concrete

wano tkaniny: a) niescalone polimerami, b) scalone dyspersją akrylową, c) scalone żywicą epoksydową. Przyczepność składników badano w próbie zginania na beleczkach o wymiarach 500 x 100 x 10 mm<sup>3</sup>. W przypadku wszystkich stosowanych polimerów zmniejszenie stopniowego niszczenia włókien dzięki ich scaleniu w wyniku zanurzenia, prowadzi do znacznego zwiększenia wielkości przeniesionego obciążenia po pojawieniu się rys w drobnoziarnistym betonie. Oprócz znacznego polepszenia materiału, stosowanie żywicy epoksydowej o dużym module powoduje równomierne rozmieszczenie powstających rys.

W porównaniu z konwencjonalnie zbrojonym betonem, beton zbrojony tkaniną wykazuje więcej rys o mniejszym rozstawie i o mniejszej rozwartości. Dzięki większej elastyczności tkanin, odkształcenia są zwykle większe w porównaniu z żelbetem.

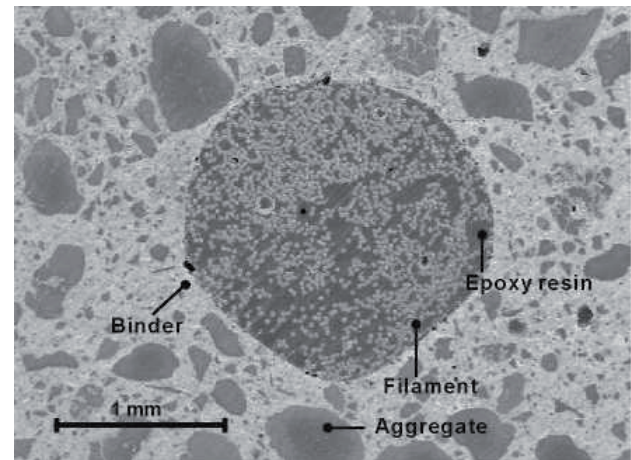
Duża zawartość spoiwa w połączeniu z małymi rozmiarami ziaren kruszywa daje bardzo gładkie i szczelne powierzchnie elementów betonowych. Są one podobne do materiałów ceramicznych.

W związku z zasadowym środowiskiem betonu tkaniny ze szkła AR tracą jednak część swojej wytrzymałości po dłuższym okresie. Ten ubytek wytrzymałości można znacznie ograniczyć przez, wspomniane już, scalenie w wyniku zanurzenia w odpowiedniej żywicy epoksydowej. W trakcie projektowania musi zostać uwzględniony ten spadek wytrzymałości przez stosowanie dostępnych modeli trwałości materiału (8, 9, 10). Spadku wytrzymałości nie wykazują natomiast tkaniny z włókna węglowego.

## 4. Zastosowanie betonu zbrojonego tkaniną

### 4.1. Informacje ogólne

Beton zbrojony tkaniną nie jest dotychczas objęty normami. Z tego względu w Niemczech elementy z tego materiału, spełniające wymagania w zakresie nośności, wymagają aprobaty dla każdego z zastosowań. Aprobaty udzielane są przez stosowne władze budowlane lub przez Narodowe Centrum Aprobata. Każda aprobatą udzielana dla konkretnych przypadków zastosowania wymaga gruntownych badań elementów z betonu zbrojonego tkaniną, co



Rys. 6. Zdjęcie skaningowe zatopionego w betonie rowingu szklanego (AR) nasyczonego żywicą epoksydową

Fig. 6. SEM image of an EP-immersed AR-glass roving in the concrete (4)

in precast element plants, often flowable concretes are used to embed the textiles, in building conservation, the use of higher viscosity concretes up to sprayed mortar combined with a placing of the textiles in layers is widely used.

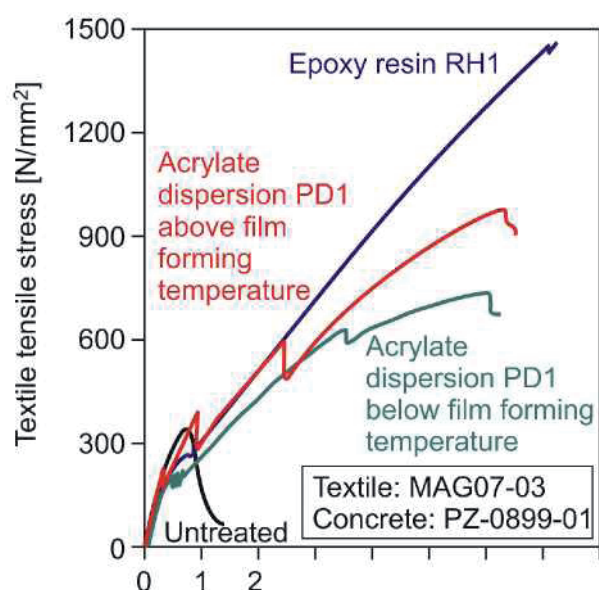
Table 1 shows examples of the used fine-grained concrete mixes.

The first three mixes of Table 1 are poured into the formwork in which the textiles have already been placed, whereas the T1-mix is applied under low pressure [15-20 bar (6), spraying method] in the wet mix method. When polymer dispersions (EP-3.1.2-10) are added to the binder, the water absorption is reduced and the durability of the AR-glass reinforcement is increased (7). Current investigations have shown that customary shotcretes with a maximum grain size of 6 mm can be combined with textiles in the dry mix method.

## 3. Properties of textile reinforced concrete

Figure 7 gives an impression of the load bearing behaviour of textile reinforced concretes under tensile stress. AR-glass textiles were combined with fine-grained concrete PZ-0899-01. The textiles were a) unimmersed, b) immersed with acrylate dispersions and c) immersed with epoxy resin. The bond behaviour of the component was investigated under tensile stress by means of cuboid-shaped samples (500 x 100 x 10 mm<sup>3</sup>). At all used polymers, the reduction of the successive filament failure due to the immersion led to a significant increase in load bearing capacity after the crack formation in the fine-grained concrete. Besides a considerably improved utilisation of the material, the use of high modulus epoxy resin causes a uniform, evenly distributed crack pattern.

Compared to conventional reinforced concrete components, textile reinforced concrete shows more cracks with smaller crack spacings and smaller crack widths. Due to the higher flexibility of the textiles, the strains generally tend to be larger as compared to reinforced concrete.



Rys. 7. Zachowanie się komponentów przy rozciąganiu (4)

Fig. 7. Load bearing behaviour of textile reinforced components in the textile test (4)

stwarza dobrą podstawę doświadczalną. Obie formy udzielania aprobat zostały już pozytywnie zaopiniowane przez Niemiecki Instytut Techniki Budowlanej i Niemiecką Komisję Żelbetu.

#### 4.2. Elementy warstwowe („sandwich”)

Elementy warstwowe o małej masie i równocześnie o dużej nośności można wykonywać jako połączenie betonu zbrojonego tkaniną, który tworzy warstwy zewnętrzne, z warstwą wewnętrzną ze sztywnej pianki, jako łączący rdzeń zdolny do przenoszenia obciążenia. Z pokazanych na rysunku 8 płyt typu „sandwich” (długość x szerokość x grubość = 3,45 m x 1 m x 0,18 m) wykonana została elewacja budynku Instytutu Technologii Tkanin Uniwersytetu w Akwizgranie.

Oprócz przyczepności na powierzchni styku tkaniny i betonu, łupiny betonowe są połączone za pomocą ośmiu łączników w formie bolców i dwóch poprzecznych kotew z nierdzewnej stali. Samoniesne elementy zamontowano na konstrukcji wsporczej.

Tego typu elementy warstwowe stanowią znacznie solidniejsze rozwiązanie niż konwencjonalne systemy izolacji cieplnej. Użyteczna nośność, większa trwałość i korzystny wygląd tego rozwiązania uzasadniają jego wyższy koszt. Z tego typu elementów warstwowych z warstwami z betonu zbrojonego tkaniną wznosić można także całe obiekty. Przykład może stanowić kawiarenka studencka (rysunek 9) zbudowana w Uniwersytecie Akwizgrańskim. Szczegółowe informacje na temat koncepcji tego obiektu można znaleźć w pracy (11).

#### 4.3. Elementy wentylowanej fasady

Z betonu zbrojonego tkaniną wytwarzane są także płyty elewacyjne o dużych wymiarach, o powierzchni większej od 12 m<sup>2</sup>. W tym przypadku elementy mają grubość około 30 mm. Elementy są łączone i mocowane za pomocą betonowych żeber usztywnia-

The high binder content in combination with the small size of the aggregate causes very smooth and dense concrete surfaces. The effect is comparable to ceramic materials.

As a result of the alkaline environment in the concrete, AR-glass textiles lose part of their strength in the long run. This loss of strength can be significantly reduced by an immersion with the suitable epoxy resins. In the design, the loss of strength must be considered applying available durability models (8-10). Carbon textiles, however, are not affected by this loss of strength.

## 4. Applications of textile reinforced concrete

### 4.1. General

Textile reinforced concrete has not been regulated by standards yet. Therefore, in Germany, textile reinforced concrete components which fulfil relevant load bearing functions require an Approval in Individual Cases by the building authorities or a National Technical Approval. The Approval in Individual Cases as well as the National Technical Approval require extensive tests on the textile reinforced concrete components. Both variations have already been successfully granted by the Deutsches Institut für Bautechnik, DiBt (German Commission for Reinforced Concrete). Hence, there is meanwhile a good base of experience concerning this matter.

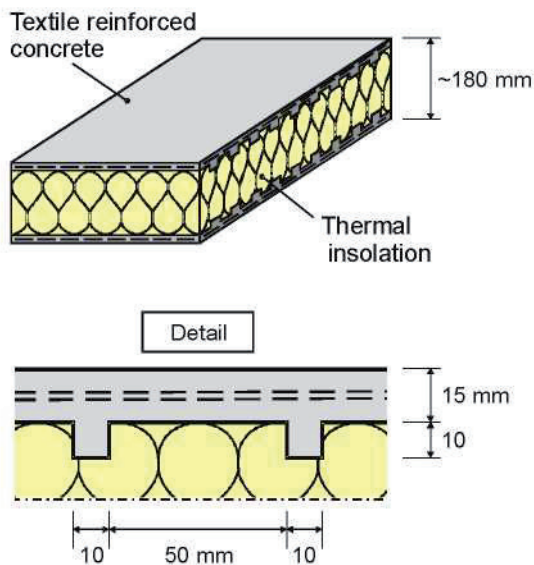
### 4.2. Sandwich elements made from textile reinforced concrete

Sandwich elements with a low weight at a simultaneously high load bearing capacity can be made from the combination of textile reinforced concrete as top layer with a rigid foam core able to bear loads as connecting link. The façade of the Institut für Textiltechnik (Institute of Textile Technology) of RWTH Aachen University was made with the sandwich structure outlined in Figure 8 (modular dimensions L x W x D = 3.45 m x 1 m x 0.18 m).

Besides the surface bond between textile and concrete, the 15-mm-thin textile reinforced concrete shells are connected with eight connector pins and two stainless steel transverse anchors. The self-supporting elements were mounted on a substructure.

Sandwich elements of this type represent a significantly more robust alternative to conventional thermally insulating bond systems. The usable load bearing capacity, the higher durability and the high-quality appearance of this solution are opposed to the higher costs.

In the area of new construction, however, entire building can also be built from textile reinforced sandwich elements. For instance, at RWTH Aachen University a students' cafe was built from these elements [Figure 9]. Detailed application concepts can be found in (11).



Rys. 8. Element warstwowy z betonu zbrojonego tkaniną

Fig. 8. Sandwich elements made of textile reinforced concrete

jących (12). Wyższy koszt materiałowy może być zrekompensowany niższymi kosztami transportu i montażu, związanymi z wymiarami elementów.

#### 4.4. Kładka dla pieszych

Latem 2010 zbudowano w Albstadt kładkę o długości 100 m z betonu zbrojonego tkaniną (rysunek 10). Składa się ona z sześciu prefabrykowanych elementów o długości do 17,20 m i płyty o grubość tylko 43,5 cm. W związku z tym przy rozpiętości 15,05 m uzyskuje się bardzo smukłą konstrukcję o stosunku wysokości do długości 1:35. Przekrój poprzeczny konstrukcji stanowi płyta z siedmioma żebrami sprężonymi podłużnie. Szerokość pomostu wynosi 3,21 m. Grubość otuliny wynosi 1,5 cm (2). Zastosowany beton droбноziarnisty daje możliwość uzyskania ostrokrawędzistej geometrii przekroju poprzecznego i jednorodnej powierzchni.



Rys. 10. Kładka dla pieszych z betonu zbrojonego tkaniną

Fig. 10. Footbridge made of textile reinforced concrete (image by Sebastian Wochner GmbH & Co. KG)



Rys. 9. Kawiarenka studencka wykonana z elementów warstwowych z betonu zbrojonego tkaniną

Fig. 9. Students' Cafe made of textile reinforced sandwich elements

#### 4.3. Textile reinforced concrete elements for ventilated facades

Large-sized façade slabs with a surface of more than 12 m<sup>2</sup> are also produced from textile reinforced concrete. In this case, the elements have a thickness of approx. 30 mm (12). The higher material cost can be compensated for by the lower transportation and assembly costs due to the element size.

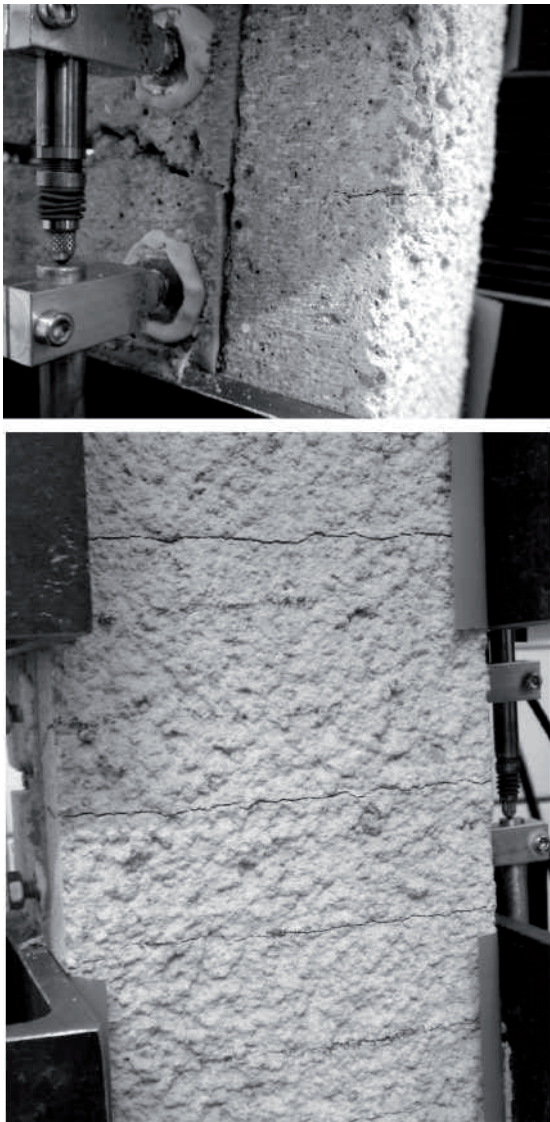
#### 4.4. Footbridge made of textile reinforced concrete

In summer 2010, a 100-m-long footbridge in Albstadt was built from textile reinforced concrete [Figure 10]. It consists of six precast elements which have a maximum length of 17.20 m at a slab thickness of only 43.5 cm. Thus, at a span of 15.05 m, an extremely slender structure with a slenderness ratio of only H:L = 1:35 is reached. The cross-section of the superstructure is a slab beam with seven webs prestressed in longitudinal direction with a width of 3.21 m. The concrete cover is 1.5 cm (2).

The used fine-grained concrete enables a sharp-edged geometry of the cross-section with a homogeneous surface.

#### 4.5. Textile reinforced concrete to strengthen steel reinforced concrete

The load bearing capacity and serviceability of a steel reinforced concrete component can be increased by the application of a reinforcing layer made of textile reinforced concrete in the tension zone. For this purpose, fine grained concrete is applied in the spraying method and the textile fabrics which are delivered on rolls are embedded into the sprayed fine-grained concrete layers. Because the fine-grained concrete and the textiles are applied in several layers, up to four layers of fabric can be inserted into a 20-mm-thick layer of fine-grained concrete in the wet mix method. In contrast to CFRP-lamellas, this variation yields higher reinforcement ratios (13). Compared to sprayed concrete strengthening



Rys. 11. Rozkład rys w warstwie naprawczej z natryskowej zaprawy zbrojonej tkaniną (u dołu) i rysa na starym betonie (u góry)

Fig. 11. Crack distribution in the textile reinforced sprayed mortar layer in comparison with a crack in the old concrete

#### 4.5. Beton zbrojony tkaniną jako wzmocnienie elementów żelbetowych

Zdolność do przenoszenia obciążenia i użyteczność elementów żelbetowych można zwiększyć przez zastosowanie warstwy wzmacniającej wykonanej z betonu zbrojonego tkaniną w strefie występowania naprężeń rozciągających. W tym celu stosuje się natrysk drobnoziarnistym betonem, a tkanina dostarczana w rolkach, jest osadzana w utworzonych w wyniku natrysku warstwach betonu. Ponieważ drobnoziarnisty beton i tkanina są układane warstwowo, na 20 mm grubości wzmocnienia, przy stosowaniu natrysku „mokrego” można wprowadzić do 4 warstw tkaniny. W przeciwieństwie do taśm z włókna węglowego (CFRP) ta metoda pozwala na uzyskanie efektywniejszego wzmocnienia (13). W porównaniu do wzmocnienia ze zbrojonego stalą betonu natryskowego, mała grubość warstwy oraz mniejszy ciężar własny przemawiają za betonem zbrojonym tkaniną.

with steel reinforcement, the small layer thicknesses and the low self weight speak for textile reinforced concrete.

In the meantime, several buildings have been equipped with textile reinforced strengthening layers and a certain routine has been established in the work. To name but a few examples, there are the hyper shell structure at FH Schweinfurt, the barrel vault of the tax office in Zwickau (6) and the footpath under the station in Kempten.

#### 4.6. Textile reinforced sprayed mortar layers for crack distribution

Solid hydraulic engineering structures that are several decades old often show moving working joints, cracks and lower strength concrete substrates. When unreinforced repair mortars are applied, these deformations of the substrate cause a “punching” of the cracks into the repair mortar. Water penetrates these cracks, consequently bond failures and spallings may occur.

This problem is solved by the application of customary sprayed mortars because the textiles produce an evenly distributed crack pattern in the repair mortar. The multiple crack formation in the repair mortar causes smaller crack widths and thus an increase in the service life of such repair measures.

Within the framework of a project funded by the Federal Waterways Engineering and Research Institute, different textile variations were combined with a sprayed mortar according to ZTV-W LB 219 (S-A3 SPCC) and the bond specimens were at first characterised in the laboratory. The embedment of the textiles into a customary dry mix mortar with a maximum grain size of 6 mm proved to be without problems. Moreover, it was shown that an evenly distributed crack pattern in the repair mortar develops starting at the crack opening in the substrate (Figure 11).

The selection of the textiles by means of laboratory tests and the development of the fastening technique were followed by tests on the building. This building was a pile of the Neckar weir at Horkheim. The applicability of textile reinforced sprayed mortar lay-



Fig. 12. Test repair of a pile of the Neckar weir at Horkheim

Rys. 12. Próbną naprawa filaru zapory na Nekarze w Horkheim

Dotychczas warstwy wzmacniające z betonu zbrojonego tkaniną zastosowano w kilku obiektach i rozwiązanie to staje się już pewną rutyną. Spośród nielicznych zastosowań można wymienić kilka przykładów: łupinową konstrukcję w FH Schweinfurt, beczkowe sklepienie w budynku urzędu podatkowego w Zwickau (6) oraz przejście dla pieszych na dworcu w Kempten.

#### **4.6. Warstwy natryskowe zaprawy zbrojonej tkaniną i rozkład rys**

W eksploatowanych przez dziesiątki lat, masywnych hydrotechnicznych konstrukcjach inżynierskich, występują często „ruchome” pracujące spoiny, rysy i obniżona wytrzymałość podłoża betonowego. W przypadku zastosowania do naprawy niezbrojonych zapraw te deformacje podłoża powodują rozprzestrzenianie się rys do nałożonej zaprawy. Woda migruje do tych rys o rozwarciu do 0,7 mm powodując uszkodzenia i odspojenia. Problem ten można rozwiązać stosując zbrojone zaprawy natryskowe, ponieważ tkanina powoduje równomierne rozmieszczenie rys w zaprawie naprawczej. Powstanie licznych rys w zaprawie naprawczej powoduje mniejsze ich rozwarcie, a tym samym zwiększenie żywotności tak wykonanych napraw.

W ramach projektu finansowanego przez Federalny Instytut Techniczno-Badawczy Dróg Wodnych zbadano zaprawy natryskowe z różnymi rodzajami tkanin zgodnie z wytycznymi ZTU-WLB 219 [S-A3SPCC], przy czym próbki sprawdzano najpierw w laboratorium. Potwierdzono, że wprowadzenie tkanin do tradycyjnej konfekcjonowanej zaprawy o maksymalnym wymiarze ziarna wynoszącym 6 mm nie stwarza żadnych problemów. Ponadto wykazano, że powstaje równomiernie rozmieszczona siatka rys w zaprawie naprawczej mająca swoje źródło w spękanym podłożu (rysunek 11).

Wybór tkaniny w oparciu o badania laboratoryjne i rozwój metod ich wprowadzania do zaprawy został potwierdzony próbami na budowie. Budową tą był filar zapory na Nekarze w Horkheim. Przeprowadzono tam udane zastosowanie nakładanej warstwowo zaprawy natryskowej zbrojonej tkaniną (rysunek 12). Przyszłe badania, z zastosowaniem wprowadzonych do zaprawy sensorów oraz inspekcji wizualnej, dostarczą informacji o funkcjonalności nowej metody naprawczej w budownictwie.

#### **4.7. Zbrojona tkaniną opaska na rysie**

Zbrojone włóknami warstwy wzmacniające są także stosowane w specjalnych rozwiązaniach. Na przykład rysa w ośmiokątnym sklepieniu katedry w Akwizgranie została zespolona zbrojoną tkaniną opaską. Celem zastosowania tej opaski było mocne związanie obrzeża rysy, utrzymanie go w obecnym położeniu i zapobieżenie jego przesunięciom oraz wnikananiu wody (14).

Zastosowanie opaski umożliwia rozłożenie obciążenia na obrzeżach rysy za pośrednictwem tkaniny, aż do granicznego obciążenia. Po osiągnięciu granicznego obciążenia wiązanie opaski z konstrukcją zostaje zniszczone, co zapobiega uszkodzeniu zabytkowej budowli. Wprowadzone sensory mierzą wzrost naprężeń w opasce. Gdy występuje uszkodzenie z powodu nierównomier-

ers under in-situ conditions was successfully demonstrated there (Figure 12). Future investigations performed with built-in sensors and visual inspection will furnish information on the functionality of the new repair system at the building.

#### **4.7. Textile reinforced crack bandage**

Textile reinforced strengthening layers are however also suited for special issues – individual solutions. For instance, a crack in the dome of the octagon of the Aachen Cathedral was “clamped” with a textile reinforced crack bandage. It is the aim of the crack bandage to fasten the crack faces in their present position, i. e. to prevent crack movements and water penetration (14).

The design of the crack bandage enables the load transfer between the crack faces across the textiles up to an ultimate load. Built-in sensors measure the developing strains in the bandage. When a failure occurs as a result of irregular loads, this can consequently be measured with the sensors and the bandage can be exchanged.

The crack bandage was made manually on site by alternatingly applying mortar and textile. Two carbon textile layers immersed in epoxy resin were embedded. The mortar composition is based on materials which have already been used at the Aachen Cathedral and which had been agreed upon with the city office for the preservation of historic monuments.

## **5. Summary and outlook**

Within the framework of this paper, the materials of textile reinforced concrete – technical textiles and fine-grained concretes with a small grain size are explained. The advantages of textile reinforced concrete are the small thickness, the low weight, the flexibility in construction and the smooth, dense surfaces at a simultaneously high load bearing capacity. Presently, the high costs are disadvantageous. The higher material costs result mainly from the required National Technical Approval or the Approval in Individual Cases and the minor practical experience.

The illustrated applications show however that the use of textile reinforced concrete in new construction and in building conservation increases, in particular where special issues are concerned. The manifold application possibilities are positively opposed to the higher costs. In this context, the thin-walled structure combined with the high load bearing capacity is most convincing.

## **Acknowledgment**

The authors wish to thank the Deutsche Forschungsgemeinschaft, DFG (German Research Foundation) for their financial support within the framework of the Collaborative Research Centre 532 “Textile Reinforced Concrete”.



nego obciążenia, zostanie to wykryte przez sensory i opaska zostanie wymieniona na nową.

Opaskę na rysie wykonano na miejscu ręcznie nakładając w odpowiedniej kolejności zaprawę i tkaninę. Wprowadzono dwie warstwy tkaniny z włókien węglowych, scalonej przez zanurzenie w żywicy epoksydowej. Skład zaprawy opierał się na materiałach, które by już stosowane w Katedrze w Akwizgranie, i które zostały uzgodnione z miejskim urzędem konserwacji budowli zabytkowych.

## 5. Podsumowanie

Artykuł omawia materiały stosowane w betonach zbrojonych tkaniną, a mianowicie tkaniny techniczne i drobnoziarniste betony. Zalety betonu zbrojonego tkaniną w konstrukcji to mała grubość, mały ciężar, elastyczność i gładka, zbita powierzchnia przy równoczesnej dużej zdolności do przenoszenia obciążenia. Natomiast wadą jest obecnie duży koszt. Większy koszt materiałowy wynika głównie z wymagań Narodowego Ośrodka Aprobata Technicznych lub z aprobat udzielanych w indywidualnych przypadkach, a także z małego doświadczenia praktycznego.

Omówione zastosowania wskazują jednak, że stosowanie betonu zbrojonego tkaniną w nowych konstrukcjach oraz w pracach konserwatorskich, szczególnie w przypadkach, w których potrzebne są specjalne rozwiązania, wzrasta. Możliwości różnorodnych zastosowań równoważą wyższe koszty. W tym kontekście cienkościenność konstrukcji w połączeniu z ich dużą nośnością stanowią najbardziej przekonujące atuty.

## Literatura / References

1. J. Hegger, H. N. Schneider, S. Voss, I. Bergmann, Dimensioning and Application of Textile-Reinforced Concrete, Farmington Hills, Mich.: American Concrete Institute, ACI SP-250, 2008. - In: Textile-Reinforced Concrete, p. 16, ACI Fall 2005 Convention, Kansas City, A. Dubey (Ed.).
2. J. Hegger, C. Kulas, H. N. Schneider, W. Brameshuber, M. Hinzen, M. Raupach, T. Büttner, TRC Pedestrian Bridge - Design, Load-Bearing Behavior and Production Processes of a Slender and Lightweight Construction, Bagnex: RILEM, 2010. - In: Proceedings of the International RILEM Conference on Materials Science (MatSci), vol. 1, p. 353, 2nd ICTRC Textile Reinforced Concrete, Aachen, September 6-8, 2010, W. Brameshuber, W. (Ed.).
3. U. Diltthey, M. Schleser, M. Raupach, J. Orlowsky, Textilbeton mit polymergetränkter Bewehrung, In: Beton, 57, nr. 3, p.p. 92, 96, 99 (2007).
4. A. Keil, M. Raupach, M. Puterman, Waterborne Epoxies in Cementitious Matrices Used for Textile Reinforced Concrete, Braga: University of Minho, 2010. - In: 13th International Congress on Polymer in Concrete, 10 - 12 February 2010, Funchal, Madeira, p. 135, J. B. Aguiar, S. Jalali, A. Camoes, R. M. Ferreira (Eds.).
5. C. Hankers, D. Matzdorff, Textilbewehrter Spritzbeton zur Bauwerksverstärkung, Fachaufsatz TORKRET AG, Spritzbeton-Tagung 2009 in Alpbach, Tirol.
6. T. Büttner, J. Orlowsky, M. Raupach, Textile Reinforced Concrete - Durability Issues: Changes of the Bond and Tensile Strength Due to Ageing. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2009. - Proceedings of the 9th International Symposium on Brittle Matrix Composites, Warsaw, 25-28 October 2009, p. 101, A. M. Brandt, J. Olek, I. H. Marshall, (Eds.).
7. J. Orlowsky, M. Raupach, H. Cuypers, J. Wastiels, Durability Modelling of Glass Fibre Reinforcement in Cementitious Environment, In: Materials and Structures (RILEM) 38, nr 276, s. 155 (2005).
8. J. Orlowsky, M. Raupach, Modelling the Loss in Strength of AR-Glass Fibres in Textile-Reinforced Concrete, In: Materials and Structures (RILEM) 39 nr 6, s. 635 (2006).
9. J. Orlowsky, M. Raupach, Durability Model for AR-glass Fibres in Textile Reinforced Concrete, In: Materials and Structures (RILEM) 41, nr 7, s. 1225 (2008).
10. J. Hegger, M. Horstmann, J. Feldmann, D. Pyschny, M. Raupach, T. Büttner, C. Feger, Sandwich Panels Made of TRC and Discrete and Continuous Connectors, Bagnex: RILEM, 2010. - In: Proceedings of the International RILEM Conference on Materials Science (MatSci), Vol. 1, p. 381, 2nd ICTRC Textile Reinforced Concrete, Aachen, September 6-8, 2010, W. Brameshuber, (Ed.).
11. J. Hegger, M. Schneider, C. Kulas, Dimensioning of TRC with Application to Ventilated Facade Systems. Bagnex, RILEM, 2010. -In: Proceedings of the International RILEM Conference on Materials Science (MatSci), Vol. 1, p. 393, 2nd ICTRC Textile Reinforced Concrete, Aachen, September 6-8, 2010, W. Brameshuber, (Ed.).
12. C. Hankers, Textilbewehrter Spritzbeton zur Verstärkung von Geschossdecken. 2. Anwendertagung Textilbeton. TU Dresden, 1.10.2010.
13. M. Raupach, T. Büttner, H. Maintz, Retrofitting AACHEN Cathedral with a Flexible Textile Reinforced Mortar Bandage. Vancouver: University of British Columbia, 2010. - In: Conservation of Heritage Structures. Proceedings of the Third International Workshop on Civil Structural Health Monitoring: Conservation of Heritage Structures Using FRM and SHM, p. 47, Ottawa, Canada, August 11 - 13, 2010, N. Banthia, A. Mufti, (Eds.).