

# Projektowanie elementów z UHPFRC na zginanie i rozciąganie

## Structural design of UHPFRC elements under bending and tension



**dr inż. Bartłomiej Sawicki**

Technische Universität Braunschweig,  
Institute of Structural Design (ITE)  
b.sawicki@tu-braunschweig.de  
ORCID: 0000-0002-5632-3461

### Streszczenie

Ultrawysokowartościowe fibrokompozyty cementowe (UHPFRC), znane też jako betony ultrawysokowartościowe modyfikowane włóknami, łączą wyjątkową wytrzymałość na ściskanie i trwałość z kontrolowanym zachowaniem przy rozciąganiu poprzez umocnienie odkształceniowe. Umożliwia to nową filozofię projektowania konstrukcji, w której zbrojenie rozproszone częściowo zastępuje tradycyjne pręty stalowe. Bezpieczne wykorzystanie tego mechanizmu wymaga zrozumienia mikro- i mezostruktury materiału, aby w skali makro w pełni wykorzystać jego potencjał.

W artykule przedstawiono pokrótce skład materiałowy oraz klasyfikację UHPFRC zgodnie z obowiązującymi w Europie normami. Poruszono zwłaszcza jego zachowanie przy rozciąganiu ze szczególnym uwzględnieniem odpowiedzi materiałowej, a także trwałości. Przede wszystkim jednak opisano logikę projektowania na zginanie belek łączących klasyczne pręty zbrojeniowe z UHPFRC, tzw. zbrojonego UHPFRC,

według normy szwajcarskiej SIA 2052 oraz francuskiego aneksu do Eurokodu 2 NF P18-710. Dokumenty te traktują nieco inaczej kwestię decydującą dla zachowania UHPFRC na rozciąganie, jaką jest rozkład włókien w zależności od grubości elementu. Podchodzą one również w nieco inny sposób do roli projektantów, pozostawiając im odpowiednio więcej (SIA 2052) lub mniej (NF P18-710) swobody w przełożeniu wytycznych normowych na model materiałowy stosowany w projektowaniu elementów.

Najważniejszy wniosek wynikający z artykułu to ten, że skuteczne projektowanie elementów z tego materiału wymaga nie tylko zrozumienia jego zachowania jako kompozytu, lecz także redefinicji formy konstrukcji, w której kompozyt cementowy zbrojony włóknami aktywnie uczestniczy w przenoszeniu sił rozciągających. Wskazano też, że wprowadzenie odpowiednich ram normatywnych oraz kształcenie specjalistów to kluczowe warunki upowszechnienia technologii UHPFRC w Polsce.

**Słowa kluczowe** normy, wymiarowanie, stan graniczny nośności, zachowanie przy rozciąganiu, BUWW

### Abstract

Ultra High Performance Fibre Reinforced Cementitious composites (UHPFRC), also known as fibre-reinforced ultra-high-performance concretes, combine exceptional compressive strength and durability with controlled tensile behaviour governed by strain hardening. This enables a new design philosophy in which distributed fibre reinforcement can partially replace conventional reinforcing bars. However, the safe use of this mechanism requires understanding the material's micro- and mesostructure to fully exploit its potential at the structural scale.

This paper provides a brief overview of the material composition and classification of UHPFRC according to current European standards. Particular attention is given to its tensile behaviour, as well as durability aspects. The core of the paper focuses on the logic behind bending design of reinforced UHPFRC beams as structural elements combining conven-

tional reinforcement with UHPFRC according to the Swiss standard SIA 2052 and the French National Annex NF P18-710 to Eurocode 2. These documents treat the fibre distribution as a function of element thickness somewhat differently, and they also differ in the degree of modelling freedom granted to designers, with SIA 2052 allowing more flexibility and NF P18-710 offering a more prescriptive approach.

The main conclusion is that effective design of UHPFRC structural elements requires not only understanding the composite behaviour of the material but also rethinking structural form so that the fibre-reinforced cementitious matrix actively contributes to carrying tensile forces. The paper also emphasises that the development of an appropriate normative framework and the education of professionals are essential prerequisites for the wider adoption of UHPFRC technology in Poland.

**Keywords** Standards, Structural dimensioning, Ultimate Limit State, Tensile behaviour, UHPC



## WPROWADZENIE

Ultrawysokowartościowe fibrokompozyty cementowe (UHPFRC) to klasa materiałów, w których macierz cementowa o bardzo niskiej porowatości współpracuje z włóknami, zwykle stalowymi. Ponieważ najpopularniejszym materiałem budowlanym bazującym na cemencie jest beton, w piśmiennictwie polskim i międzynarodowym stosuje się często określenia: betony ultrawysokowartościowe (BUWW) [1], betony z proszków reaktywnych (BPC) [2, 3] lub wprost

**Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC)** [4]. Nazewnictwo to nie jest jednak do końca poprawne, ponieważ – zgodnie z definicją normową – beton to materiał, który powstaje ze zmieszania cementu (spoiwa), kruszywa grubego i drobnego, wody oraz ewentualnych domieszek, dodatków lub włókien. Tymczasem ultrawysokowartościowe fibrokompozyty cementowe zazwyczaj nie zawierają kruszywa grubego, a jedynie piasek o uziarnieniu poniżej 2 mm (o powodach mowa w dalszej części artykułu). Dlatego również w piśmiennictwie polskim używa się zwykle skrótowej nazwy UHPFRC. Można

ją też rozwinąć jako Ultra High Performance Fibre Reinforced Cementitious Composite.

UHPFRC należy do grupy IKF – inżynierskich kompozytów fibrocementowych. Są to materiały, których skład został starannie dobrany pod względem ich oczekiwanej odpowiedzi na obciążenia. W rodzinie IKF rozróżnia się głównie dwa rodzaje materiałów, które skomponowane są tak, aby uzyskać odmienne odpowiedzi pod obciążeniem rozciągającym:

- ECC (Engineered Cementitious Composites), wykazujące stabilne i duże odkształcenia już przy niewielkich naprężeniach, oraz
- UHPFRC, które wykazują umocnienie odkształceniowe, aby uzyskać sztywniejszą odpowiedź konstrukcji (por. rys. 1 i [4]).

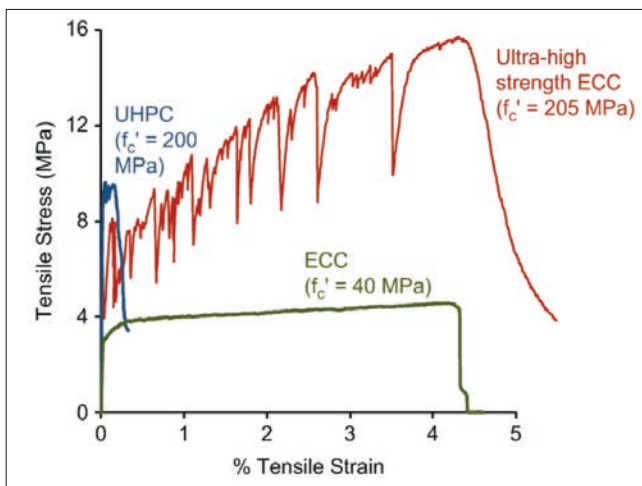
Dzięki zastosowaniu dużej ilości objętościowej włókien ( $V_f > 2,5\text{--}3\%$ , zależnie od źródeł) oraz odpowiednio dobranej receptury macierzy wszystkie IKF wykazują równomiernie rozproszone mikropęknięcia przy rozciąganiu, zapewniając doskonałą szczelność i trwałość. Podczas gdy ECC dobrze sprawdzają się jako materiał niekonstrukcyjny,

np. w strefach przejściowych dylatacji, UHPFRC jest materiałem konstrukcyjnym. I to właśnie na nim skupia się ten artykuł.

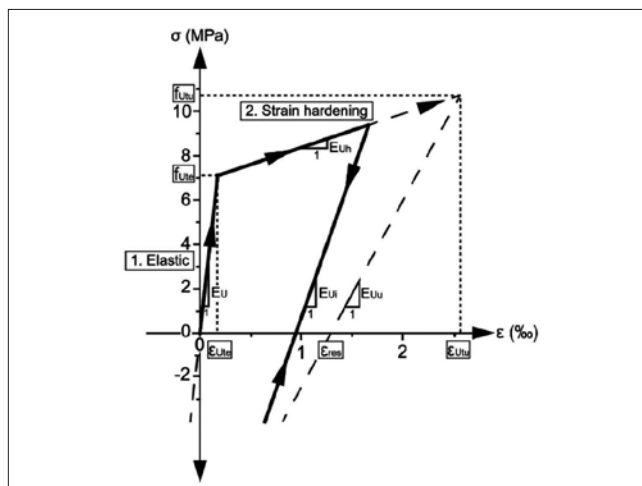
## UHPFRC – CHARAKTERYSTYKA I WŁAŚCIWOŚCI

### Kompozycja materiałowa

UHPFRC składa się z gęsto upakowanej macierzy cementowej, która poza spoiwem zawiera drobne kruszywa ( $< 2\text{ mm}$ ), pył krzemionkowy wypełniający przestrzenie pomiędzy kruszywem drobnym, wodę oraz superplastyfikatory. Ponieważ z powodu niskiej zawartości wody ( $w/c < 0,35$ , często w granicach  $0,2\text{--}0,25$ ) część cementu nie ulega hydratacji, jest ona zastępowana wypełniaczami wapiennymi w celu zmniejszenia kosztów oraz energochłonności [5]. Wtedy bardziej właściwym wyznacznikiem jest stosunek ilości wody do ilości spoiwa ( $w/b$ , water to binder). Stosowanie pyłów oraz wypełniaczy lub nieuwodnionego cementu ma na celu utworzenie jak najbardziej upakowanej i jednorodnej macierzy [6], zapewniającej wysoką wytrzymałość na ściskanie oraz nieprzepuszczalność. Przede wszystkim jednak uzyskuje się dzięki temu doskonałą współpracę



Rys. 1. Porównanie odpowiedzi na rozciąganie UHPFRC, ECC i BUWW [22]



Rys. 2. Podstawowa charakterystyka materiałowa przy rozciąganiu [23]

macierzy i włókien poprzez znakomitą przyczepność.

I to właśnie wysoka zawartość krótkich włókien odróżnia UHPFRC od betonów z proszków reaktywnych (BPR, Reactive Powder Concrete – RPC), chociaż bywa, że nazwy te są używane zamiennie. Zwykle stosuje się krótkie ( $l_f < 15$  mm) i smukłe ( $l_f/d_f \approx 65$ ) proste włókna stalowe w dużej ilości objętościowej ( $V_f > 2,5\text{--}3,0\%$ ) [5], ale w opracowaniach naukowych spotyka się również UHPFRC ze specjalnie dobranymi włóknami syntetycznymi o bardzo wysokiej wytrzymałości na rozciąganie [7]. Włókna stalowe ze stali ciągnionej o wytrzymałości z reguły powyżej 2000 MPa pokryte są często mosiądzem, który przy wyciąganiu włókna z macierzy jest rysowany i deformowany przez drobne kruszywa, zwiększając przyczepność mechaniczną poprzez tarcie. Ma to na celu uzyskanie maksymalnej siły przy próbie wyciągania włókien z matrycy, balansującej pomiędzy mechanizmem wyciągnięcia i zerwania włókna [5].

### Właściwości materiałowe

Mechanizm ten, wraz z ilością oraz orientacją włókien przechodzącą przez daną płaszczyznę, opisuje zachowanie makroskopowe materiału na rozciąganie [8]. Dla materiałów fibrocementowych charakterystyczne są dwie podstawowe odpowiedzi na rozciąganie:

- umacnianie (strain hardening) oraz
- osłabianie (strain softening) przy odkształceniu.

Jeśli liczba włókien w danym przekroju lub ich wytrzymałość na wyciąganie lub rozciąganie jest niewystarczająca, w momencie gdy macierz cementowa osiąga swą wytrzymałość na rozciąganie i pęka, włókna nie są w stanie przetrwać takiej samej siły jak ta przyłożona do przekroju tuż przed pękaniem macierzy. Wtedy występuje osłabianie przy odkształceniu. Objawia się to – przy rozciąganiu osiowym próbki lub elementu – nagłym spadkiem nośności. Jest to stan znany wszystkim projektantom elementów betonowych i powoduje, że nie możemy polegać na odporności betonu na rozciąganie.

W przypadku jednak gdy liczba, orientacja i współpraca włókien z macierzą jest odpowiednia, w momencie mikropęknięcia macierzy w danym przekroju włókna są w stanie przenosić siłę lub – w ujęciu materiałowym – naprężenia większe niż sama macierz bez włókien. Wtedy materiał ten jest w stanie umacniania przy odkształceniu. Przy równomiernym rozkładzie włókien w elemencie mikropęknięcia macierzy pojawiają się w wielu przekrojach, powodując pozorną zmianę modułu elastyczności poprzez plastyczne odkształcenie w owych mikropęknięciach [9]. Sprawia to, że

odpowiedź materiału jest stabilna. Natomiast projektant, przy odpowiednich warunkach, może polegać na włóknach jako na zbrojeniu rozproszonym. **Można zatem projektować elementy z UHPFRC nie tylko na ściskanie, lecz także na rozciąganie.** Jest to kluczowa cecha tej klasy materiałów, która niejako wymusza na projektancie zmianę nawyków wyniesionych z tradycyjnych konstrukcji betonowych.

Aby wyznaczyć w sposób uproszczony odpowiedź na rozciąganie, opisuje się poszczególne wartości charakterystyki materiałowej (symbole za normą SIA 2052 [10]/NF-P18-710 [11]):

- $f_{ute}/f_{cte}$  – limit elastyczności/granica sprężystości, odpowiadająca powstaniom spękań macierzy cementowej;
- $f_{utu}/f_{ctf}$  – wytrzymałość kompozytu na rozciąganie osiowe;
- $\epsilon_{utu}/\epsilon_{u,lim}$  – odkształcenie przy  $f_{utu}/f_{ctf}$ ;
- $E_u/E_{cm}$  – moduł sprężystości, zwykle identyczny przy rozciąganiu i ściskaniu (por. rys. 2).

### Trwałość

Gęsto upakowana macierz UHPFRC przynosi również inne zalety, głównie związane ze szczelnością i odpornością na działanie środowiska zewnętrznego (np. penetracją wody lub karbonatyzacją), wysoką twardością, udurowieniem i odpornością na ściekanie, ale też doskonałą przyczepnością

np. prętów zbrojeniowych albo innych materiałów, takich jak tradycyjny beton. Umożliwia to nowe zastosowania materiału, np. do wzmacniania i zabezpieczania istniejących konstrukcji betonowych bez dodatkowych warstw i środków hydroizolacyjnych.

Jak wykazały badania [12, 13], nawet w stanie mikrospeknięcia, a zatem już po przekroczeniu granicy sprężystości przy rozciąganiu, UHPFRC wykazuje szczelność wodną na poziomie dobrego i niespeknanego betonu o średniej wytrzymałości. Natomiast w stanie przed przyłożeniem obciążenia materiał ten jest uznawany za całkowicie nieprzepuszczalny dla wody. Dzięki temu UHPFRC można wykorzystywać także jako warstwę hydroizolacyjną dla elementów żelbetowych [14].

### Zastosowanie w konstrukcjach

Indykatywne wartości, które mogą być stosowane przy projektowaniu, sięgają wytrzymałości na rozciąganie od 7 do nawet 15–18 MPa, zaś na ściskanie od 120 do 200–250 MPa, bez dodatkowych zabiegów pielęgnacyjnych, zależnie od materiału. Jako moduł elastyczności  $E_U$  zaleca się przyjmowanie wartości rzędu 45–50 GPa. Jednak doświadczenia autora artykułu pokazują, że niejednokrotnie może on być niższy i wynosić jedynie 30–35 GPa [10, 15].

Naturalnie ultrawysokowartościowe fibrokompozyty cementowe mogą być stosowane również z tradycyjnym zbrojeniem żebrowanymi prętami stalowymi.

Oba materiały wykazują kompatybilność i synergię pod naprężeniami rozciągającymi [16]. W praktyce bardzo często wykorzystuje się tradycyjne zbrojenie, które współpracuje ze zbrojeniem rozproszonym w głównym kierunku naprężeń, podczas gdy w pozostałych kierunkach polega się jedynie na zbrojeniu rozproszonym – włóknach zawartych w UHPFRC. Często też stosuje się sprężenie, które może osiągać bardzo wysokie wartości za sprawą wysokiej wytrzymałości materiału na ściskanie i znikome pęcznienie dzięki upakowanej mezostrukturze macierzy.

## Konstrukcje z UHPFRC mogą konkurować z betonowymi i stalowymi pod względem finansowym, środowiskowym i architektonicznym.

### UHPFRC W NORMACH

Udane zastosowanie tego materiału wymaga od projektanta wiedzy wkraczającej w obszar materiałoznawstwa oraz świadomości, że **UHPFRC nie jest po prostu bardzo wytrzymałym na ściskanie betonem**. Jak pokazują przykłady zagraniczne, dzięki świadomości projektowej konstrukcje z UHPFRC mogą stanowić rozwiązania konkurencyjne dla betonowych lub stalowych pod względem finansowym, środowiskowym i architektonicznym.

W Polsce materiał ten nie jest powszechnie dostępny. Brakuje też świadomości wśród projektantów. Poza kilkoma wyjątkami (np. w fasadach prefabrykowa-

nych) UHPFRC nie jest u nas wykorzystywany, a już na pewno nie przy okazji konstrukcji. Pod tym względem odbiegamy od niemal wszystkich krajów europejskich a także rozwiniętych. Warto więc zapoznać się z podejściem pionierów konstrukcji UHPFRC: Francji i Szwajcarii.

### Standard szwajcarski SIA 2052

Szwajcarski standard mający status normy krajowej SIA 2052 [10] (Fibrobeton ultrawartościowy – materiały, wymiarowanie i wykonanie) został wprowadzony w 2016 r. Obecnie trwają prace nad wdrożeniem kolejnej edycji dokumentu.

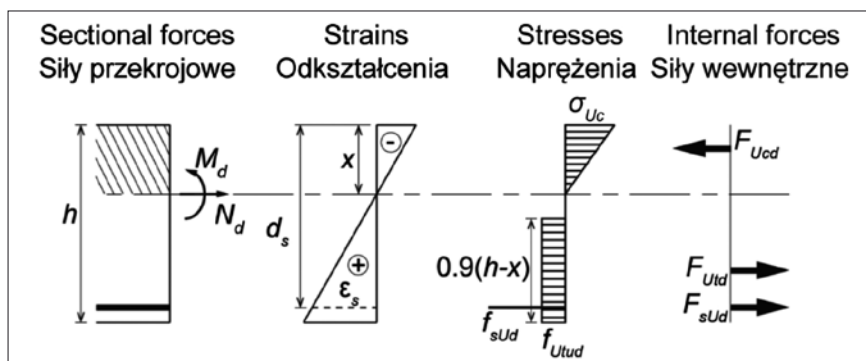
Ma on zawierać np. zaktualizowane zasady projektowania elementów na zmęczenie oraz nową metodę jakościowych i ilościowych badań nieniszczących przy użyciu pola magnetycznego, które zostały opracowane przez autora niniejszej publikacji [15, 17].

Dokument ten wprowadza i definiuje pojęcia znane w środowisku naukowym, lecz niestosowane przez praktyków, np. umacnianie i osłabianie przy odkształceniu, limit elastyczności lub inaczej: granica sprężystości przy rozciąganiu. Wyróżniono też klasy materiału, osobno pod względem wytrzymałości na rozciąganie i ściskanie.

Odpowiedź na rozciąganie klasyfikuje się odpowiednio jako:

- U0 niewykazująca utwardzania przy rozciąganiu ze średnimi wartościami  $f_{Ute} = 7,0$  MPa,  $f_{Utu} = 5,0$  MPa,  $\epsilon_{Utu} = 0,0\%$ ;
- UA wykazująca umiarkowane utwardzanie przy rozciąganiu ze średnimi wartościami  $f_{Ute} = 7,0$  MPa,  $f_{Utu} = 7,7$  MPa,  $\epsilon_{Utu} = 1,5\%$ ;
- UB wykazująca wyraźne utwardzanie przy rozciąganiu ze średnimi wartościami  $f_{Ute} = 10$  MPa,  $f_{Utu} = 12$  MPa,  $\epsilon_{Utu} = 2,0\%$ .

Odpowiedź na ściskanie charakteryzuje się, tak jak dla betonów, poprzez



Rys. 3. Uproszczony model projektowania elementu ze zbrojonego UHPFRC na zginanie wg SIA 2052

Tab. Projektowane właściwości materiałowe UHPFRC na rozciąganie w elemencie zginanym w stanie granicznym nośności, zależnie od klasy elementu i materiału wg NF P18-710

|                 |           | Klasa elementu                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|-----------------|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                 |           | cienkościenny                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | grubościenny                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Klasa materiału | T1* i T2* | <p>Diagram showing the stress-strain relationship for thin-walled UHPFRC in class T1* and T2*. The curve starts at the origin, remains at zero stress until the ultimate strain <math>\epsilon_{u,lim}</math>, then increases linearly with a slope <math>E_{cm}</math> until the ultimate strain <math>\epsilon_{u,el}</math>. The ultimate stress is <math>f_{ctfk}/(\gamma_{ct} \cdot K)</math>.</p> | <p>Diagram showing the stress-strain relationship for thick-walled UHPFRC in class T1* and T2*. The curve starts at the origin, remains at zero stress until the ultimate strain <math>\epsilon_{u,lim}</math>, then increases linearly with a slope <math>E_{cm}</math> until the ultimate strain <math>\epsilon_{u,el}</math>. The ultimate stress is <math>f_{ctfk}/(\gamma_{ct} \cdot K)</math>. The diagram also shows the ultimate strain <math>\epsilon_{u,1\%}</math> and the ultimate strain <math>\epsilon_{u,pic}</math>. The ultimate stress is <math>f_{ctfk}/(\gamma_{ct} \cdot K)</math>.</p> |
|                 | T3*       | <p>Diagram showing the stress-strain relationship for thin-walled UHPFRC in class T3*. The curve starts at the origin, remains at zero stress until the ultimate strain <math>\epsilon_{u,lim}</math>, then increases linearly with a slope <math>E_{cm}</math> until the ultimate strain <math>\epsilon_{u,el}</math>. The ultimate stress is <math>f_{ctfk}/(\gamma_{ct} \cdot K)</math>.</p>         | <p>Diagram showing the stress-strain relationship for thick-walled UHPFRC in class T3*. The curve starts at the origin, remains at zero stress until the ultimate strain <math>\epsilon_{u,lim}</math>, then increases linearly with a slope <math>E_{cm}</math> until the ultimate strain <math>\epsilon_{u,el}</math>. The ultimate stress is <math>f_{ctfk}/(\gamma_{ct} \cdot K)</math>.</p>                                                                                                                                                                                                             |

wytrzymałość kostki na ściskanie, wyróżniając klasy C120, C140, C160 i C180. Zaznacza się, że dla dwóch ostatnich klas spodziewana jest konieczność specjalnych warunków dojrzewania poprzez stosowanie gorącej pary (90°C, wilgotność względna >95%) przez 48 godzin.

Standard SIA 2052 ponadto określa podstawowe zasady analizy i wymiarowania konstrukcji. Zaleca np. stosowanie współczynnika  $\eta_{hU}$  uwzględniającego fakt, że w elementach grubszych niż 100 mm część włókien jest ułożona w kierunku normalnym do płaszczyzny elementu, przez co efektywna wytrzymałość na rozciąganie jest zmniejszona. Ponadto podane są podstawowe modele obliczeniowe wytrzymałości elementów na zginanie (omówione w szczegółach w dalszej części artykułu), ścinanie, ściskanie i zmęczenie.

Na szczególną uwagę zasługuje rozdział poświęcony konstrukcjom zespolonym łączącym (zbrojone) UHPFRC

z żelbetem. Wynika to z faktu, że Szwajcaria przoduje w stosowaniu UHPFRC na istniejących obiektach mostowych oraz stropach celem ich wzmocnienia i zabezpieczenia. Metoda ta została opracowana przez prof. Eugena Brühwiler, inicjatora stworzenia standardu SIA 2052 oraz promotora pracy doktorskiej autora niniejszego artykułu [18].

Dokument wyszczególnia także zasady konstruowania i wykonawstwa, z uwzględnieniem pomniejszych załączników i zakotwień zbrojenia w stosunku do betonu zwykłego, oraz etapowania przylegających połączy UHPFRC aplikowanych np. na płytach pomostów w celu zapewnienia ich szczelności. Załączniki przedstawiają też metody badań jakościowych i ilościowych, wskazując zwłaszcza badanie odpowiedzi na rozciąganie poprzez rozciąganie osiowe oraz zginanie płytek z analizą odwrotną. Metoda ta, w połączeniu z badaniami niszczącymi opartymi na pomiarze prze-

nikalności magnetycznej materiału, pozwala na niezwykle dokładną weryfikację lokalnych koncentracji i orientacji włókien stalowych. Przekłada się to na ogólną nośność elementu [15].

Norma ta pozostawia jednak wiele niedopowiedzeń. Jest to **typowe dla norm szwajcarskich, które stawiają na większą swobodę projektanta i wyznaczają tylko ogólne ramy zastosowań**. Co ważne, w ujęciu projektowo-wdrożeniowym SIA 2052 oraz doświadczenia praktyczne posłużyły za podstawę opracowania wytycznych projektowo-wykonawczych przez Szwajcarski Federalny Urząd Dróg (ASTRA/OFROU) [19], odpowiednik polskiej GDDKiA. Bez wątpienia tego typu dokumenty sprawiają, że wdrażanie nowoczesnych metod i materiałów przebiega szybciej.

## Norma francuska NF P18-710

Francuska norma, która ma status załącznika krajowego do Eurokodu 2,

NF P18-710 [11] (Projektowanie konstrukcji betonowych: zasady szczegółowe dla UHPFRC) oraz towarzyszące jej normy krajowe NF P18-470 (UHPFRC: wymagania, właściwości, produkcja i zgodność), a także NF P18-451 (Wykonywanie konstrukcji betonowych – zasady szczegółowe dla UHPFRC) zostały wydane w latach 2016–2018. Mogą być szczególnie istotne dla polskich projektantów, ponieważ są spójne ze zharmonizowanym europejskim systemem norm.

Francuzi są pionierami w stosowaniu UHPFRC jako materiału w pełni konstrukcyjnego – zaczęli go używać jeszcze w połowie lat 90. XX w. Pierwszą wersję krajowych zaleceń opracowano w 1997 r., a następnie – już jako międzynarodowy i wyczerpujący dokument – w 2002 r., z aktualizacją w 2013 r. Stanowi on bezpośrednią podstawę dla wspomnianych krajowych norm.

Norma materiałowa NF P18-470 wyróżnia klasyfikacje materiału na podstawie wytrzymałości na ściskanie, analogicznie do Eurokodu 2, w klasach od UHPFRC 130/145 do UHPFRC 250/265, gdzie liczby wyrażają charakterystyczną wytrzymałość na ściskanie odpowiednio dla cylindra i kostki w MPa. Klasy na rozciąganie od T1 do T3 definiowane są wprost poprzez proporcje między średnimi i charakterystycznymi wartościami limitu elastyczności oraz wytrzymałości na rozciąganie. Klasa T1 odpowiada materiałowi wykazującemu osłabienie przy odkształceniu, gdy wytrzymałość na rozciąganie nie jest wyższa niż o 20% od limitu sprężystości ( $f_{ctf}/1,25 < f_{ct,el}$ ) zarówno w ujęciu wartości średniej, jak i charakterystycznej. Klasa T2 wykazuje umiarkowane umacnianie przy odkształceniu. Klasa T3 natomiast – wyraźne umacnianie przy odkształceniu ( $f_{ctf}/1,25 > f_{ct,el}$ ) zarówno w ujęciu wartości średniej, jak i charakterystycznej. Ponadto norma ta klasyfikuje materiał pod wieloma innymi względami, takimi jak przenikanie chlorków, udurowienie czy ścieralność.

Norma wykonawcza NF P18-451 określa m.in. wymagania jakościowe, tolerancje geometryczne, szczególne za-

sady wykonawstwa czy zalecane badania dla każdej z właściwości jakościowych i ilościowych oraz szczególne zasady postępowania. Zawiera ona wiele odniesień do dobrze znanych nam norm europejskich.

Te dwie normy, wraz z EN 1992, stanowią podstawę normy NF P18-710, która rozszerza zastosowanie Eurokodu. Najważniejszą zaletą tego dokumentu jest jasne przedstawienie, w jaki sposób wyniki badań materiałowych przekładają się na założenia projektowe przy uwzględnieniu wpływu lokalnej orientacji włókien. Pozwala to na relatywnie łatwą implementację parametrów materiałowych UHPFRC przy rozciąganiu w analizach numerycznych i analitycznych. Ponadto NF P18-710 wprost podaje wymagane grubości otulin dla klas ekspozycji oraz metody uwzględniania efektów II rzędu wynikających z cienkościenności powstałych konstrukcji i elementów, co zwykle nie jest konieczne w masywnych konstrukcjach betonowych.

## W Polsce brakuje dziś „kultury UHPFRC”, a materiał ten nie jest powszechnie dostępny ani wykorzystywany w konstrukcjach.

Podstawową zaletą NF P18-710 i powiązanych norm jest ich podobieństwo do istniejących norm europejskich, a także fakt, że prowadzą projektanta za rękę od założeń i wymagań materiałowych do weryfikacji bezpieczeństwa konstrukcji. Z tego powodu **normy francuskie mogą się okazać szczególnie przydatne polskiemu projektantowi.**

### Model Code 2020

Zarówno Model Code 2010, jak i 2020 [20] definiują pojęcia osłabiania i umacniania przy rozciąganiu. Co więcej, pojęcie UHPC (Ultra High Performance Concrete) pojawia się w kontekście materiałów cementowych zbrojonych włóknami przejawiającymi umacnianie przy odkształceniu pod naprężeniami rozciągającymi. W sensie konstytutywnym

MC2020 pozwala zatem na zdefiniowanie odpowiedzi materiałowej UHPFRC, jednak ten materiał jest w nim rozważany jako szczególny przypadek fibrobetonu.

Niestety, w części dotyczącej weryfikacji i wymiarowania konstrukcji pod obciążeniem statycznym znajdziemy jedynie wzmiankę (30.1.6.6.2, MC2020 [20]), że włókna mogą być rozpatrywane jako dodatkowe pole rozciągania przy użyciu metody strut-and-tie, pod warunkiem że może wystąpić zarysowanie rozmyte (smeared cracking), co zapewne ma oznaczać rozproszone mikropęknięcia (distributed microcracks). Jednakże dopuszczalne naprężenia mają pomijać wytrzymałość macierzy, ale maksymalne naprężenia  $f_{t,ud}$  mogą zostać założone przy analizie stanu granicznego nośności. Ten skomplikowany zapis staje się jasny, jeśli spojrzymy na niego z perspektywy klasycznego fibrobetonu, zwłaszcza o stosunkowo długich włóknach zapewniających pewne naprężenia resztkowe po spękaniu i przy

dużych rozwarciach rys. Po prostu tylko te naprężenia resztkowe mogą być wzięte pod uwagę.

Analiza ta pokazuje, że chociaż Model Code 2020 otwiera furtkę dla UHPFRC w ujęciu materiałowym, to nie daje projektantowi solidnych podstaw do tego, by uwzględniać jego wytrzymałość na rozciąganie w analizie konstrukcji i elementu.

### PROJEKTOWANIE NA ZGINANIE BELKI ZE ZBROJONEGO UHPFRC

Aby zaprezentować różnice między normą szwajcarską a francuską, przedstawiono pokrótce procedurę projektowania belki wykonanej z UHPFRC i zbrojonej w głównym kierunku naprężeń prętami stalowymi żebrowanymi, obliczanej na moment zginający w stanie granicznym nośności.



Fot. 1. Przykład asymetrycznego, dwuteowego, prefabrykowanego dźwigara mostowego z UHPFRC zaprojektowanego wg SIA 2052

### Projektowanie na zginanie według SIA 2052

Zakładając klasę materiału UB, trzeba najpierw zamienić charakterystyczne wytrzymałości na projektowane przy użyciu formuły odpowiednio na rozciąganie i ściskanie:

$$f_{Utd} = \frac{\eta_t \cdot \eta_{hU} \cdot \eta_k \cdot f_{Utuk}}{\gamma_U}$$

$$f_{Ucd} = \frac{\eta_t \cdot \eta_1 \cdot f_{Uck}}{\gamma_U}$$

gdzie:

- $f_{Utd}$  i  $f_{Utuk}$  oraz  $f_{Ucd}$  i  $f_{Uck}$  to odpowiednio projektowana i charakterystyczna wytrzymałość na rozciąganie oraz ściskanie;

- $\eta_t$ ,  $\eta_{hU}$ ,  $\eta_1$  to odpowiednio współczynniki wyrażające:

- czas trwania oddziaływania (zwykle 1, a dla oddziaływania udarowego – 1,15),
- orientację włókien zależnie od grubości elementu (od 1,0 to 0,8),
- stosunkowo niską odkształcalność UHPFRC przy ścisaniu (0,85);

- $\gamma_U$  to częściowy współczynnik bezpieczeństwa identyczny przy ścisaniu oraz rozciąganiu i wynoszący 1,3.

Wartości te, wraz z wartościami materiałowymi dla prętów zbrojeniowych stalowych, mogą być zastosowane do uproszczonego modelu przedstawionego na rys. 3. Położenie osi neutralnej jest następnie wyznaczane poprzez balans sił osiowych, a w końcu obliczana jest projektowana nośność elementu na zginanie. Warto zauważyć, że przy odpowiednim doborze materiału zarówno UHPFRC, jak i stal zbrojeniowa pręta ( $f_{sUd}$ ) mogą znajdować się w tym samym czasie w stanie projektowanej wytrzymałości na rozciąganie, zapewniając optymalne wykorzystanie materiału. Ponieważ współczynnik wytrzymałości materiałowej dla UHPFRC również przy ścisaniu wynosi  $\gamma_U = 1,3$ , w praktyce rzadko kiedy wartość projektowanych naprężeń ścisających osiąga wartości graniczne – jest to naturalnie zależne od kształtu przekroju.

### Projektowanie na zginanie według NF P18-710

Norma francuska jest o wiele bardziej wyczulona na wpływ orientacji włókien w elemencie, zależnie od jego grubości. W praktyce pierwszym krokiem musi być wyznaczenie współczynnika orientacji K. Powinno to być wykonane poprzez metody laboratoryjne, gdzie dla danej geometrii i metody produkcji elementu należy pobrać serię próbek oraz porównać wyniki badania wytrzymałości z próbkami kontrolnymi. Może to sprawić, że materiał wykazujący cechy klasy T3 będzie zakwalifikowany jako materiał T2\*, gdzie \* oznacza de facto projektowaną klasę wbudowanego materiału. Jeżeli współczynnik K = 1,25, to materiały T1, T2, T3 będą rozważane dalej jako odpowiednio T1\*, T2\*, T3\*.

Następnie projektant musi zdefiniować, czy element jest cienkościenny czy grubościenny, zależnie od spełnienia wyniku nierówności  $e \leq 3 l_f$ , gdzie e oznacza grubość ściany elementu, a  $l_f$  – długość włókien.

Wtedy pozostaje wybrać odpowiedni model właściwości materiałowych, jak pokazano w tab., i zastosować do ogólnego modelu na zginanie znanego z EC2. Istotne jest, że dla cienkościennego elementu i materiału T3\* można zastosować taki sam model jak dla klasy T1\*/T2\*, uzyskując nieco uproszczony blok naprężeń rozciągających.

Co ciekawe, norma ta wyróżnia osobno częściowe współczynniki bezpieczeństwa dla UHPFRC przy rozciąganiu i ściskaniu, odpowiednio  $\gamma_{ct} = 1,3$  i  $\gamma_c = 1,5$ . Jednak kiedy używany jest tzw. premix, czyli gotowa sucha mieszanka, zgodnie z NF P18-470 i specjalną procedurą zachowania jakości, współczynnik  $\gamma_c$  może być obniżony do 1,3, tak jak domyślnie w SIA 2052. Gdy stosowana jest obróbka cieplna (dojrzwianie przy działaniu pary), współczynniki muszą zostać podwyższone.

## PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Celem tego artykułu było uwidocznienie, jak ważne jest przededefiniowanie słownika i warsztatu projektowego, aby w pełni wykorzystać potencjał ultrawysokowartościowych fibrokompozytów cementowych, potocznie zwanych UHPFRC, a zwłaszcza ich wytrzymałość na rozciąganie (patrz fot. 1). Mimo że **to Polak, prof. Janusz Kasperkiewicz jest uznawany za ojca określenia strain-hardening (umacnianie przy odkształceniu) w odniesieniu do fibrokompozytów cementowych** [21], w Polsce brakuje dziś „kultury UHPFRC”.

W artykule skupiono się na znaczeniu mikro- i mezostruktury materiału dla odpowiedzi na rozciąganie przy zginaniu, ponieważ jest to kluczowa różnica między projektowaniem elementów betonowych i UHPFRC. Jednak konkurencyjność konstrukcji wykonanych z tego ostatniego wynika nie z wymiany części prętów zbrojenia na zbrojenie rozproszone, lecz przede wszystkim ze zmniejszenia masy elementu przy zachowaniu nośności w porównaniu z betonem zbrojonym oraz z trwałości przewyższającej trwałość betonu o co najmniej rząd wielkości. Dopiero dokładne i całościowe zrozumienie tych zagadnień wprowadzi UHPFRC, obok stali

i żelbetu, do portfolio projektantów oraz sprawi, że w Polsce powstanie zapotrzebowanie na tego typu projekty.

Aby tak się stało, konieczna jest także ogólnoakceptowalna podbudowa normowa – przy braku zasad ogólnych w Eurokodach i Model Code 2020. Może to być rozwiązane metodą francuską, tj. jako aneks krajowy i normy towarzyszące do EN 1992, lub szwajcarską, gdzie proste zalecenia przekładane są później na bardziej formalny język, tak jak w przypadku SIA 2052 oraz wytycznych zarządcy dróg krajowych oraz autostrad. ■

## Literatura

- [1] Jasiczak J., Wdowska A., Rudnicki T., *Betony ultrawysokowartościowe: właściwości, technologie, zastosowania*. Kraków: Stowarzyszenie Producentów Cementu, 2008.
- [2] Grzeszczyk S., „Betony nowej generacji z proszków reaktywnych” w *Bulletin of the Military University of Technology*, t. 64, nr 3/ 2015, s. 103–111, doi: 10.5604/12345865.1168727.
- [3] Denisiewicz A., „Betony z proszków reaktywnych i ich zastosowanie w konstrukcjach zespolonych” w *Przegląd Budowlany*, t. 85, nr 11/ 2014, s. 18–23.
- [4] Sawicki B., Jaworska B., „O zastosowaniu kompozytów fibrocementowych w budownictwie” w *Inżynieria i Budownictwo*, t. 77, 2021.
- [5] Naaman A.E., *Fiber Reinforced Cement and Concrete Composites*, wyd. I. Sarasota, Florida: Techno Press 3000, 2018.
- [6] Denarié E., Sofia L., Gonon P., „Towards tailored cement-based materials with ground calcium carbonates” w *Proceedings of the International Conference on Cement – Based Materials Tailored for a Sustainable Future*, 6.2021 [dostęp 16.11.2025], <https://infoscience.epfl.ch/handle/20.500.14299/174104>.
- [7] Hajiesmaeli A., Denarié E., „Next Generation UHPFRC for Sustainable Structural Applications” w: SP, t. 326, 8.2018, s. 58.1–58.10.
- [8] Bastien-Masse M., Denarié E., Brühwiler E., „Effect of fiber orientation on the in-plane tensile response of UHPFRC reinforcement layers” w *Cement and Concrete Composites*, t. 67, 3.2016, s. 111–125, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2016.01.001.
- [9] Sawicki B. i in., „Detection and Measurement of Matrix Discontinuities in UHPFRC by Means of Distributed Fiber Optics Sensing” w *Sensors*, t. 20, nr 14/2020, doi: 10.3390/s20143883.
- [10] SIA 2052:2016-03. UHPFRC – Materials, design and construction w: *Technical Leaflet SIA 2052*, Swiss Society of Engineers and Architects, Zurich, 2017.
- [11] NF P 18-710, National addition to Eurocode 2 – design of concrete structures: specific rules for Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete (UHPFRC), NF P 18-170, 2016.
- [12] Charron J.-P., Denarié E., Brühwiler E., „Transport properties of water and glycol in an ultra high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC) under high tensile deformation” w *Cement and Concrete Research*, t. 38, nr 5/2008, s. 689–698, doi: 10.1016/j.cemconres.2007.12.006.
- [13] Hajiesmaeli A., Denarié E., „Capillary flow in UHPFRC with synthetic fibers, under high tensile stresses” in *Cement and Concrete Research*, t. 143, 05.2021, s. 106368, doi: 10.1016/j.cemconres.2021.106368.
- [14] Brühwiler E., Structural UHPFRC: „Welcome to the post-concrete era!”, w *International Interactive Symposium on Ultra-High Performance Concrete*, Des Moines, Iowa, USA: Iowa State University Digital Press, 2016, doi: 10.21838/uhpc.2016.key.
- [15] Sawicki B., Brühwiler E., Denarié E., „Inverse Analysis of R-UHPFRC Beams to Determine the Flexural Response under Service Loading and at Ultimate Resistance” w *Journal of Structural Engineering*, t. 148, nr 2/2022, s. 04021260, doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0003239.
- [16] Oesterlee C., Brühwiler E., Denarié E., „Structural Behaviour of Composite Elements Combining Reinforced Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete (UHPFRC) and Reinforced Concrete”, presented at the 7th fib PhD Symposium, Stuttgart, Germany, 10/2008.
- [17] Sawicki B., Brühwiler E., „Fatigue resistance of reinforced UHPFRC beams” w *International Journal of Fatigue*, t. 148, 7.2021, s. 106216, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2021.106216.
- [18] Sawicki B., „Fatigue of reinforced UHPFRC members and monitoring of fatigue action effects on bridges”, Lausanne, 2021 [dostęp: 15.12.2025], EPFL Infoscience: <https://doi.org/10.5075/epfl-thesis-8564>.
- [19] Office fédéral des routes (OFROU), *CFUP pour la maintenance et la construction d'ouvrages d'art de l'infrastructure routière*, ASTRA nr 82022, Berno, 2023.
- [20] International Federation for Structural Concrete (fib), *fib Model Code for Concrete Structures 2020*, wyd. 1. Lausanne: International Federation for Structural Concrete (fib), 2023.
- [21] Naaman A.E., „Fiber reinforced concrete: five decades of progress” w *Proceedings of the 4th Brazilian Conference on Composite Materials*. Rio de Janeiro: Pontificia Universidade Católica, 2018, s. 35–56, doi: 10.21452/bccm4.2018.02.01.
- [22] Li V.C., „Introduction to Engineered Cementitious Composites (ECC)” w *Engineered Cementitious Composites (ECC): Bendable Concrete for Sustainable and Resilient Infrastructure*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2019, s. 1–10, doi: 10.1007/978-3-662-58438-5\_1.
- [23] Sawicki B., Brühwiler E., „Experimental and Analytical Investigation of Deflection of R-UHPFRC Beams Subjected to Loading –Unloading” w *International Journal of Concrete Structures and Materials*, t. 18, nr 1/2024, s. 6, doi: 10.1186/s40069-023-00636-x.