

# TLAČENÉ PRVKY ZESÍLENÉ POMOCÍ UHPC

Lukáš Boháček, \*

Katedra betonových a zděných konstrukcí, Fakulta stavební,  
České vysoké učení technické v Praze, Thákurova 7/2077, 166 29 Praha 6, Česká republika.  
Lukas.bohacek@fsv.cvut.cz

## ABSTRAKT

Rekonstrukce a zesilování staveb je v dnešní době stále aktuálnější trend. Jedním ze způsobů porušení konstrukcí je dosažení únosnosti v tlaku. V tomto článku je popsáno ověřování zesílených tlačených prvků pomocí dobetonávky z UHPC po obvodě prvku. Toto zesílení bylo prověřeno na krátkodobých experimentech pro zjištění únosnosti vzorků.

Pro experimenty byly použity sloupky z běžného betonu, po jejichž obvodě byla nabetonována vrstva 3 cm UHPC. Byly použity dva různé poměry ploch běžného betonu a UHPC a také byly použity dva druhy běžného betonu. Původní beton měl stáří přibližně 10 let. Experimenty bylo ověřeno, že takové zesílení je možné použít.

Výsledky experimentů byly také porovnány se zjednodušenými teoretickými výpočty pro ověření chování prvků.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Beton • UHPC • UHPFRC • Pokus • Tlak

## ABSTRACT

Reconstruction and strengthening of structures is a growing trend nowadays. In this paper, the verification of strengthened compressed elements is described. The elements were strengthened by using a jacketing made of UHPC. This strengthening was verified in short-term tests aiming to determine the load bearing capacity of the specimens.

For the experiments, ordinary concrete columns were used strengthened by jacketing with the UHPC of the thickness of 3 cm. Two different sections of ordinary concrete and UHPC were used and also two types of ordinary concrete were used. The original concrete was approximately 10 years old. It was verified by experiments that such strengthening is applicable.

The experimental results were also compared with simplified theoretical calculations to verify the behaviour of the elements.

## KEYWORDS

Concrete • UHPC • UHPFRC • Experiment • Compression

## 1. ÚVOD

Porušení v tlaku je jedním ze základních možných způsobů porušení prvku v konstrukci (ať už se jedná o sloup v pozemní stavbě, či mostní pilíř). Často je také právě toto porušení rozhodující.

V předešlých článcích o zesilování pomocí UHPC (Vítek et al. 2020, Vítek et al. 2022) byly prezentovány možnosti zesílení UHPC proti ohybovému namáhání a protlačení. Tato zesílení byla příkladem přibetonování vrstvy UHPC na stávající stropní desku, či mostovku. Zesílení vodorovných prvků ale většinou znamená přetížení svislých nosných prvků – zdí, sloupů, či pilířů. I když při použití UHPC je možné použít menší množství materiálu a přetížení není tak velké, jako kdyby byl použit běžný beton, stále může dojít k tomu, že svislý prvek bude rozhodující pro únosnost konstrukce jako celku. Svislé prvky však mohou být rozhodující pro únosnost i v případě změny užitého zatížení (např. změna využití prostoru), či stálého zatížení (např. přístavění patra budovy) bez zesílení vodorovných prvků.

Jedním ze způsobů zesílení sloupů je právě použití UHPC. Toto je možné provést např. obetonováním tenkou vrstvou UHPC, v případě potřeby i ve větší vrstvě s použitím betonářské výztuže. Díky své vysoké pevnosti v tlaku se UHPC jeví jako vhodný materiál na zesílení tlačených prvků. Proto byly provedeny experimenty na zkušebních sloupcích z běžného betonu, které byly po obvodu obetonovány, vzhledem k jejich malým rozměrům, pouze 30 mm UHPC.

## 2. KRÁTKODOBÉ ZKOUŠKY TLAKOVÉ ÚNOSNOSTI

### 2.1. Příprava experimentů

Pro experimenty byly použity dva druhy vzorků o různém poměru ploch běžného betonu a UHPC. Zároveň byly použity dva druhy betonu pro porovnání spolupůsobení UHPC s běžným betonem. Vzorky původního betonu byly získány vyříznutím z panelů z ohybových experimentů a poté byly obetonovány vrstvou 30 mm UHPC po obvodě.

První typ vzorku (čtvercové) měl rozměry původního betonu 120x120 mm, s obetonováním UHPC tedy 180x180 mm. Průměrná válcová tlaková pevnost původního betonu byla

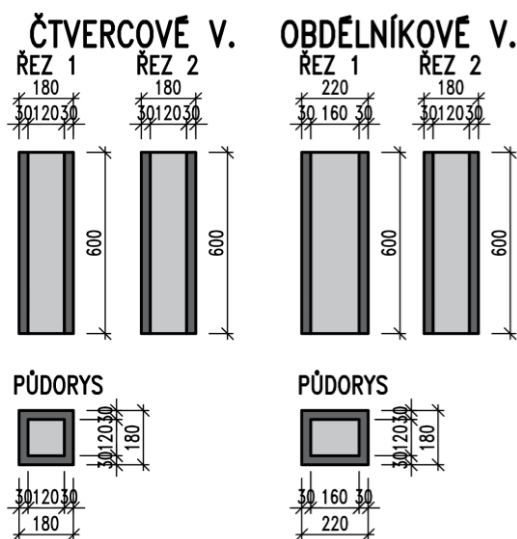
\* Školitel: prof. Ing. Jan L. Vítek, CSc., FEng

32.3 MPa. Druhý typ vzorku (obdélníkové) měl rozměry původního betonu 120x160 mm, s obetonávkou UHPC tedy 180x220 mm. Výsledné poměry ploch původní beton:UHPC byly 1:1.25 pro čtvercové vzorky a 1:1.06 pro obdélníkové vzorky. V obou typech vzorků je tedy více UHPC. Průměrná válcová pevnost původního betonu pro obdélníkové vzorky byla 65.8 MPa. Průměrná válcová pevnost UHPC byla 156.5 MPa.

UHPC kolem sloupků bylo betonováno ve svislé poloze. Původní sloupky nebyly určeny pro zatížení v tlaku, výztuž tedy neodpovídá vyztužení běžného tlačného prvku. V některých případech byla výztuž přidána do vrstvy UHPC.

Prvky byly po betonáži UHPC zaříznuté na koncích, aby bylo dosaženo co nejrovnějšího povrchu, což je důležitá podmínka pro zjišťování tlakové únosnosti. Délky vzorků po zaříznutí byly cca 600 mm. Celkové schéma vzorků je zřejmé z Obrázku 1.

Zkoušky byly provedeny na standardním zařízení pro provádění experimentů v tlaku. Průběh zkoušky měl dvě části – první bylo zatížení vzorku na hodnotu 1000 kN pro dotlačení veškerých součástí a vzorku (tato část byla řízena silou), poté byl provádění experiment až do dosažení únosnosti. Druhá část experimentu byla řízena již deformací.



Obrázek 1: Schéma vzorků

Některé vzorky byly ve vrstvě UHPC vyztuženy betonářskou výztuží složenou z třmínek a podélných prutů. Průměr výztuže byl 5 mm v obou případech. Třmínky měly rozteč 80 mm a podélná výztuž zahrnovala jeden prut v každém rohu.

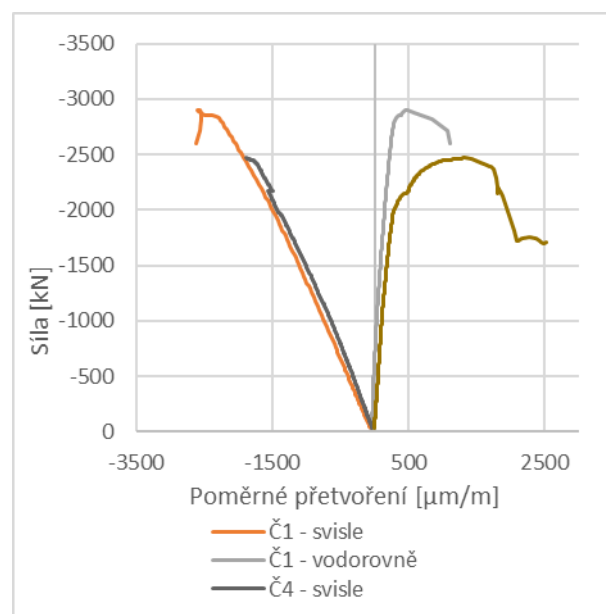
V průběhu výroby byly na vzorky umístěny tenzometry pro měření poměrného přetvoření. U všech vzorků byly použity dvě dvojice tenzometrů na dvou protilehlých stěnách – z každé dvojice byl vždy jeden tenzometr na měření svislého přetvoření a druhý na měření vodorovného přetvoření.



Obrázek 2: Uspořádání experimentu

## 2.2. Průběh a výsledky experimentů

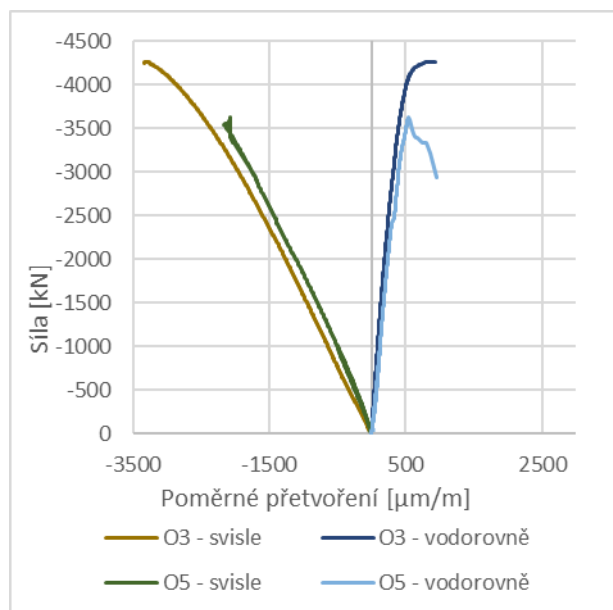
Na Obrázku 2 je fotografie z laboratoře. V průběhu experimentů byla měřena síla v lisu a také vodorovné a svislé přetvoření v přípevných tenzometrech. Na obrázcích 3 a 4 jsou zobrazeny průběhy zkoušek dvojic vzorků, vždy jeden s výztuží a druhý bez. Zobrazena je vždy jen větev řízená deformací, tedy až do dosažení únosnosti. Na obrázku 3 jsou čtvercové vzorky, a to Č1 (nevyztužený) a Č4 (s bet. výztuží). Na svislém poměrném přetvoření (graf vlevo) je zřejmé, že tuhost v pružné části je u obou vzorků velmi podobná. Velká podobnost platí i pro vodorovná přetvoření (pravá část grafu). Z obrázku je také zřejmé, že výsledná únosnost vyztuženého vzorku je nižší (cca 2500 kN), než u vzorku nevyztuženého (cca 2900 kN). Tento trend se projevil i u zbylých vzorků a bylo to důsledkem nedokonalé betonáže. Ukázalo se totiž, že kolem betonářské výztuže nebyl dostatečný prostor pro UHPC a nedošlo k dostatečnému probetonování. Tento problém tedy snížil únosnost u vzorků s betonářskou výztuží.



Obrázek 3: Průběh zkoušky – vzorky Č1 a Č4

U obdélníkových vzorků bylo porovnání velmi podobné. Svislé i vodorovné přetvoření se u vyztužených a nevyztužených prvků velmi podobalo. Výsledná únosnost vyztuženého

vzorku, (cca 3500 kN), byla menší než u nevyztuženého vzorku (cca 4200 kN).



Obrázek 4: Průběh zkoušky – Vzorky O1 a O5

Číselně jsou veškeré výsledky shrnuty v tabulce 1. Z tabulky je zřejmé, že vzorky s výztuží měly menší průměrnou únosnost než prvky bez výztuže. Je však ale nutné podotknout, že u některých jednotlivých prvků to neplatilo. Například vzorky O4 a O5 (vyztužené) mají větší únosnost, než vzorky O2 a O3 (nevyztužené). Zároveň je vidět, že výsledky jsou relativně konzistentní, variační koeficient je 6-9 %.

Tabulka 1: Číselné výsledky experimentů

Vzorek	$F_{max}$ [kN]	prům. $F_{max}$ [kN]	Var. koef. [%]
Č1	2904.9		
Č2	2774.2		
Č3	3187.6	2901.6	6.1
Č6	2739.7		
Č4	2467.1	-	-
O1	4204.1		
O2	3524.8		
O3	4262.9	3887.2	8.9
O7	3557.1		
O4	3930.8		
O5	3624.6	3603.1	7.7
O6	3253.9		

Z experimentů byly navíc získány tuhosti, respektive tzv. ideální moduly pružnosti. S ohledem na komplikace s probetonováním byly na tyto výpočty použity pouze vzorky bez výztuže, jelikož vzorky s výztuží nebyly s ohledem na kompli-

kace při provádění reprezentativní. Z průběhu zkoušek (záznam sil a přetvoření) byly získány ideální průměrné moduly pružnosti 44.4 GPa pro čtvercové vzorky a 42.7 GPa pro obdélníkové vzorky.

Jedním z výsledků experimentů je také způsob poškození vzorků. Na obrázku 5 jsou fotografie vzorků po provedení experimentů. Zkouška nebyla ukončena okamžitě po dosažení únosnosti vzorku, tudíž poškození jsou výraznější. UHPC, kromě své pevnosti v tlaku, působí také jako ovinutí původního betonu. Porušení většinou nastalo vytvořením svislé trhliny (po dosažení tahové pevnosti UHPC) a pak následoval vznik dalších, i vodorovných trhlin. U vzorku O4 (vlevo) je zřejmá jedna hlavní vodorovná trhlina na pravé stěně. Tato trhlina je právě v místě třmínku betonářské výztuže. Na pravé části obrázku je vzorek O3, tedy obdélníkový vzorek bez výztuže. Na tomto vzorku je vidět, že převažují svislé a šikmé trhliny sklonem. Další poškození je viditelné na pravé straně u dolního kraje.



Obrázek 5: Porovnání poškození vzorků – vzorek s výztuží (vlevo) a vzorek bez výztuže (vpravo)

### 2.3. Výpočetní analýza

Pro lepší vzhled do výsledku byly provedeny výpočty modulu pružnosti a teoretické únosnosti vzorku pro porovnání s výsledky experimentu.

#### 2.3.1. Modul pružnosti

Při výpočtu bylo vždy uvažováno se shodným stlačením původního betonu i UHPC, což je prakticky jediná možnost chování při tomto experimentu.

Pro výpočet náhradního modulu pružnosti byly použity průměrné hodnoty modulů pružnosti získané z dřívějších experimentů a plochy jednotlivých materiálů (standardní beton a UHPC). Modul pružnosti UHPC je dle zkoušek 51.2 GPa a modul pružnosti původního betonu pro čtvercové vzorky byl uvažován 33.0 GPa (tento modul pružnosti nebyl ověřován a byl použit modul pružnosti dle Model Code 2010) a pro obdélníkové vzorky 35.6 GPa.

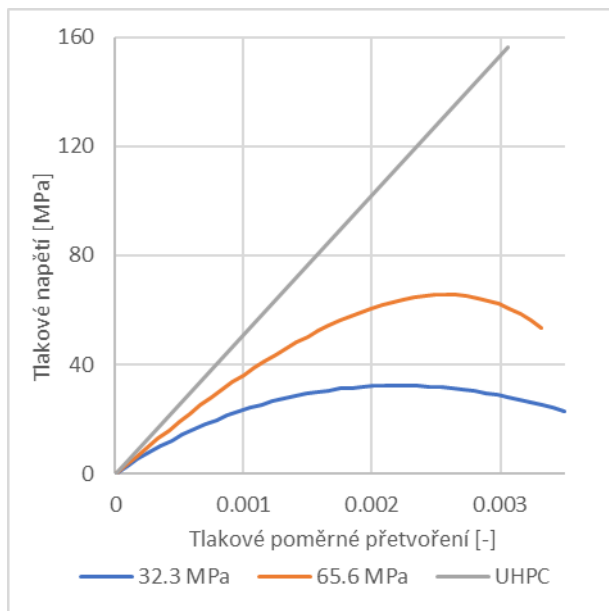
Výpočtem byly získány ideální moduly pružnosti vzorků, a to 43.1 GPa pro čtvercové vzorky a 43.6 GPa pro obdélníkové. V porovnání s experimenty je tedy zřejmé, že u čtvercových vzorků je vypočtený modul pružnosti menší, než experimentálně získaný (44.4 GPa dle experimentů), a naopak u obdélníkových vzorků je vypočtený modul pružnosti větší (42.7 GPa dle experimentů). Zjištěné rozdíly jsou minimální, což potvrzuje že prvky působí dle předpokladů i takto elementárních výpočtů.

### 2.3.2. Tlakové pevnosti

Podobně jako moduly pružnosti byly vypočítány i teoretické únosnosti vzorků v tlaku. V tomto případě ale nemohl být použitý jednoduchý součet dílčích pevností.

V grafu na Obrázku 6 jsou pracovní diagramy obou standardních betonů (dle Model Code 2010) a UHPC (Coufal et al. 2022). Z grafů je zřejmé, že maximální hodnoty napětí jednotlivých materiálů nenastávají při stejném přetvoření, tudíž není možné provést prostý součet maximálních napětí v materiálech. Z tohoto důvodu byly provedeny výpočty, kde jsou počítána napětí na základě poměrného přetvoření dle pracovních diagramů na Obrázku 6.

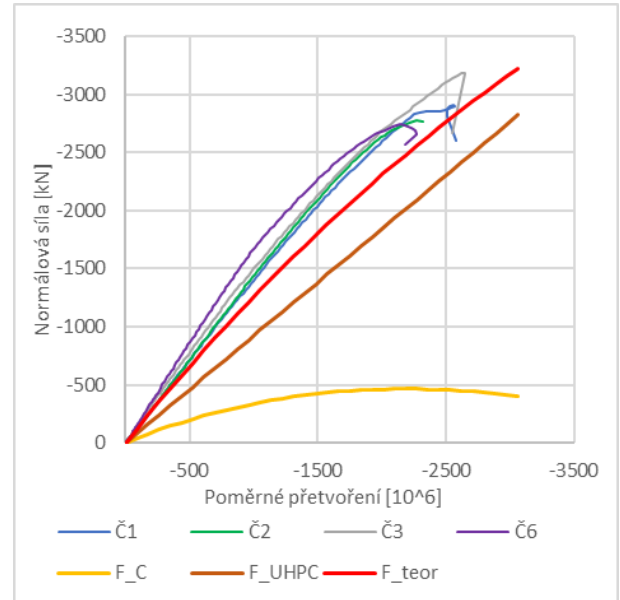
Na Obrázku 7 je výpočet síly ve čtvercovém vzorku na základě napětí a plochy jednotlivých částí ( $F_C$  je síla v běžném betonu,  $F_{UHPC}$  je síla v obetonávce UHPC a  $F_{teor}$  je celková teoretická síla ve vzorku). Zároveň jsou zde zobrazeny průběhy zkoušek jednotlivých čtvercových vzorků (bez výztuže) pro porovnání. Stejný výpočet byl proveden pro obdélníkové vzorky. Výsledek je na Obrázku 8.



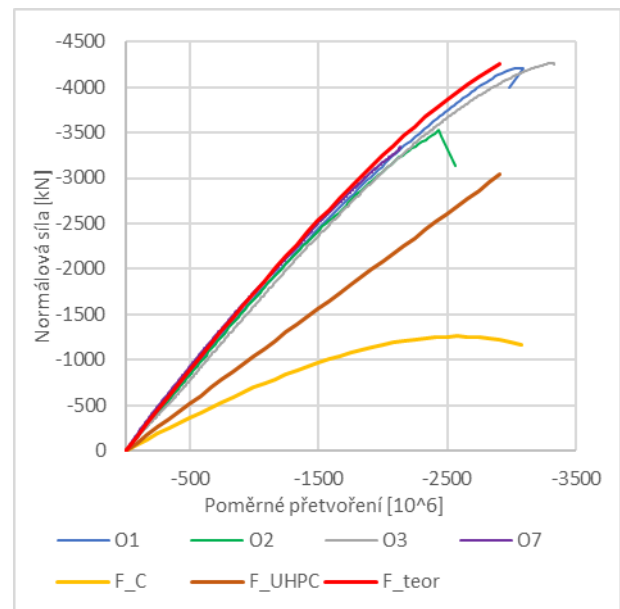
Obrázek 6: Pracovní diagramy použitých betonů a UHPC

Z výpočtu se ukázalo, že teoretická maximální únosnost čtvercových vzorků je 3226 kN. Z této únosnosti připadá 87.5 % UHPC a zbylých 12.5 % je původní beton. To znamená, že experimentálně zjištěná průměrná únosnost je o 10 % nižší, než vypočtená. Zároveň je z Obrázku 7 zřejmé, že maximální síly bylo dosaženo při menším přetvoření, než dle výpočtů.

U obdélníkových vzorků (Obrázek 8) je teoretická únosnost 4375 kN. Z této únosnosti připadá 27 % původnímu betonu a zbylých 73 % UHPC. Z experimentálních výsledků tedy vyplývá, že průměrná únosnost je o 11 % menší, než vypočtená. Porovnání u čtvercových a obdélníkových vzorků je tedy velmi podobné.



Obrázek 7: Porovnání výpočtu a experimentů – čtvercové vzorky



Obrázek 8: Porovnání výpočtu a experimentů – obdélníkové vzorky

### 2.3.3. Diskuse výsledků

Experimentální výsledky, ať už z hlediska modulů pružnosti či pevnosti, dosahovaly velmi podobných hodnot v porovnání s teoretickými výpočty.

Experimentálně zjištěné únosnosti byly průměrně o 10 % a 11 % nižší, než vypočtené hodnoty. Jedním z důvodů dosažení nižší únosnosti může být štíhlost vzorků. Experimenty pro zjištění válcové pevnosti v tlaku se dělají na vzorcích, jejichž poměr délky k půdorysnému rozměru je menší, než běžně byl použit u těchto experimentů. Vyšší štíhlost poté snižuje únosnost. Dalším faktorem je excentricita zatížení, resp. namáhání. I přes veškerou snahu pro snížení všech excentricit je prakticky nemožné tohoto dosáhnout. Na obrázku 5 vpravo je například zřejmé drčení betonu u spodní hrany, které je způsobeno právě nerovností v uložení. Navíc, při bližším zkoumání se ukázalo, že původní beton nebyl vždy úplně symetricky umístěn v UHPC. To je právě jeden z důvodů excentrického chování, který ve vzorky vyvozuje ohybový moment a snižuje celkovou únosnost v tlaku.

Z hlediska porušení (Obrázek 5) je zřejmý rozdíl ve způsobech porušení. V levé části obrázku je vyztužený vzorek s významnou vodorovnou trhlinou. Při bližším zkoumání se ukázalo, že právě v tomto místě je prut betonářské výztuže. K tomuto poškození došlo, jelikož kolem výztuže byla dutina a došlo k odlomení. Šlo o chybné vybetonování, nejedná se tedy o reprezentativní vzorek všech experimentů. Situace u vzorku bez výztuže (vpravo) je rozdílná. Zde je vidět poškození vzorku zejména typickými svislými a šikmými trhlinami. Tyto trhliny vznikly příčnými deformacemi v původním betonu, ale i UHPC. K porušení tedy došlo, jako obvykle u zkoušky v tlaku, dosažením tahové pevnosti v příčném směru. Dále je nutné si uvědomit, že díky výztužným vláknům v UHPC je pevnost v tahu tohoto materiálu vyšší. Nicméně, v tomto případě menší množství UHPC muselo zachytit i příčné tahy v původním betonu poté, co byla překročena pevnost v tahu v původním betonu.

Z hlediska tuhosti obdélníkových vzorků se výpočet modulu pružnosti poměrně dobře shodoval s výsledky experimentů. U čtvercových vzorků byl rozdíl významnější, kdy vypočtená tuhost byla nižší než experimentálně získaná. U těchto vzorků prozatím nebyl ověřen modul pružnosti původního betonu, tudíž byla uvažována normová hodnota. Dá se tedy předpokládat, že skutečná hodnota by byla o něco vyšší a výsledky by si také poměrně dobře odpovídaly. Při zpětném dopočítání vychází hodnota modulu pružnosti běžného betonu pro čtvercové vzorky cca 36 GPa.

### 3. ZÁVĚR

Experimenty bylo ověřeno, že zesílení tlačných prvků pomocí UHPC je jedním z možných způsobů zesílení. Únosnost prvků byla významně posílena a jednoduchými výpočty bylo ověřeno, že zkoušky poměrně odpovídaly předpokladům. Celková únosnost byla velmi blízká teoretickým hodnotám a porušení betonu odpovídalo tomu, že došlo k porušení UHPC jako ovinutí betonu.

Při reálném použití je však většinou nutné prověřit interakci normálové síly a ohybového momentu. I s ohledem na předešlé experimenty se dá předpokládat, že je při takové analýze možno vycházet z pracovních diagramů jednotlivých materiálů. Dalším aspektem je použití pro zesílené prvky. Obvykle totiž není možné plně odtížit nosné prvky a je tedy nutné pracovat se stávajícím napětím a přetvořením v materiálu.

Co se týče použití betonářské výztuže v obetonávce, ukázalo se, že v realizovaných experimentech bylo kolem výztuže málo prostoru. Důvodem byl malý rozměr vzorků. Ten byl nutný s ohledem na kapacity zkušebních zařízení. Jelikož v UHPC je poměrně malé kamenivo, rozhodující pro minimální prostor budou výztužná vlákna. Je tedy doporučeno, aby byl okolo výztuže prostor vždy minimálně 1.5 délky vlákna.

Z hlediska tlačných prvků je také důležitý vliv dotvarování. V rámci projektu byl sledován i tento jev, kdy byla měřena deformace dlouhodobě zatížených prvků. Vyhodnocení tohoto sledování bude předmětem dalších článků.

### PODĚKOVÁNÍ

Experimenty a vyhodnocení byly provedeny za podpory Ministerstva průmyslu a obchodu v rámci projektu ev. č. FV20472 „Aplikace vysokohodnotných cementových kompozitů na rekonstrukce betonových staveb. Zkušební vzorky byly vyrobeny za spolupráce společnosti Metrostav a.s. a TBG Metrostav s.r.o. Experimenty byly provedeny v Kloknerově ústavu ČVUT.

### Reference

- Vítek, J.L. et al., 2020. Zesilování betonových konstrukcí pomocí UHPC – Experimentální ověřování. In *Sborník 27. Betonářské dny (2020)*. Praha, pp. 231-239.
- Vítek, J. et al., 2022. Zesilování betonových konstrukcí pomocí UHPC. In *28. Betonářské dny (2022)*. Praha, pp. 159-166.
- Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. (2011), *ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*, Praha.
- FIB Fédération Internationale du Béton. (2013), *fib Model Code for Concrete Structures 2010*. Berlin: Ernst & Sohn.
- Coufal, R., Kalný, M., Kolísko, J. & Vítek, J. (2022), *Technická pravidla ČBS 07: Ultravysokohodnotný beton (UHPC)*