

**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA STAVEBNÍ**

**EXPERIMENTÁLNÍ CENTRUM**



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**KOMPOZITNÍ SLOUP ZE SKOŘEPINY  
Z UHPC A VÝPLŇOVÉHO BETONU**

**2023**

**VĚRA HORÁKOVÁ**

**VEDOUCÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE:  
DOC. ING. BC. RADOSLAV SOVJÁK,  
PH.D., LL.M.**

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Horáková	Jméno: Věra	Osobní číslo: 494994
Zadávající katedra: Experimentální centrum		
Studijní program: SI		
Stud. obor/spec.: Příprava, realizace a provoz staveb		

### II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Kompozitní sloup ze skořepiny z UHPC a výplňového betonu	
Název bakalářské práce anglicky: Composite column consisting of UHPC shell and filling concrete	
Pokyny pro vypracování: <ol style="list-style-type: none"><li>1) Rešerše na téma UHPC, spolupůsobení s konvenčním betonem, vzpěr</li><li>2) Popis experimentu</li><li>3) Predikce chování sloupu (model / výpočet)</li><li>4) Vyhodnocení experimentu</li></ol>	
Seznam doporučené literatury: <ol style="list-style-type: none"><li>1) Aitcin, Pierre-Claude. Vysokohodnotný beton</li><li>2) TP ČBS 07: Ultra vysokohodnotný beton (UHPC)</li><li>3) Vědecké články týkající se problematiky</li></ol>	
Jméno vedoucího bakalářské práce: Radoslav Sovják	
Datum zadání bakalářské práce: 15.02.2023	Termín odevzdání BP v IS KOS: 22.05.2023 <i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>
Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

*Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutně uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.*

Datum převzetí zadání	Podpis studenta(ky)
-----------------------	---------------------

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem předkládanou bakalářskou práci vypracovala samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

V Praze ...datum .....

Věra Horáková



## **PODĚKOVÁNÍ**

Ráda bych poděkovala svému vedoucímu bakalářské práce Radoslavu Sovjákovi a Pavlu Horákovi za cenné rady při zpracování této práce. Experiment byl financován z grantu CK02000047 - Optimalizace výstavby a trvanlivosti mostů, s využitím nového kompozitního řešení pro aplikaci UHPC a běžných betonů, mineralizovaných příměsí a druhotných materiálů, soutěže: 2.VS DOPRAVA 2020.



## **ANOTACE**

Tato práce se zabývá materiálem UHPC a jeho aplikací. V dnešní době je využívání takové směsi hojně aplikováno na mosty a lávky i v České republice. V této práci je nejdříve rozebírán materiál UHPC spolu s historií a jeho využitím. Je probrána problematika tlačeného kompozitního sloupu ze skořepiny z UHPC a výplně z betonu běžných pevností a je analyzováno chování takového prvku. Dále se práce zaměřuje na popis a vyhodnocení experimentu, kde je UHPC použito jako obálka sloupu z běžného betonu a je zkoumána maximální tlaková síla, kterou je tento prvek schopen přenést.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

UHPC, beton, cementový kompozit, tlaková pevnost, prostý tlak, vzpěr





## **ABSTRACT**

This paper deals with the UHPC and its applications. Nowadays, the use of such mixture is widely applied on bridges and footbridges even in the Czech Republic. In this thesis, history and application of UHPC are discussed first. The problem of a compressed composite column made of UHPC shell and filling normal strength concrete is discussed and the behaviour of such an element is analysed. Furthermore, the thesis focuses on the description and evaluation of an experiment where UHPC is used as a shell in the composite column and the maximum load that this element is able to bear was measured.

## **KEYWORDS**

UHPC, concrete, cement composite, compressive strength, simple compression, buckling



# OBSAH

1	Úvod.....	13
2	UHPC .....	14
2.1	Historie betonu a UHPC .....	15
2.2	Porovnání ceny s běžným betonem.....	16
2.3	Výroba směsi.....	17
2.4	Betonáž a ošetřování .....	17
2.5	Kontrolní zkoušky.....	18
2.5.1	Zkouška rozlíváním Abramsovým kuželem .....	18
2.5.2	Zkouška sednutí kužele .....	18
2.5.3	Zkouška rozlívání přes J-ring.....	19
2.5.4	Test pevnosti v tlaku .....	19
2.5.5	Test pevnosti v tahu za ohybu .....	20
2.5.6	Test v prostém tahu .....	20
2.5.7	Test trvanlivosti.....	21
2.5.8	Test na vodopropustnost.....	21
2.5.9	Metoda nedestruktivního ultrazvukového zkoušení.....	22
2.6	Konstrukce z UHPC.....	23
2.6.1	Česká republika .....	23
2.6.2	Využití UHPC ve světě .....	25
3	Spolupůsobení konvenčního betonu běžných pevností a UHPC .....	29
4	Tlačené štíhlé prvky .....	33
5	Experimentální program.....	35
5.1	Motivace.....	35
5.2	Materiálové charakteristiky.....	36
5.3	Výztuž sloupu .....	38
5.4	Zatěžovací stavy.....	40
5.4.1	Manipulace se skořepinou .....	40
5.4.2	Namáhání skořepiny při betonáži výplně.....	40
5.4.3	Odhad vzpěrné únosnosti sloupu.....	46
5.4.4	Odhad tlakové únosnosti .....	48
5.5	Výroba sloupu .....	48
5.6	Zatěžování.....	50

5.7 Experimentální výsledky.....	51
6 Závěr .....	52
Seznam literatury .....	53

# 1 Úvod

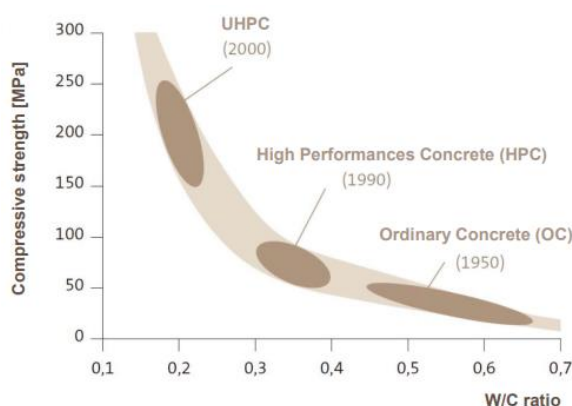
UHPC je cementový kompozitní materiál s optimalizovaným podílem jednotlivých složek s poměrem vody k cementovým materiálům menším než 0,25 [1]. Často bývá také vyztužen rozptýlenými vlákny, čímž se výrazně zlepšují tahové vlastnosti a duktilita. Technická pravidla ČBS 07 uvádí, že ultra vysokopevnostní beton (UHPC) by měl disponovat charakteristickou válcovou pevností v tlaku ( $f_{ck}$ ) přesahující 110 MPa. [2]. Ultra-vysokohodnotný beton má nespojitou strukturu pórů, která snižuje pronikání kapaliny, což výrazně zvyšuje trvanlivost ve srovnání s běžnými a vysoce pevnými betony.

Cílem práce je popsat vlastnosti UHPC a porovnat ho s železobetonem a zaměřit se na spolupůsobení mezi sebou. Dále uvést příklady aplikace UHPC na konstrukcích jak v zahraničí, tak tady u nás v České republice.

Součástí práce je popis a vyhodnocení experiment, který se prováděl v Kloknerově ústavu. Jednalo se o sloup kompozitní sloup z UHPC a betonu běžných pevností, který byl vložený do lisu a stlačován do fáze, než sloup zkolaboval.

## 2 UHPC

UHPC neboli ultra vysokohodnotný beton, případně vysokohodnotný cementový kompozit (Ultra-High Performance Concrete) je materiál s velmi vysokou pevností. Není to však jediná výhoda UHPC. Hlavní výhodou těchto vysokohodnotných betonů je vysoký modul pružnosti, velká tahová a tlaková pevnost (20 MPa a 200 MPa [17]), vysoká odolnost proti abrazi, vysoká tekutost, nízká permeabilita a vysoká trvanlivost. UHPC je směs kameniva, cementu, vody, přísad a příměsí. Hlavním rozdílem oproti betonům běžných pevností je využití superplastifikátorů a výrazné snížení vodního součinitele. Superplastifikátor je chemická látka, která se používá v pro zlepšení zpracovatelnosti čerstvé směsi a snížení vodního součinitele a tím dosažení vyšší pevnosti.



Obrázek 1: - Vliv vodního součinitele na pevnost betonu, zdroj: [2]

Použití superplastifikátoru namísto lignosulfonanů k redukcí vodního součinitele vedlo ke zjištění, že UHPC má výrazně vyšší viskozitu než standardní samozhutnitelné betony díky nízkému obsahu vody a vysokým dávkám superplastifikátorů. Ultra vysokovýkonný beton (UHPC) obsahuje nejen cement, ale také velké množství dalších látek, jako jsou latentně hydraulické příměsi, například křemičitý úlet. Tyto příměsi se účastní procesu hydratace. Díky nízkému vodnímu součiniteli při výrobě UHPC a chemickou reakcí mezi hydroxidem vápenatým a minerálními příměsemi se vytváří gel CSH. Díky tomu je tranzitní zóna prakticky stejně hutná jako hlavní struktura materiálu.

Tyto vlastnosti ovlivňují trvanlivost UHPC a mohou mít vliv na jeho vlastnosti v hydrologických aplikacích.

Časem se díky většímu množství přidávání superplastifikátorů vyrábí UHPC s hodnotou vodního součinitele ( $w/c$  – water/cement ratio) kolem 0,3 až 0,2 [8]. Teoretická hodnota vodního součinitele pro hydrataci veškerého cementu ve směsi je 0,15-0,18 [7]. Pro porovnání s běžným betonem se u betonu daná hodnota pohybuje kolem 0,5-0,6 [1]. Tendence dostat se na co nejnižší hodnotu vodního součinitele je

podmíněna použitím správného superplastifikátoru, který zamezuje přiblížení zrn cementu k sobě a díky tomu se lépe rozloží a následně hydratují.



**Obrázek 2: Drátky v UHPC**

Na rozhraní ztvrdlé cementové směsi a kameniva vznikají největší vzduchové póry. Taková oblast se nazývá tranzitní zóna a je široká 0,05-0,1 mm [9]. Když tvrdne cementová pasta, tak se smršťuje a způsobuje tím drobné mikrotrhliny ve své struktuře. Pro omezení tohoto nepříznivého jevu se přidávají mikroplniva – příměsi. Typické mikroplnivo je křemičitý úlet, který vzniká jako odpad některých hutnických provozů. Křemičitý úlet má výrazně (100x) menší zrna než cement. Díky tomu je schopen vyplnit póry a zmenšit tak tranzitní zóna, kde by jinak místo zaplnila voda. Dále směs díky tomu vytváří hutné mikrostruktury a tím se stává struktura únosnější.

## 2.1 Historie betonu a UHPC

Beton se vyvíjel dlouhým procesem. Vynález a použití formy betonu sahá až do starověku, jistou formu betonu používali již Egypťané, ale tento materiál byl jiný, více podobný maltě. Nicméně skutečně rozšířeného využití betonu v konstrukcích dosáhli až Římané. Zjistili, že smícháním materiálu, známého jako pozzolana, s vápnem, mohou vytvořit velmi silnou, odolnou formu betonu [3]. V té době se však používal jiný typ cementu než ten, který se používá dnes, a také nebyl dostatečně pečlivě promíchán s kamenivem a vodou, což znamenalo, že výsledný beton nebyl tak pevný a odolný jako ten, který se používá dnes.

První patent na cement byl udělen v roce 1824 britskému staviteli Josephu Aspidinovi [8]. Tento nový typ cementu se rychle rozšířil po celém světě a stal se základem pro výstavbu moderních staveb.

V průběhu 20. století se objevily nové typy betonu jako je například lehký beton nebo armovaný beton, který se skládal z betonu a oceli. Takovým betonům se

zvýšila pevnost a tažnost a umožňovaly tak výstavbu větších a komplexnějších možností aplikace.

V 90. letech 20. století začaly vznikat nové typy betonu, jako je například UHPC, který se vyznačuje vysokou pevností a odolností vůči mechanickému namáhání. Tento typ betonu umožňuje například využití delších rozponů u mostních konstrukcí a tenčích nosných prvků.

První použití UHPC v průmyslovém měřítku pro mostní konstrukce v ČR bylo provedeno při výrobě desek ztraceného bednění pro most v Benátkách nad Jizerou. Zde byly vyráběny dílky o objemech desítek až stovek litrů. Skanska a.s. následně vyráběla menší dílce v závodě Prefa Štětí – KŠ PREFA s.r.o. pro fasády administrativní budovy v Malmö, opět v objemu stovek litrů. [11]

Dosud největší segmenty z UHPC vyrobené v ČR byly použity pro lávku v Čelákovících, kde byla v jednom záběru betonován díl o objemu 3,8 m<sup>3</sup>. UHPC dodala společnost TBG Metrostav. [12]

## 2.2 Porovnání ceny s běžným betonem

Cena běžného betonu se může lišit v závislosti na mnoha faktorech, jako je místo stavby, počet dodávek potřebných pro projekt a složení betonu. Obecně lze říct, že cena běžného betonu se pohybuje kolem 2 000 až 4 000 Kč za m<sup>3</sup> [13].

Na druhou stranu, cena ultra-vysokohodnotného betonu (UHPC) je vyšší než cena běžného betonu, kvůli složitějšímu procesu výroby a nákladům na speciální suroviny a přísady. Cena UHPC se může pohybovat kolem 35 000 až 75 000 Kč za m<sup>3</sup> [14].

Vlákna jsou jedním z klíčových složek UHPC, protože zvyšují jeho pevnost v tahu a odolnost vůči praskání. Můžou být vyrobeny z různých materiálů, včetně oceli a polymerů, a jejich cena se liší. Takže čím více vláken je v betonu použito a čím dražší jsou vlákna, tím vyšší může být celková cena UHPC.

Hlavním negativem je velmi vysoká technologická náročnost. Je výhodné upravit parametry směsi pro každou aplikaci zvlášť s ohledem na dobu dopravy, míchání na místě, použití pytlované směsi nebo optimalizaci pevnosti v tahu a tlaku. Cena se tak odráží v dopravě, ceně surovin a nákladech na náročný vývoj a přípravu.

Je důležité si uvědomit, že i když je UHPC dražší než běžný beton, má vyšší pevnost, odolnost a životnost, což může v konečném důsledku pomoci snížit náklady na údržbu a opravy v budoucnu. UHPC se také často používá v projektech, kde jsou požadovány specifické vlastnosti jako např. větší zatížitelnost, nároky na odolnost, otěruvzdornost, trvanlivost a větru nebo vyšší estetické požadavky. Životnost konstrukcí z UHPC je předpoklad 200 let a více [11].



## 2.3 Výroba směsi

UHPC se zpravidla skládá z kameniva, portlandského cementu povětšinou třídy 52,5 s vysokou jemností mletí, vody, jemných příměsí, přísad a mikrovláken délky do 20 mm a průměrem do 0,3 mm. Výrazné zastoupení má zde cement – 600-1000 kg/m<sup>3</sup>. Kamenivo musí být velmi kvalitní (pevnost a trvanlivost), suché, očištěné a zrnitost většinou nepřesahuje 8 mm [16]. Ze zkušenosti vyplývá, že v našich podmínkách lze umíchat UHPC v míchačkách s nuceným mícháním, které jsou používány v klasických míchacích centrech betonárny. Nicméně míchací proces byl až 6x delší než u běžného betonu, protože UHPC má vysokou viskozitu.

Při nuceném míchání směsi UHPC dochází k výraznému zvýšení teploty v důsledku mechanické práce, která se vykonává při míchání. Toto zvýšení teploty může být dostatečné k přehřátí směsi, což může vést ke změně její struktury a vlastností. Aby se zabránilo přehřátí směsi UHPC při nuceném míchání, je důležité kontrolovat rychlost a intenzitu míchání, stejně jako teplotu směsi během procesu výroby. Moderní výrobní postupy umožňují pečlivé monitorování teploty směsi a přizpůsobení míchacího procesu tak, aby se minimalizovalo riziko přehřátí.

Pro další zlepšení mechanických vlastností se do směsi začaly přidávat drátky (1-3 % objemu směsi). V tahu s narůstajícím zatížením oddalují drátky vznik mikrotrhlin, což zvyšuje pevnost v tahu i tlaku. Po větším zatížení a vzniku mikrotrhliny jsou vlákna zcela aktivována. Optimální umístění vláken je kolmo na vzniklou trhlinu. Pro usměrnění drátků v betonu existují různé možnosti. Jedním způsobem je usměrnit drátky v celé ploše do jednoho směru, čímž se pomyslně nahrazuje betonářská výztuž.

Další možností je snažit se o usměrnění drátků do různých obrazců, nebo do pravidelného rastru, aby byla dosažena požadovaná pevnost a estetický vzhled betonového prvku. [32]

Nevýhodou ocelových drátků je, že podléhají korozi. Dále mohou vyčnívat na hranici z konstrukce ven, což není z hlediska užívání žádoucí. Proto se dají používat i jiné materiály na bázi umělých hmot, uhlíku a skla.

## 2.4 Betonáž a ošetřování

Vždy se UHPC chová jako samozhutnitelný a do forem či bednění se ukládá litím. Způsob dopravy je pomocí autodomíhače na stavbu a mělo by dojít k uložení následně po umíchání. Pro bezpečné uložení betonu do konstrukce se dá doba zpracovatelnosti prodloužit až na 3 hodiny [16], protože začíná tuhnout rychleji oproti běžným betonům. Čerpatelnost takovéto směsi je náročnější než u běžných betonů, a proto je nutná konzultace s technologem na stavbě. Při zpracování betonu je nutné postupovat rychle a začít co nejdříve s ošetřováním povrchu, aby nedošlo k dehydrataci a tvorbě mikrotrhlin.

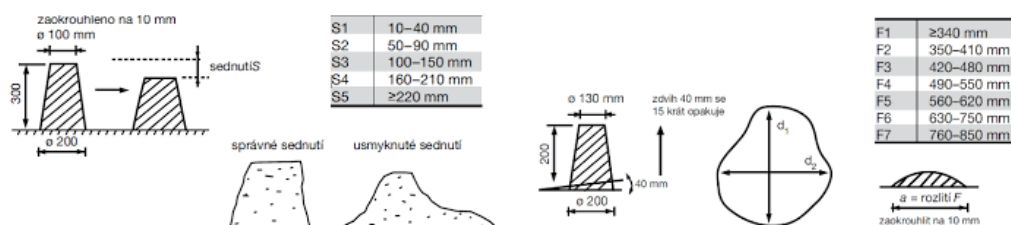
Metoda ošetření povrchu je za použití hydroizolačních nátěrů, pryskyřic nebo fólií k ochraně UHPC před vlhkostí a degradací. Pokud dojde k poškození UHPC, může být opraven pomocí speciálních tmelů nebo pryskyřic určených pro opravy UHPC.

## 2.5 Kontrolní zkoušky

Existuje několik metod, které lze použít k testování kvality UHPC během procesu výstavby. Tyto testy se často označují jako „kontrolní testy“, protože se používají k zajištění toho, že UHPC splňuje požadované specifikace a je vhodný pro zamýšlené použití.

### 2.5.1 Zkouška rozlíváním Abramsovým kuželem

Nejdříve se navlhčí jak kužel, tak základová deska. Poté se kužel naplní postupně betonovou směsí ve třech vrstvách, dokud není naplněn až po okraj. Každá vrstva se zhutní 25 rovnoměrně umístěnými vpichy pýchovací tyčí, aby se zajistilo, že betonová směs je vyrovnána a že jsou v ní odstraněny veškeré vzduchové kapsy. Po dokončení naplnění se forma plynule vyzvedne od kuželu a změří se sednutí betonové směsi v milimetrech vzhledem k výšce kuželu. Toto měření slouží k určení stability a hustoty betonové směsi, která se používá k vytvoření základové desky podle normy ČSN EN 12350-5. [16]



Obrázek 3: Zkouška sednutí kužele a rozlívání kužele, zdroj: [37]

### 2.5.2 Zkouška sednutí kužele

Nerezovou podložku položíme na vodorovnou plochu. Poté navlhčíme všechny pomůcky – podložka, kužel, trychtýř a hutnicí tyč. Procedura spočívá v umístění kuželu na střed nerezové desky a jeho přichycení k podkladu. Na vrchol kuželu je umístěn trychtýř. Poté se postupně přidává čerstvý beton do kuželu až do 1/3 jeho výšky, poté následuje 25 rovnoměrně rozložených vpichů hutnicí tyčí. Tento postup se opakuje pro 2/3 a celou výšku kuželu. Po dokončení se vrchní část betonu zarovná a očistí se beton z podložky. Poté se kužel pomalu zvedne a umístí se vedle betonového vzorku. Horní okraj kuželu se určí pomocí hutnicí tyče a změří

se vzdálenost mezi nejvyšším bodem betonu a dolní hranou tyče. Naměřená hodnota se následně klasifikuje podle normy ČSN EN 206-1.

### 2.5.3 Zkouška rozlivu přes J-ring

J-Ring test měří schopnost průchodu betonu kolem překážek. J-ring představuje kroužek s přivařenými vertikálními tyčemi simulujícími překážky. Test zahrnuje umístění kuželové formy do prostřed J-Ringu, naplnění formy betonem, její zvednutí a měření rozšíření betonu. Výsledné průměrné rozšíření betonu na podložce ukazuje, jak dobře beton protéká mezi překážkami. [31]

### 2.5.4 Test pevnosti v tlaku

Zkouška pevnosti v tlaku je běžnou metodou hodnocení mechanických vlastností ultra vysokohodnotného betonu. Jedná se o zkoušku, která je normalizovaná mezinárodní normou ISO 1920-3 a ČSN EN 12390-3. Měří se schopnost odolávat tlakovým silám, což jsou síly, které působí na drcení nebo stlačení materiálu.

Zkouška se provádí na krychlích o rozměrech délky hrany 150 mm, nebo na válcích o výšce 300 mm a průměru 150 mm ve stáří 28 dnů. U běžných betonů se setkáme s tím, že krychelná pevnost je oproti válcové větší až o 25 %. Válcová pevnost je kritickou veličinou pro UHPC, zatímco krychelná pevnost slouží spíše k porovnávání s jinými betony. Válcová pevnost je nejčastěji používaným ukazatelem pro hodnocení pevnosti UHPC a představuje klíčovou vlastnost pro návrh konstrukcí z UHPC a posuzování jejich vlastností.

Nicméně, když se jedná o UHPC mohou být rozdíly v pevnosti mezi krychelnou pevností a válcovou velmi malé nebo dokonce zanedbatelné. V důsledku toho se u tohoto betonu může stát, že pevnost na krychli a pevnost na válci budou velmi blízké, nebo dokonce téměř stejné. Samozřejmě výsledky závisí na konkrétních podmínkách výroby a testování, a proto je vždy nutné testovat vzorky a vyhodnotit jejich vlastnosti.

Pro provedení zkoušky pevnosti v tlaku se připraví vzorek UHPC, který se nechá ztvrdnout za kontrolovaných podmínek. Vzorek se poté umístí do kompresního lisu na testování tlaku, který na vzorek působí silou, dokud se nerozbije. Pevnost v tlaku UHPC se stanoví vydělením maximální aplikované síly plochou průřezu vzorku. Pevnost v tlaku UHPC se může lišit v závislosti na návrhu směsi a podmínkách vytvrzování. Obecně má UHPC pevnost v tlaku, která je mnohem vyšší než u běžného betonu.

Pevnost UHPC v tlaku je důležitým parametrem při navrhování konstrukcí a komponentů vyrobených z UHPC. Slouží k výpočtu požadované tloušťky a také

velikosti a rozteče výztužných prvků. Používá se také k hodnocení kvality a zajištění, že splňuje požadované specifikace.

### 2.5.5 Test pevnosti v tahu za ohybu

Tento test měří schopnost UHPC odolávat ohybovým silám. Vzorek UHPC ve tvaru nosníku se umístí do zkušebního stroje a na horní část nosníku se působí zatížením, zatímco jsou oba konce podepřeny. Zatížení se postupně zvyšuje, dokud se nosník nezlomí nebo nedeformuje. Maximální zatížení, při kterém k tomu dojde, se zaznamená jako pevnost v ohybu UHPC.

Existuje několik faktorů, které mohou ovlivnit pevnost v ohybu UHPC, včetně návrhu směsi, procesu vytvrzování a kvality použitých surovin. Je důležité pečlivě kontrolovat tyto faktory, aby bylo dosaženo požadované pevnosti v ohybu v konstrukci z UHPC. [18]

- **ČSN EN 14 488-3** – čtyřbodový ohyb na trámci 75x125 mm délky nejméně 500 mm při rozponu 450 mm, test řízen posunem břemene 0,25 mm/min., měří se průhyb. Není zde předem určen kritický průřez, kde vznikne trhlina.
- **ČSN EN 14 651+A1** – třibodový ohyb, jedná se o metodu určení pevnosti v tahu za ohybu betonu s kovovými vlákny na zkušebních tělesech odlévaných do forem. Je stanovena touto evropskou normou. Tato norma definuje postupy pro stanovení mezi úměrnosti a hodnot zbytkové pevnosti v tahu za ohybu. Provedení zkušební metody je vhodné pro kovová vlákna s délkou do 60 mm a může být aplikováno i pro kombinace kovových vláken s jinými vlákny. Zkušební těleso má rozměry 150 x 150 x 700 mm a rozpětí 500 mm s vrubem do 1/6 h uprostřed. Měří se rozevření trhliny, popřípadě průhyb.
- **ČSN P73 2452-4** bodový ohyb, na trámci 150x150x700 mm při rozponu podpor 600 mm bez vrubu, měří se rozevření trhliny, řízení testu posunem břemene 0,2 mm/min

### 2.5.6 Test v prostém tahu

Pro měření pevnosti při tahání se používají testy na vzorcích tvaru "dogbone". Tyto vzorky mají speciální geometrii, s konstantním průřezem v centrální části, která podporuje vznik více trhlin. Mají také velký průřez v oblasti uchycení, aby se zabránilo poškození v místě uchycení, a hladký přechod mezi oblastí podpory a střední částí. Způsob, jakým jsou tyto vzorky uloženy pro testování, se může lišit v závislosti na počtu stupňů volnosti, které jsou pro vzorek umožněny.

Tento tvar se ukázal být nejvhodnější pro sledování tahového zpevnění, oproti jiným geometrickým tvarům. Tyto vzorky mají specifické rozměry, které nejsou standardizovány. Většinou si výzkumné týmy určují přesné geometrické rozměry vzorků podle požadavků pro daný test. [19]

### 2.5.7 Test trvanlivosti

Tyto testy se používají k hodnocení schopnosti UHPC odolávat povětrnostním vlivům, cyklům zmrazování a rozmrazování a dalším faktorům prostředí. Příklady testů odolnosti zahrnují testy absorpce vody, testy cyklů zmrazování a rozmrazování a testy tvorby vodního kamene. Provedený výzkum Benjaminem Graybealem [20] ukázal, že tepelně ošetřené UHPC zlepšuje už tak výbornou odolnost proti agresivnímu prostředí.

Zprostředkovatelem škodlivého působení je převážně voda, ve které jsou rozpuštěna různá chemická činidla. Za předpokladu, že cementový tmel bude dostatečně hutný, bude zabráněno vstupu vody do betonu a škodlivé působení bude pouze povrchové.

Zkouška odolnosti vůči CHRL (chemické rozmrazovací látky – chemické prostředky používané zejména v zimě) lze rozdělit na metodu A a C.

Metoda A je metoda automatického cyklování, spočívá v testování krychle o hraně 150 mm. Vzorky se umístí do nádoby a zalijí se roztokem NaCl o koncentraci 3 % tak, aby byly ponořeny do výšky 5 mm. Vzorky se poté vystaví cyklickému procesu zmrazování a rozmrazování. Tento cyklus zahrnuje ochlazení zkušební plochy na  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , která se udržuje po dobu 15 minut, a následný ohřev zkušební plochy na  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , která se opět udržuje po dobu 15 minut. Po každých 25 cyklech se vzorky spolu s nádobou vyjmou a částice uvolněné ze zkušební plochy se opláchnou vodou ze stříkačky do nádoby. Odpad se pak vysuší při teplotě  $+105\text{ }^{\circ}\text{C}$  a jeho hmotnost se změří s přesností na 0,1 g.

Metoda C využívá automaticky řízené cyklické střídání kladných a záporných teplot na celé zkušební těleso tvaru válce, kde je průměr 150 mm a výška 300 mm. Zkoušené těleso je opatřeno vodo-nepropustnou objímkou. Na těleso se nalije voda a ponechá se nejméně 2 dny. Poté se voda odstraní a umístí se těleso do klimatizační komory, kde se na něj nakape 3 % roztok NaCl v tloušťce vrstvy nejméně 5 mm. V klimatizační skříni se neustále oběhový vzduch ochlazuje na teplotu  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  a poté se opět zahřívá na teplotu  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Tento cyklus trvá 6 hodin. Po každých 25 cyklech se z klimatizační skříně vyjme zkušební těleso. Poté se na jeho povrchu rozetře sláný roztok, který se poté pomocí stříčky smyje do misky a zbývající částice se odstraní hrubším kartáčem. Tento proces se opakuje až do 75 cyklů. Nakonec se v misce zváží všechny uvolněné a usušené částice, které se stanoví s přesností na 0,1 g. Poté se vypočítá množství odpadu betonu na  $\text{g}/\text{m}^2$  povrchu zkušebního tělesa. [21]

### 2.5.8 Test na vodopropustnost

Vodopropustnost betonu s ultravysokou pevností (UHPC) označuje schopnost vody procházet materiálem. Nízká propustnost vody je u UHPC žádoucí, protože naznačuje, že materiál je odolný proti pronikání vody. Existuje několik metod,

kteře lze pouŕít k testování propustnosti UHPC vodou. Jednou z běžných metod je test kapilární absorpce, kteřý zahrnuje působení tlaku na povrch vzorku UHPC a měření množství vody, kteře je absorbováno do materiálu v průběhu času. Další metodou je test absorpce vody, kteřý zahrnuje ponoření vzorku UHPC do vody a měření množství vody, kteře se absorbuje do materiálu. Je důležité pečlivě kontrolovat návrh směsi a proces vytvrzování UHPC, aby bylo dosaženo požadované úrovně propustnosti vody. Faktory jako je typ a množství cementu, velikost a typ kameniva a podmínky vytvrzování, to vše může ovlivnit propustnost UHPC.

### **2.5.9 Metoda nedestruktivního ultrazvukového zkoušení**

Při ultrazvukovém testování se na povrch testovaného materiálu umístí sonda, známá také jako převodník. Snímač vytváří vysokofrekvenční zvukové vlny, kteře jsou přenášeny do materiálu. Když zvukové vlny narazí na změnu vlastností materiálu, jako je defekt nebo změna tloušťky, část zvukových vln se odrazí zpět do měniče. Tyto odražené vlny jsou detekovány a použity k vytvoření vizuální reprezentace vnitřní struktury materiálu, známé jako „vzorek zvukových vln“ nebo „A-scan“.

Použitím vysoce výkonného materiálu jako je UHPC pro betonové konstrukce vyžaduje účinný a spolehlivý kontrolní proces. Nedestruktivní testy na vzorcích z ultra vysokohodnotného betonu jako jsou nosníky v ohybu nebo válce, ukázaly, že ultrazvukovou kontrolu lze použít rychle, efektivně a spolehlivě, aby bylo možné například strukturální změny v rámci kontroly kvality nebo materiálovým výzkumem. Tímto způsobem bylo možné identifikovat problémy s hutněním UHPC nosníků v ohybu. Použití velmi častých sond je u tohoto jemnozrného materiálu oproti běžnému betonu možné. To má za následek vyšší rozlišení, a tedy i vyšší spolehlivost. [17]

Tato metoda se velmi dobře hodí pro zkoumání UHPC díky jemnozrným složkám a homogennější struktuře, protože UHPC je ve srovnání s běžným betonem (agregáty UHPC jsou obecně 10 až 20krát menší. Vzhledem k husté a jemnozrné struktuře lze pro testování UHPC použít ultrazvukové frekvenční rozsahy  $> 1$  MHz (běžně používané pro zkoumání oceli). To poskytuje mnohem vyšší rozlišení, a tím i vyšší spolehlivost kontroly kvality UHPC. V rámci systému kontroly kvality lze s jistotou odhalit a posoudit nedostatky ve vlastnostech materiálu a výrobě. [1]

## 2.6 Konstrukce z UHPC

### 2.6.1 Česká republika

#### Zavěšená lávka přes Labe v Čelákovících

Jedná se o konstrukci v České republice, kde byl použit jako nosný prvek UHPC. Most pro pěší je dlouhý 242 m a výška ocelových pylonů je 37 m. Most se skládá ze 3 segmentů, které byly dopraveny na místo po Labi přímo z výroby na stavenišť v Čelákovících. Materiál lávky vykazoval pevnost v tlaku 168 MPa s rozptýlenou ocelovou výztuží na krychli o hraně 100 mm při zachování velké tekutosti. Lávka je dimenzovaná na rovnoměrné zatížení o hodnotě 3 kN/m<sup>2</sup>. [23]



Obrázek 4: Lávka v Čelákovících , zdroj [37]

#### Lávka přes Dřetovický potok ve Vrapicích nedaleko Kladna



Obrázek 5: Lávka přes Dřetovický potok ve Vrapicích u Kladna, zdroj: [38]

Jedná se o lávku zasazenou do velmi náročného prostředí díky častému rozvodňování řeky. Lávka je z vysokopevnostního mrazuvzdorného materiálu UHPC třídy C110, s rozptýlenou ocelovou výztuží bez použití konstrukční výztuže.

Příčný profil je tvaru „U“, jak je z fotografie jasné (obr. 3), a má šířku 1,5 m s tloušťkou skořepinové konstrukce pouhých 30 mm. Objem spotřebovaného materiálu činil 1,4 m<sup>3</sup> a váha je přibližně 3,5 t. Je určena chodcům nebo cyklistům a spojuje obec s přilehlým hřbitovem. [24]

### Lávka přes Opatovický kanál v Čeperce

Lávka byla nejprve navržena ve variantě monolitické lávky z betonu třídy C 35/45. Firma Pontex s.r.o. navrhla výrazně efektivnější řešení v podobě nosníku tvaru dvojité „T“ z UHPC třídy C 110/130 XF4 s hmotností 10 tun (původně více než 13 t)



Obrázek 6: Most v Čeperce, zdroj [39]

Materiál UHPC je mrazuvzdorný, zcela nepropustný a s velmi vysokou životností, a to bez nároků na další údržbu. Kromě předem předepjatého nosníku z UHPC bylo zde i zábradlí ze stejného materiálu. Použity byly panely vylehčené polygonálními otvory. Pomocí odlévání UHPC do tenkostěnných forem bylo dosaženo výrazného zlepšení kvality zábradelních panelů. [25]

### Lávka v Lužci nad Vltavou

Lávka je dostupná pouze pro pěší nebo cyklisty a je dlouhá 100 m. Celá konstrukce mostu je zavěšená na jednom ocelovém pylonu, který dosahuje výšky 40 m. Je složená ze segmentů z UHPC třídy betonu C110 s rozptýlenou ocelovou výztuží. Most se skládá ze dvou polí 99,18 m a 31,9 m. Na mostě je zavěšeno celkem sedmáct dvojitých závěsů. Trvanlivost UHPC je v porovnání s běžným železobetonem výrazně vyšší a předpokládá se, že by mohla dosáhnout i 200 let, ale závěsy a prvky podélného předpětí mají návrhovou životnost zřetelně kratší, proto jsou takovéto prvky vyměnitelné. [26]





Obrázek 7: Lávka v Lužci, zdroj: [40]

## 2.6.2 Využití UHPC ve světě

### Zastřešení stanice TGV Montpellier

Na zastřešení stanice TGV na jihu Francie byly použity panely s vláknou vyztuženého UHPC. Každý prefabrikovaný panel má tloušťku 50 mm a délku 18 m. Střecha je vyrobena ze 115 modulárních kusů. Všechny betonové prvky (10 000 m<sup>2</sup>) byly během 4 měsíců nainstalovány s přísnými geometrickými požadavky za pouhé 2 týdny. Bylo nutné přísně kontrolovat orientaci vláken a přesnost umístění předpínací výtzuže, zajištění absence trhlin během fází demontáže a přepravy (před dodatečným napínáním) a geometrické kontroly. [27]

### Muzeum v Marseille

Příkladem praktického využití UHPC je muzeum civilizací Evropy a Středomoří v Marseille, které se nachází na jihu Francie. Budova je, kromě dvou prosklených fasád, kompletně zapouzdřena do tenkých pouhých 100 mm tlustých betonových panelů do příhradové konstrukce. Architekt Rudi Ricciotti zvolil barvený beton, aby dal budově specifický vzhled. [28]



Obrázek 8: Muzeum civilizací Evropy a Středomoří Rudyho Ricciottiho, zdroj: [42]

Za zmínku stojí i další výhoda jako je zachování charakteristické struktury i po obarvení. Nebudou se z povrchu odlupovat žádné vrstvy barvy vlivem podnebí. Navzdory mírnému poškození zůstává barva stejně jasná. To je důvod, proč jsou barviva na bázi oxidu železa vhodnou volbou pro barvení moderního a pevného betonu. Jehož předpokládaná životnost přesahuje 150 let, což je přibližně dvakrát odolnější než běžný beton.

Také je z UHPC vyrobena lávka spojující pevnost Saint Jean o délce přes 130 m a je tvořen z 26 prefabrikovaných segmentů ve tvaru „U“. [29]



Obrázek 9: Lávka v Marseille spojující pevnost Saint Jean, zdroj: [43]

### Seonyu v Jižní Koreji

Sunyudo Bridge se nachází v Jižní Koreji a je považován za unikátní příklad mostního inženýrství. Most má hlavní rozpětí 120 metrů a je podepřen šesti

prefabrikovanými oblouky z předpjatého betonu ve tvaru „I“. Oblouky jsou umístěny v hloubce 1,30 metru pod mostovkou a vytvářejí výrazný a vizuálně nápaditý design.

Tento most z UHPC je s nejdelším rozpětím na světě. Tento inovativní design mostu poskytuje výjimečnou stabilitu a odolnost vůči větru a zemětřesení, což něj činí bezpečnou a spolehlivou konstrukci. [30]



Obrázek 10: Most v Soulu, zdroj [44]

### Stanice Shawnessy v Calgary

Most je vyrobený z UHPC rozměrech 5 x 6 m o tloušťce pouhých 20 mm a podpořených na jednotlivých sloupech. Na stanici se jako na první použilo UHPC v tenkém prefabrikovaném střešním plášti.



Obrázek 11: Vlakové nádraží v Calgary, zdroj: [45]

Jednotlivé části jsou sešroubovány dohromady, aby vytvořily jednotlý střešní plášť. Dále jsou z UHPC vyrobeny nástupištní desky a výstupní rampy.

Mechanické vlastnosti a flexibilita designu UHPC usnadnily konstruktérovi schopnost vytvářet velmi tenkou, elegantně zakřivenou, šedobílou strukturu skořepiny. [31]

### 3 Spolupůsobení konvenčního betonu běžných pevností a UHPC

Pozemní stavební prvky jako jsou stropní desky, trámy a sloupy, mohou být zesíleny pomocí vrstvy UHPC. Desky jsou obvykle vodorovné, což usnadňuje technologii provádění, protože UHPC se dodává jako samozhutnitelný beton, který má tendenci vytvářet vodorovnou hladinu.

Pokud je vrstva UHPC v oblasti tlačené, únosnost průřezu se zvýší díky velké velmi vysoké pevnosti UHPC v tlaku. Pokud je vrstva UHPC v tažené oblasti, mohou vlákna obsažená v UHPC přispět k tahové únosnosti. Jestli je vrstva v tlačené oblasti malá, může být primární účel pouze jako ochranná vrstva zajišťující delší trvanlivost. Tloušťka takové vrstvy může být 24 – 40 mm. [26]

U sloupů lze použít vrstvu UHPC, která může být buď pouze z UHPC (tahovou výztuž tvoří jen vlákna) nebo lze doplnit prutovou výztuž včetně třmínků. Pokud jsou sloupy obetonované po celém obvodu průřezu, není třeba provádět tak dokonalou úpravu povrchu. Původní beton zůstane uvnitř obetonování UHPC a při deformaci není prakticky umožněn posun ve spáře mezi UHPC a původním betonem. Na druhou stranu je třeba zajistit podmínky pro kvalitní betonování vrstvy UHPC. [26]

U mostních konstrukcí může být betonování vrstvy UHPC přínosem pro únosnost průřezu jako celku nebo pro lokální únosnost horní desky u komorových průřezů. Navíc může vrstva UHPC působit jako hydroizolace mostu. V takovém případě jsou na UHPC kladeny vyšší nároky, zejména na zabránění vzniku trhlin.

V zahraničí se již využívá technologie zesilování pomocí UHPC především pro opravy a zesílení mostních konstrukcí a vodohospodářských staveb, tedy tam, kde je konstrukce vystavena velkému namáhání, nepříznivému účinku agresivních látek nebo abrasivního prostředí.

#### **Viadukt Chillon**

Jako příklad je viadukt Chillon (Obr. 12) podél Ženevského jezera. Chillonské viadukty byly vyztuženy překryvnou vrstvou z materiálu UHPC. Díky svým mechanickým vlastnostem a trvanlivosti bylo UHPC jediným materiálem, který byl schopen zajistit efektivní dodatečnou montáž při zachování nosnosti mostu, nižší náklady na údržbu a rychlé dodatečné zprovoznění důležité osy švýcarské dálniční sítě. Provedení tenké vrstvy UHPC (tloušťka 4 cm) s výztužemi umožnilo zesílení mostních desek na smykové zatížení, ohyb a únavu a zároveň zajistilo vodotěsnost povrchu. [35]



Obrázek 12: Chillon Viaduct, zdroj: [49]

### Most Laporte Road

Tento most je přes potok Mud Creek a byl postaven v 60. letech 20. století. Jedná se o železobetonový most o třech polích, který se nachází ve městě Brandon ve státě New York. Most je na koncích podepřen železobetonovými opěrami, které byly odlity na ocelových H-pilotech. Délka mostu od opěry k opěře je 30,5 m. Šířka mostu je 8,53 m a skládá se ze dvou jízdních pruhů. [36]

Na mostovce se začaly objevovat delaminace a odlupování podél obrubníkové čáry a na obou koncích v dilatačních spárách. Je pravděpodobné, že zhoršení stavu souviselo s pronikáním vody s obsahem chloridů do betonu a za dilatační spáry s těsnicími pásy, což vedlo ke korozi výztuže a poruchám souvisejícím s cykly zmrazování a rozmrazování. Toto zhoršení dosáhlo takového stupně, že bylo nutné provést údržbu. Pro opravu poškozené vrstvy bylo zvoleno řešení s překrytím z UHPC. Tloušťka vrstvy byla stanovena na 38 mm. [37]



Obrázek 13: Most Laporte Road, zdroj: [51]

Existuje několik důvodů, proč se UHPC používá k posílení konstrukcí z betonu:

- **Vysoká pevnost:** UHPC má vyšší pevnost v tlaku a ohybu než klasický beton, což umožňuje posílení konstrukce a snížení tloušťky stěn nebo prvků.
- **Vyšší modul pružnosti:** Konstrukce z UHPC mají při stejném průřezu nejen vyšší únosnost, ale při stejném zatížení vykazují menší deformaci. Při návrhu štíhlého prvku z UHPC je často množství materiálu výrazně sníženo a při stejné únosnosti prvku může docházet k větším deformacím. Při vyztužování stávajících konstrukcí vrstvou UHPC se s výhodou uplatňuje rozdíl modulů pružnosti v porovnání s betonem běžných pevností. V případě odtížení konstrukce, přidání vrstvy UHPC a opětovného zatížení se v UHPC při stejné poměrné deformaci generuje větší napětí, čímž se efekt zesílení prvku ještě zvýší. Rozhraní materiálů ovšem přenáší relativně velké smykové síly.
- **Nižší poréznost:** UHPC má výrazně nižší poréznost než klasický beton, což vede k minimalizaci vzniku krystalů ledu a krystalů solí a jiných chemikálií v pórech. Díky tomu je UHPC. Na lávkách z UHPC není třeba provádět hydroizolaci, což výrazně snižuje náklady na konstrukci. Cena konstrukce z UHPC se tak přibližuje konstrukcím betonů běžných pevnostních tříd.
- **Vyšší trvanlivost:** UHPC má vyšší trvanlivost a životnost než klasický beton. To znamená, že konstrukce z UHPC mohou vydržet déle bez oprav nebo rekonstrukce (výměna prvků sanace, atd). Toto je důležité pro konstrukce, které jsou vystaveny silným zatížením nebo klimatickým vlivům.
- **Možnost konstruovat větší a složitější konstrukce:** UHPC umožňuje provádět konstrukce, které by bylo jinak složité nebo nemožné vybudovat z klasického betonu, např. tenkostěnné konstrukce, konstrukce s vysokou přesností nebo konstrukce s vysokou odolností vůči seismickému zatížení.
- **Konstrukce s vysokou odolností vůči seismickému zatížení:** UHPC se používá jako náplň nebo vrstva na povrchu betonu, aby se zvýšila odolnost konstrukce vůči seismickému zatížení. [32]

Nevýhodou mohou být vyšší náklady na výstavbu, protože, jak už bylo uvedeno výše, UHPC je dražší než běžný beton. Na ceně se podepisuje vysoký obsah cementu (950-1000 kg/m<sup>3</sup>) [13] a vysoký obsah křemičitého úletu (100-250 kg/m<sup>3</sup>) a svůj podíl v ceně mají i drátky. Další nevýhodou může být složitost a specifika

výroby a aplikace UHPC, která vyžaduje speciální zařízení a zkušenosti. To může znamenat, že náklady na práci jsou vyšší a že je třeba mít k dispozici kvalifikované pracovníky. Navíc UHPC je citlivější na teplotní a vlhkostní podmínky, což může ztěžovat práci na stavbě a prodloužit dobu výstavby. Další nevýhodou může být nedostatek dostupnosti UHPC ve všech oblastech, kde se staví, a mohou se vyskytnout problémy s dopravou a skladováním takového materiálu.

UHPC se chová jako normální beton bez vláken, tj. má vysokou pevnost a tuhost, ale zvýšenou křehkost doprovázené vysokým modulem pružnosti (asi 45–60 GPa) [1]. Proto se často používají vlákna ke zlepšení jeho odolnosti proti praskání. Bez vláken může být UHPC náchylnější k praskání při napětí a namáhání. Pro dosažení optimálních vlastností se proto často používají vlákna jako jsou skleněná nebo uhlíková, která poskytují dodatečnou sílu a odolnost proti praskání. Tyto vlákna také zvyšují schopnost UHPC absorbovat energii při nárazu a zvyšují životnost a spolehlivost konstrukce. [2]

Vlákna pro UHPC mohou být vyrobená z různých materiálů, například:

- Skelné vlákno – křehké, dobrá soudržnost s cementovou matricí
- Uhlíkové vlákno – vysoká požární odolnost, vysoký modul pružnosti, vysoká mezní pevnost, odolnost proti chemickému prostředí
- Polypropylenová vlákna – velká požární odolnost – při vysoké teplotě dochází k tání materiálu, a tak vznikají skuliny pro odvod páry z betonu, redukce pevnosti

Výběr materiálu pro vlákna závisí na požadovaných vlastnostech a specifikacích konkrétního projektu. Každý z těchto materiálů má specifické vlastnosti, jako je pevnost, tuhost a odolnost proti korozi, což je třeba zvážit při volbě.

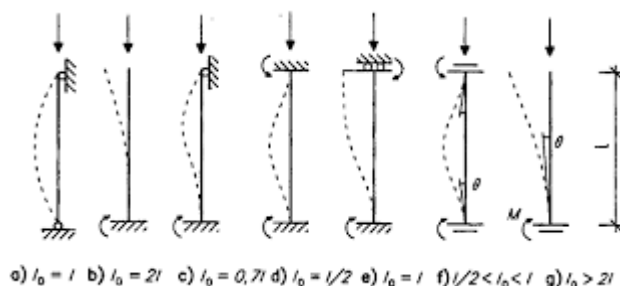
V závislosti na konkrétním projektu a požadavcích na konstrukci, mohou být tyto nevýhody vyváženy výhodami, jako jsou vyšší pevnost a trvanlivost konstrukce. Je důležité pečlivě zvážit všechny aspekty před rozhodnutím o použití UHPC ve spojení s betonem.



## 4 Tlačené štíhlé prvky

Prvkům s dlouhým a štíhlým tvarem hrozí, že při zatížení ztratí stabilitu. Prvky, kde výrazně převládá jeden rozměr nad ostatními, mohou být náchylné na ztrátu stability při dosažení kritického zatížení. Takovému jevu se snažíme zabránit. Při vychýlení prvku, který poskytuje statickou podporu, může dojít ke zhroucení celé konstrukce.

Na Obrázku 14 jsou vidět příklady různých způsobů vybočení a odpovídajících účinných délek izolovaných prvků. Sloupový prvek je zde reprezentován pouze střednicí.

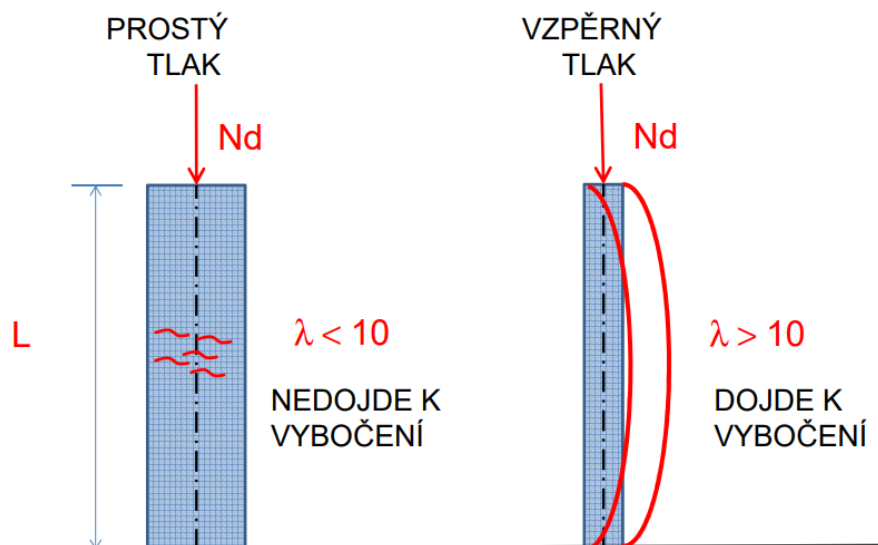


Obrázek 14: Vzdálenost inflexních bodů v závislosti na způsobu uložení, zdroj: [46]

Při výpočtu únosnosti prvků a konstrukcí je třeba brát v úvahu negativní dopady možných odchylek v geometrii konstrukce a působišť a směr zatížení. Například působení větru nebo nehomogenita může vést k vybočení střednice výrazně před dosažením teoretické únosnosti prvku. Jedná se především o sloupy, pilíře apod. U MSÚ se imperfekce musí brát v úvahu při trvalých a mimořádných návrhových situacích. U MSP se uvažovaná imperfekce nemusí brát v potaz. Pro zjednodušení lze pro osamělé prvky a stěny ve ztužujících systémech uvažovat výstřednost  $e_i = l_0/400$  [mm], kde  $l_0$  je délka prvku.

Při posuzování vzpěrného tlaku u složených prvků je nezbytné provést jak globální, tak lokální posudek, aby byly zohledněny jak vlastnosti dílčích prvků, tak celkového složeného prvku. Nicméně musí být zohledněn vliv poddajnosti spoje mezi jednotlivými dílčími částmi, který může výrazně ovlivnit chování a stabilitu konstrukce.

V případě masivního prvku (Obr. 15) dojde po dosažení únosnosti k jeho drcení. V případě štíhlého prvku (Obr. 15) nastane kolaps vlivem ztráty stability a vybočení.



Obrázek 15: Vybočení sloupu, zdroj: [46]

Vzpěrná délka se spočítá na základě vzdálenosti inflexních bodů. V tomto případě je vzdálenost inflexních bodů rovna výšce sloupu.

$$L = \beta * L_{vzy} = 1 * 2,5 \text{ m} = 2,5 \text{ m}$$

Při výpočtu se modul pružnosti materiálu sloupu  $E$  používá k vyjádření jeho odolnosti proti deformacím. Moment setrvačnosti průřezu sloupu  $I$  vyjadřuje jeho geometrii a schopnost odolávat tlakovému zatížení s ohledem na ztrátu stability. Vzpěrná délka  $l$ , která se vypočítá na základě podmínek uložení sloupu, slouží k určení kritické délky, při které se začne projevovat nestabilita. Výpočet Eulerova břemene s využitím těchto parametrů poskytuje důležité informace o chování sloupu. Stanovení kritického tlakového zatížení umožňuje dimenzovat sloupy tak, aby byly dostatečně stabilní a odolné vůči kolapsu.

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 * E * I}{l_0^2}$$

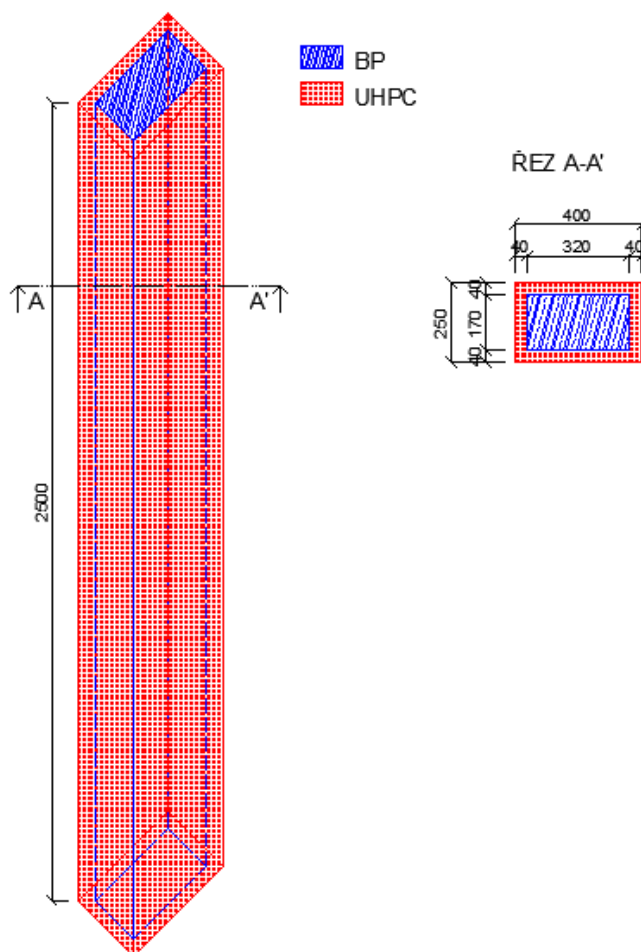
Poměrná štíhlost  $\lambda$  představuje geometrický a fyzikální charakteristiku prutů a sloupů, která určuje jejich schopnost odolávat ohýbacím silám. Je rovna poměru účinné délky  $l_0$  a poloměru setrvačnosti  $i$ . Čím vyšší je hodnota lambda, tím menší je průhyb a větší stabilita prutu nebo sloupu.

$$\lambda = \frac{l_0}{i}$$

# 5 Experimentální program

## 5.1 Motivace

Předmětem experimentu byla výroba a destruktivní zkouška únosnosti kompozitního sloupu s obdélníkovým průřezem 250x400 mm a výšky 2500 mm. Skořepina z UHPC o tloušťce 40 mm zde plní statickou funkci a podílí se na celkové únosnosti sloupu, ale také plní funkci ztraceného bednění. Tyto výhody dělají z kompozitního sloupu výhodné řešení, protože urychlují výstavbu, snižují provozní náklady a prodlouží životnost konstrukce.



Obrázek 16: Rozměry sloupu

Experimentálně bylo ověřováno také spolupůsobení výplně sloupu se skořepinou z UHPC. Experiment si kladl za cíl ověřit technologickou náročnost a aplikovatelnost metody betonáže sloupu naležato a vytvoření dutiny pro výplňový beton. Při destruktivní zkoušce měl být ověřen mód porušení. Předpokládalo se, že dojde

k poškození ve střední části vlivem vzpěru a výrobních imperfekcí. Dále mělo být ověřeno, zda spolu oba materiály spolupůsobí po celou dobu zatěžování, nebo dojde k pokluzu na rozhraní. Rozměry sloupu a uspořádání v příčném řezu jsou vidět na Obr. 16.

## 5.2 Materiálové charakteristiky

Pro odhad únosnosti a ověření materiálových charakteristik byla vytvořena pomocná zkušební tělesa ve formě válců, trámků nebo kostek. Na nich byly ověřovány vlastnosti jako modul pružnosti, pevnost v tlaku nebo pevnost v tahu za ohybu.

Ve výpočtech byly následně použity průměrné hodnoty z tabulek níže. Pro odhad tlakové únosnosti byla uvažována hodnota válcové pevnosti z tabulky 3. Ve výpočtu průhybu a napětí byla uvažována hodnota z tabulky 5 a to Youngův modul pružnosti pro běžný beton i UHPC.

	n - počet měření	UHPC	Beton běžných pevností
Krychle 150 mm	1	136,16	46,00
	2	131,56	51,81
	3	137,78	47,56
	4	138,67	47,62
	5	132,44	47,16
	6	136,89	45,56
	7	156,44	50,44
	8	148,34	48,45
	9	138,67	40,89
	10	138,29	42,00
	11	130,67	40,50
	12	152,54	37,33
	13	138,22	
	14	136,94	
	15	145,61	
	16	137,39	
	17	133,33	
	18	137,78	
<b>průměr</b>		<b>139,32</b>	<b>45,44</b>

Tabulka 1: Krychelná pevnost

	n - počet měření	UHPC	Beton běžných pevností
Válec h = 300 mm D = 150 mm	1	90,67	38,48
	2	106,39	43,57
	3	112,61	46,4
	4	128,46	
	5	146,00	
	6	90,54	
<b>průměr</b>		<b>112,45</b>	<b>42,82</b>

Tabulka 2: Válcová pevnost

	n - počet měření	UHPC	Beton běžných pevností
E [GPa]	1	45,20	30,35
	2	44,00	30,80
	3	47,10	30,75
	4	50,70	
	5	45,60	
	6	47,5	
<b>průměr</b>		<b>46,68</b>	<b>30,63</b>

Tabulka 3: Youngův modul pružnosti

	n - počet měření	UHPC	Beton běžných pevností
3-bodový test ohybu 100 x 1000 x 400 mm	1	15,26	3,35
	2	8,52	3,80
	3	7,59	3,75
<b>průměr</b>		<b>10,46</b>	<b>3,63</b>

Tabulka 4: 3-bodový test ohybu

	n - počet měření	UHPC	Beton běžných pevností
4-bodový test ohybu 100 x 1000 x 400 mm	1	23,91	4,60
	2	13,41	3,33
	3	22,85	3,84
	4	27,30	
	5	27,60	
	6	29,00	
	7	21,90	
	8	27,80	
	9	24,70	
<b>průměr</b>		<b>24,27</b>	<b>3,92</b>

Tabulka 5: 4-bodový test ohybu 100x1000x400

### 5.3 Výztuž sloupu

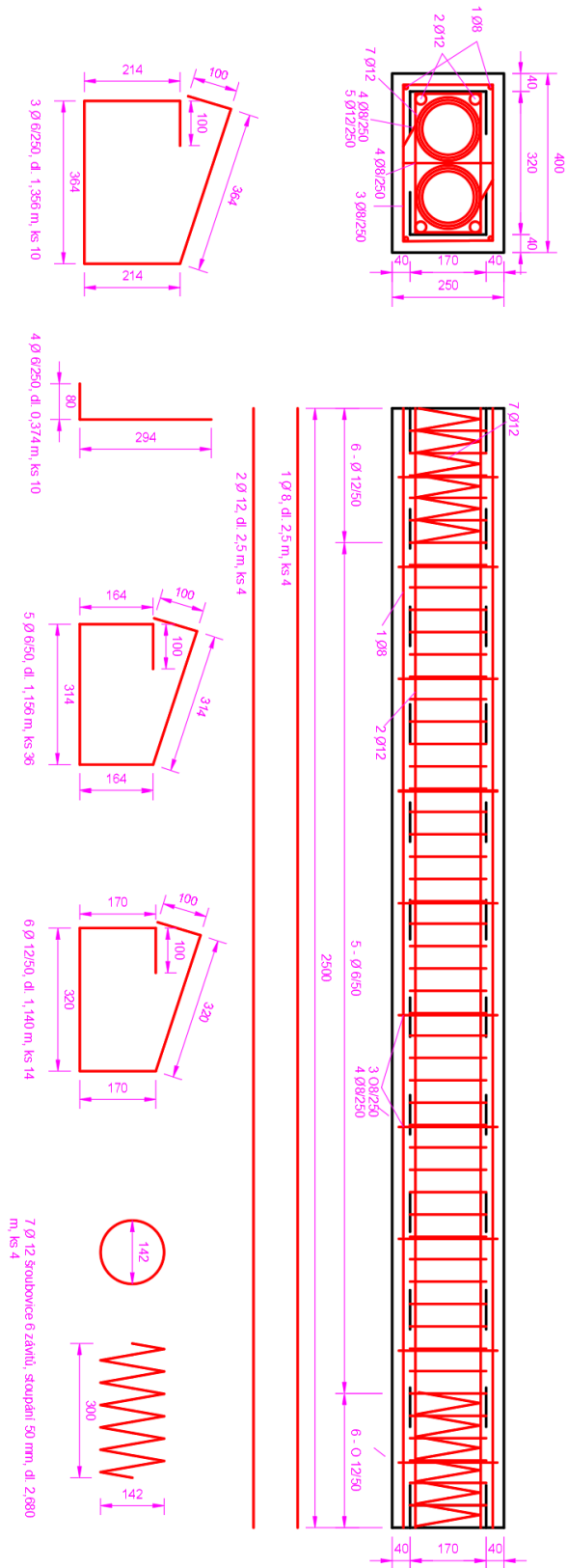
Podélná výztuž byla složena ze 4 prutů ve skořepině z UHPC délky 2500 mm a 4 kusů vnitřní výztuže ve výplňovém betonu.

Dále zde byly 2 šroubovice na obou koncích sloupu pro zachycení příčných sil s 6 závity s průměrem 142 mm se stoupáním 50 mm a délce 300 mm. Celková délka šroubovice byla 2680 mm.

Vnitřní třmínky byly obaleny pletivem s oky 5x5 mm, které vytváří vnitřní bednění skořepiny a výplňového betonu. Jsou zde dva typy třmínků s průměrem 6 mm a 12 mm po 50 mm uvnitř bednění. Další třmínky jsou jako vnitřní výztuž ve skořepině s průměrem 6 mm po 250 mm.

Součástí armování je i spona, která je jako vnitřní výztuha ve skořepině. Spona je ve tvaru L s délkou 80 mm a 294 mm po 250 mm a celkem 20 kusech a průměrem 6 mm.

Pro lepší manipulaci byly vloženy 4 betonářské tyče se závitem díky nechaným otvorům v bednění.



Obrázek 17: Výztuž sloupu

## 5.4 Zatěžovací stavy

### 5.4.1 Manipulace se skořepinou

#### Zavěšení za úchyty v horní vodorovné ploše sloupu

Tíha skořepiny  $F$  je počítána pro předpokládanou objemovou hmotnost  $25 \text{ KN/m}^3$ .

$$F = A * h * \rho = (0,4 * 0,25 - 0,32 * 0,17) * 2,5 * 25 = 2,85 \text{ KN}$$

Této síle odpovídá rovnoměrné napětí v příčném řezu skořepiny

$$\sigma = F/A = 2,85/(0,4 * 0,25 - 0,32 * 0,17) = 62,5 \text{ kN/m}^2.$$

#### Ohybové namáhání skořepiny

Se skořepinou bylo většinu času manipulováno v pozici naležato. Při uchycení na koncích ve vzdálenosti podpor  $2,5 \text{ m}$  bude skutečný ohybový moment od vlastní tíhy skořepiny

$$\begin{aligned} M &= \frac{1}{8} f * l^2 = \frac{1}{8} A * \rho * l^2 = \frac{1}{8} * (0,4 * 0,25 - 0,32 * 0,17) * 25 * 2,5^2 \\ &= 0,89 \text{ KNm} \end{aligned}$$

Tomu odpovídá napětí v tažených vláknech

$$\sigma = \frac{M}{I} * e = \frac{0,89}{0,001706} * 0,125 = 65,2 \text{ kN/m}^2$$

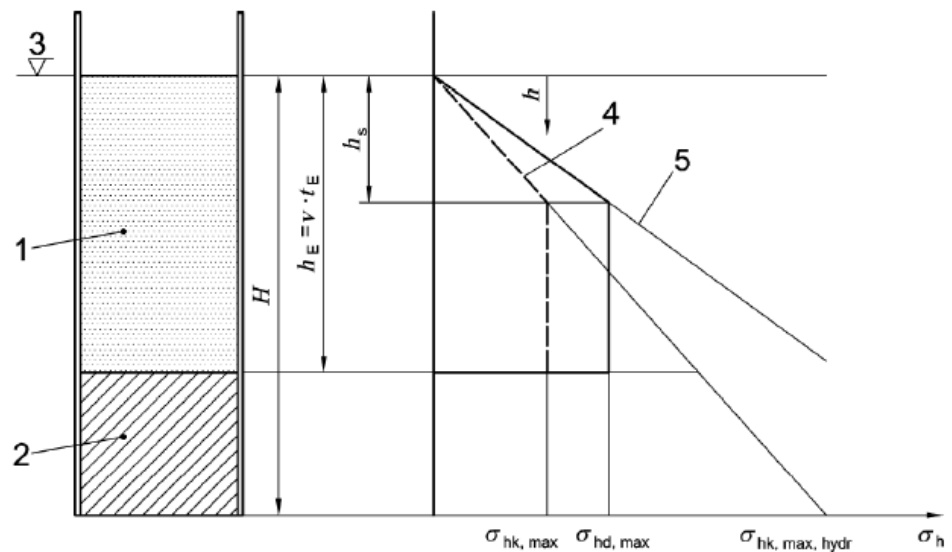
Toto tahové napětí je v obou případech výrazně pod tahovou pevností UHPC i při započítání dynamického součinitele nebo soudržnosti s podložkou.

### 5.4.2 Namáhání skořepiny při betonáži výplně

Ke zpracování betonové směsi je k dispozici řada technologických metod. Dle zvolené technologie je třeba přizpůsobit zpracovatelnost betonové směsi. Všechny způsoby zpracování mají za cíl nejen odstranit z uloženého betonu vzduchové mezery a póry, ale hlavně vytvořit homogenní strukturu, ve které budou v celém objemu stejnorodé vlastnosti. Použitím samozhutnitelných betonů při betonáži svislých konstrukcí vyvstává problém s bočním tlakem. Abychom mohli situaci řešit, je nezbytné zkoumat deformace materiálů v betonové směsi. Tím lze získat informace o chování betonu během zpracování a výsledně ovlivnit jeho vnitřní strukturu a mechanické vlastnosti.

Rozdělení tlaku čerstvého betonu po výšce je důležitým faktorem při návrhu a konstrukci betonových konstrukcí. Při ukládání čerstvého betonu na již ztuhlý beton je nutné zohlednit křivku hydrostatického tlaku čerstvého betonu.





Obrázek 18: Rozdělení tlaku čerstvého betonu po výšce, zdroj [48]

Křivka hydrostatického tlaku čerstvého betonu popisuje změnu tlaku v betonu s rostoucí hloubkou. Tlak vzroste s hloubkou podle hydrostatického tlaku, který závisí na objemové hmotnosti čerstvé směsi a výšce sloupce betonu nad zkoumaným místem. Tato křivka je obvykle vykreslena jako lineární funkce. Výsledná hodnota vodorovného tlaku od čerstvého betonu je charakteristická hodnota  $\sigma_{hk, \max}$ , která se používá při návrhu konstrukce.

Výška betonu při ukončení doby tuhnutí  $t_E$  je definována jako výška betonu od jeho povrchu po vrstvu s již ukončenou dobou tuhnutí, která získala dostatečnou pevnost. Hydrostatická výška  $h_s$  je výška betonu, při které se dosahuje maximálního hydrostatického tlaku. Tlak betonu na bednění závisí také na rychlosti ukládání směsi do bednění. To obvykle závisí na složitosti konstrukce a příčném profilu.

Podle normy ČSN 73 0042 je návrhová hodnota tlaku násobkem charakteristické hodnoty a dílčího součinitele  $\gamma_F$ , kde  $\gamma_F = 1,0$  při příznivě působících zatížení tlakem a  $\gamma_F = 1,5$  u nepříznivého působení tlaku. [48]

$$\sigma_{hd} = \sigma_{hk} \cdot \gamma_F$$

Pol.	Třída konzistence	Maximální vodorovný tlak čerstvého betonu, při směru ukládání proti směru výstavby (shora dolů) $\sigma_{hk,max}$ kN/m <sup>2</sup>
1	F1	$(5 \cdot v + 21) \cdot K1 \geq 25$
2	F2	$(10 \cdot v + 19) \cdot K1 \geq 25$
3	F3	$(14 \cdot v + 18) \cdot K1 \geq 25$
4	F4	$(17 \cdot v + 17) \cdot K1 \geq 25$
5	F5	$25 + 30 \cdot v \cdot K1 \geq 30$
6	F6	$25 + 38 \cdot v \cdot K1 \geq 30$
7	SCC	$25 + 33 \cdot v \cdot K1 \geq 30$

kde  
 $v$  je rychlost ukládání betonu v m/h,  
 $K1$  je součinitel pro uvážení chování betonu během tuhnutí podle tabulky 2.

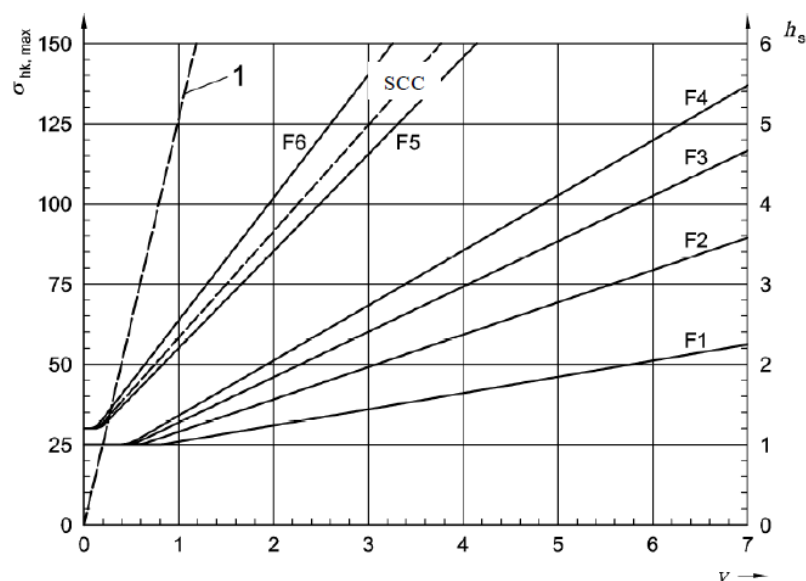
**Tabulka 6: Charakteristická hodnota maximálního vodorovného tlaku čerstvého betonu, zdroj: [48]**

Následující grafy a tabulky slouží ke stanovení maximálních charakteristických hodnot tlaku betonové směsi na bednění v závislosti na rychlosti ukládání betonové směsi pro různé konzistence a časy tuhnutí.

Pol.	Třída konzistence	Součinitele $K1$			
		Doba tuhnutí $t_E = 5$ h	Doba tuhnutí $t_E = 10$ h	Doba tuhnutí $t_E = 20$ h	Obecně <sup>b</sup>
1	F1 <sup>a</sup>	1,0	1,15	1,45	$1 + 0,03 (t_E - 5)$
2	F2 <sup>a</sup>	1,0	1,25	1,80	$1 + 0,053 (t_E - 5)$
3	F3 <sup>a</sup>	1,0	1,40	2,15	$1 + 0,077 (t_E - 5)$
4	F4 <sup>a</sup>	1,0	1,70	3,10	$1 + 0,14 (t_E - 5)$
5	F5, F6, SCC	1,0	2,00	4,00	$t_E / 5$

<sup>a</sup> Platí pro betonované úseky o výšce  $H$  do 10 m.  
<sup>b</sup> Platí pro doby tuhnutí v rozmezí  $5 \text{ h} \leq t_E \leq 20 \text{ h}$ .

**Tabulka 7: Součinitel způsobu tuhnutí  $K1$ , zdroj: [48]**



**Obrázek 19: Graf č. 1 pro stanovení tlaku čerstvého betonu  $\sigma_{hk,max}$  v závislosti na rychlosti plnění bednění a pro třídy konzistence v době  $t_E = 5$  hodin, zdroj: [48]**

Obrázek 19 ukazuje závislost rychlosti betonáže po výšce prvku a maximální hydrostatický tlak. Jednotlivé křivky odpovídají betonům různé konzistence. Pro výplňový beton předpokládáme konzistenci S3 – míra poklesu kužele je 100–150 mm – měkké směsi. Zatřídění konzistence v závislosti na míře poklesu je zobrazeno v tabulce.

Konzistence	Pokles [mm]	Popis
S1	10-40	zavlhle betonové směsi
S2	50-90	plastická
S3	100-150	měkká
S4	160-210	velmi měkká

**Tabulka 8: Konzistence při sednutí kužele**

Různé metody měření poskytují korelačně závislé výsledky a není vhodné nebo spolehlivé převádět výsledky z jedné metody na druhou. Tím pádem přepočítání mezi sednutím kužele S a zkouškou rozlité F není průkazné. Odhad S3 => F3.

Pro konzistenci F3 a předpokládanou dobu plnění sloupu 10 min platí:

$$v = \frac{2,5}{10} \text{ m/min} \Rightarrow 15 \text{ m/hod}$$

$$t_E = 5 \text{ h}$$

$$K1 = 1$$

$$\sigma_{hk,max} = (14 * v + 18) * K1 = 14 * 15 + 18 = 228 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_{hd} = \sigma_{hk} * \gamma_F = 228 * 1,5 \text{ kN/m}^2 = 342 \text{ kN/m}^2$$

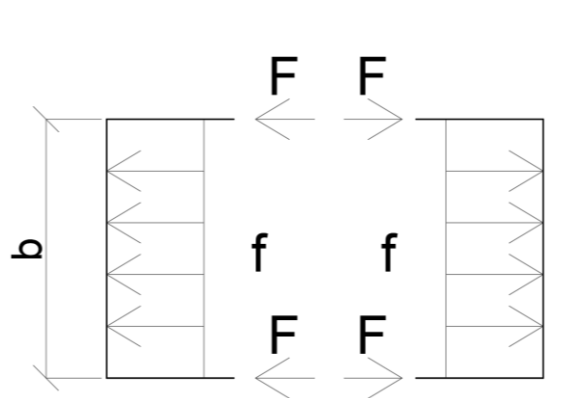
Tlak betonu na bednění bude počítán hydrostaticky. Uvažovaná objemová hmotnost čerstvé směsi je  $23 \text{ kN/m}^3$ .

$$\sigma_{hk.max} = h * \rho = 2,5 * 23 = 57,5 \text{ kN/m}^2$$

Pro ověření únosnosti skořepiny je třeba brát v úvahu tahové zatížení skořepiny a současně ohybové namáhání čerstvou směsí. Moment setrvačnosti stěny skořepiny pro výšku 1 m bez započítání výztuže je

$$I = \frac{1}{12}bh^3 = \frac{1}{12} * 1 * 0,04^3 = 5,333 * 10^{-6} \text{ m}^4$$

Napětí ve stěně skořepiny je pro posouzení rozděleno na tahovou složku a napětí od ohybového momentu. Pro výpočet tahového napětí se předpokládá, že zatížení na protilehlé stěny  $f$  skořepiny se přenáší v kolmých stěnách jako tahové síly  $F$ , což je znázorněno na Obrázku 20. Ohybový moment je pro zjednodušení počítán jako moment na oboustranně vetknuté desce. Skořepina vnějšího rozměru je aproximována na střednici, která tvoří obdélník  $360 \times 210 \text{ mm}$ .



Obrázek 20: tahové namáhání stěny skořepiny

Průběh momentu na obou straně vetknutém nosníku zatíženým spojitým zatížením

Tahové napětí v kratší straně:

$$F = f * \frac{b}{2} = 57,5 * 0,32/2 = 9,2 \text{ kN}$$

$$\sigma = \frac{F}{A_b} = \frac{9,2}{1 * 0,04} = 230 \text{ kPa}$$

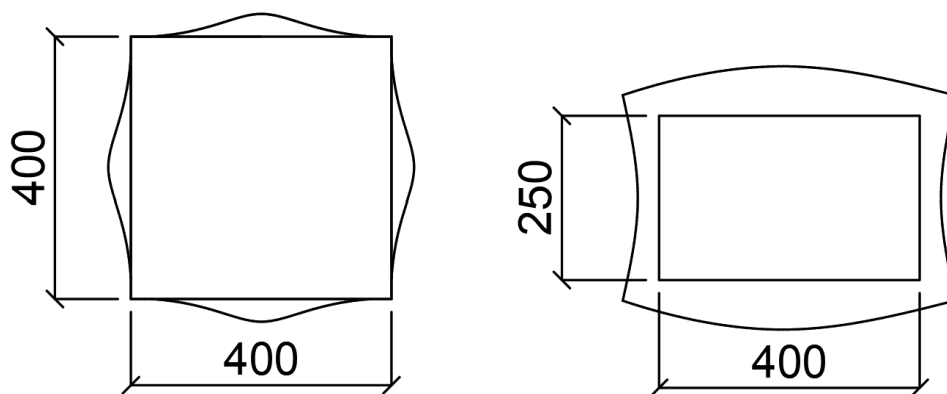
Rozdíl záporného a kladného momentu na delší straně:

$$\Delta M_k = \frac{1}{8}fL^2 = \frac{1}{8} * 57,5 * 0,21^2 = 0,32 \text{ kNm}$$

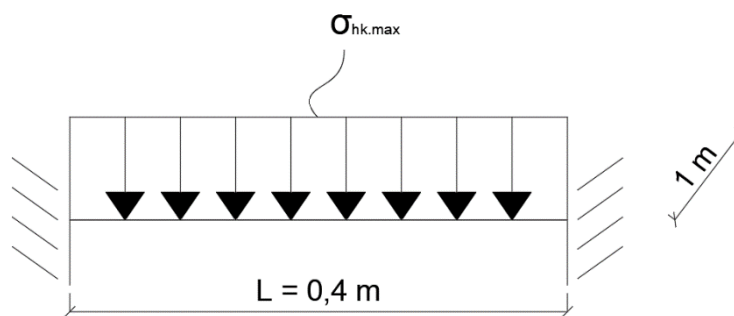
$$\Delta\sigma = \frac{\Delta M}{I} * e = \frac{0,32}{5,333 * 10^{-6}} * 0,02 = 1,2 \text{ MPa}$$

Při uvažování oboustranně vetknutého nosníku by byl moment  $\Delta M_k$  rozdělen na 1/3 v poli a 2/3 nad podporou s opačným znaménkem. To by znamenalo, že kritický průřez je poblíž rohu skořepiny. Výpočet výše ukazuje, že i při započítání celé hodnoty tahového napětí  $\Delta\sigma + \sigma$  je namáhání zanedbatelné ve srovnání s tahovou pevností UHPC.

Odhad průhybu skořepiny je počítán jako průhyb oboustranně vetknuté desky, která reprezentuje stěnu sloupu. Tento model odpovídá čtvercovému průřezu sloupu, kde nedochází k natočení v rozích skořepiny viz Obrázek 24. Zatížení odpovídá výšce tekutého betonu 2,5 m.



Obrázek 21: Porovnání deformace čtvercového a obdélníkového průřezu sloupu

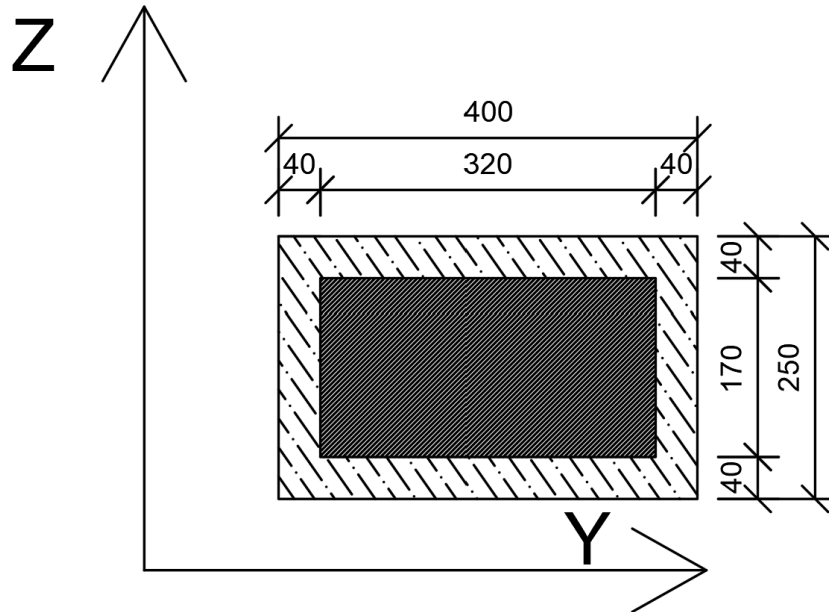


Obrázek 22: Zatížení strany sloupu

$$w_{sy} = \frac{\sigma_{hk.max} * L^4}{384 * E_u I_{yu}} = \frac{57,5 * 0,4^4}{384 * 46,7 * 10^6 * 5,333 * 10^{-6}} = 0,0154 \text{ mm}$$

Průhyb skořepiny od tlaku čerstvé směsi výplňového betonu je zcela zanedbatelný.

### 5.4.3 Odhad vzpěrné únosnosti sloupu



Obrázek 23: Příčný řez sloupu

1) Výpočet momentu setrvačnosti

A) Celý průřez

$$I_{zc} = \frac{1}{12}bh^3 + \left(\frac{h}{2}\right)^2 bh = \frac{1}{3}bh^3 = \frac{1}{3} 0,25 * 0,4^3 = 0,005333 \text{ m}^4$$

$$I_{yc} = \frac{1}{12}b^3h + \left(\frac{b}{2}\right)^2 bh = \frac{1}{3}hb^3 = \frac{1}{3} 0,4 * 0,25^3 = 0,002083 \text{ m}^4$$

B) Výplň – prostý beton

$$I_{zb} = \frac{1}{12}b_b h_b^3 + \left(\frac{h_b}{2}\right)^2 b_b h_b = \frac{1}{3}b_b h_b^3 = \frac{1}{3} 0,17 * 0,32^3 = 0,001857 \text{ m}^4$$

$$I_{yb} = \frac{1}{12}b_b^3 h_b + \left(\frac{b_b}{2}\right)^2 b_b h_b = \frac{1}{3}h_b b_b^3 = \frac{1}{3} 0,23 * 0,17^3 = 0,000377 \text{ m}^4$$

C) Skořepina z UHPC

$$I_{zu} = I_{zc} - I_{zp} = 0,005333 - 0,001857 = 0,003493 \text{ m}^4$$

$$I_{yu} = I_{yc} - I_{yp} = 0,002083 - 0,000377 = 0,001706 \text{ m}^4$$

2) Výpočet štíhlosti sloupu

$$A = bh = 0,25 \times 0,4 = 0,1 \text{ m}^2$$

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}}$$

$$i_z = \sqrt{\frac{I_x}{A}} = \sqrt{\frac{0,005333}{0,1}} = 0,230868 \text{ m}$$

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = \sqrt{\frac{0,002083}{0,1}} = 0,144326 \text{ m}$$

$$\lambda_{lim} > 39$$

$$\lambda_z = \frac{L_{vzy}}{i_z} = \frac{2,5}{0,230868} = 10,8287 \rightarrow \text{masivní prvek}$$

$$\lambda_y = \frac{L_{vzy}}{i_y} = \frac{2,5}{0,144326} = 17,3219 \rightarrow \text{masivní prvek}$$

### 3) Výstřednost

Pro zjednodušení se výstřednost počítá jako:

$$e_i = \frac{l_0}{400} = \frac{2500 \text{ mm}}{400} = 6,25 \text{ mm}$$

### 4) Odhad kritické síly:

$$F_{ky} = \frac{(E_b I_{yb} + E_u I_{yu}) \pi^2}{L^2_{vzy}} = \frac{(31 * 0,000377 + 46,7 * 0,001706) * \pi^2}{2,5^2} \text{ MN}$$

$$= 144,3 \text{ MN}$$

$$F_{kz} = \frac{(E_b I_{zb} + E_u I_{zu}) \pi^2}{L^2_{vzy}} = \frac{(31 * 0,001857 + 46,7 * 0,003493) * \pi^2}{2,5^2} \text{ MN}$$

$$= 348,5 \text{ MN}$$

Vzpěrné únosnosti bude dosaženo při 144,3 MN.

#### 5.4.4 Odhad tlakové únosnosti

Během tohoto výpočtu byla odhadnuta maximální únosnost sloupu v tlaku, avšak tato hodnota by měla být brána pouze jako horní odhad, neboť v konstrukci se budou vyskytovat i příčné tlakové síly, které by mohly zabránit dosažení této hodnoty. Při dosažení této hodnoty by došlo k drcení výplňového betonu i UHPC v svislém tlaku. Nicméně, v případě konstrukce se předpokládá dosažení meze pevnosti obou materiálů při stejné poměrné deformaci, což experimenty přibližně potvrzují.

$$F = A_u * \sigma_u + A_b * \sigma_b = (0,4 * 0,25 - 0,32 * 0,17) * 112,45 + 2,5 * 0,32 * 0,17 * 42,82 = 10,951 \text{ MN}$$

#### 5.5 Výroba sloupu

Příprava bednění a výztuže probíhala na Rohanském ostrově v Praze. Sloup se betonoval naležato a vnitřní dutý prostor byl bedněn mřížkou s oky velikosti 5x5 mm. Pro betonáž byla použita receptura UHPC od TBG Metrostav a směs byla z míchačky dopravena k nosníku pomocí autodomíchávače. Nejprve byly vytvořeny pomocné vzorky a směs se začala aplikovat až když začala tuhnout, aby neprotékala oky mřížky. Vhodnou konzistenci určil technolog betonárny.

O 7 dní později proběhla betonáž výplně sloupu ve stoje a za 60 dní následovala zatěžovací zkouška.

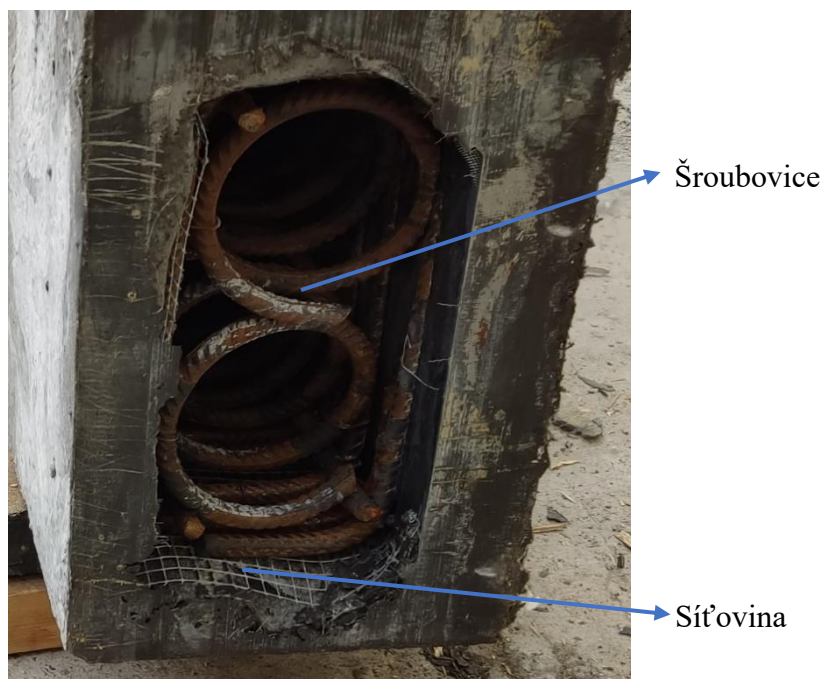
Složka	Hm. procento
Pojivo	15,4
Kamenivo	75,9
Voda	8,7

Tabulka 9: Složení výplně sloupu – hmotnostní procenta





**Obrázek 24: Škořepina + výztuž sloupu**



**Obrázek 25: Síťovina + výztuž sloupu**

## 5.6 Zatěžování

Sloup byl vložen pomocí halového jeřábu do lisu, kde následně probíhalo zatížení. Zkouška trvala 6 minut a 13 sekund. Maximální zatížení, co sloup přenesl, bylo 4629 kN. Na hlavě sloupu byla roznášecí ocelová deska tloušťky 4 cm. Přímo na sloupu byla 2-3 mm tlustá vrstva z pytlovaného UHPC, která zajišťovala rovnoměrné zatížení horního povrchu, aby se sloup zatížil rovnoměrně. Zkouška skončila předčasně destrukcí horní části sloupu, kvůli působení příčného tahu.



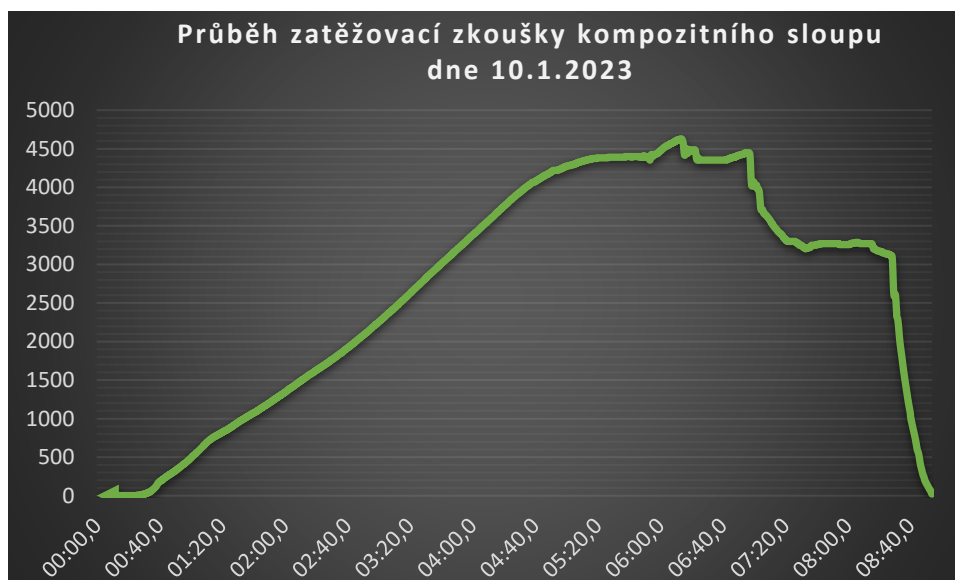
Obrázek 26: Betonový sloup ze skořepiny z UHPC

## 5.7 Experimentální výsledky

Zkouška prokázala únosnost sloupu 4,6 MN. Průběh zatížení v čase je zobrazen na Obrázku 28. Destrukci předcházela oblast plastického chování sloupu. Poškození sloupu po provedené zkoušce je vidět na Obr. 27.



Obrázek 27: Destrukce horní části sloupu



Obrázek 28: Graf zatěžovací zkoušky v závislosti na čase,  $F_{max} = 4629$  kN

## 6 Závěr

Byly popsány vlastnosti ultra vysokovýkonného betonu (UHPC) a jeho aplikace v ČR i zahraničí. Bylo prokázáno, že UHPC má mnoho výhod oproti jiným betonovým směsím, jako je vysoká pevnost, trvanlivost a odolnost proti vlhkosti a mrazu. Byly prezentovány konkrétní příklady použití UHPC v oblasti konstrukce mostů, panelů a průmyslových podlah.

Druhá část se věnovala popisu a vyhodnocení přípravy a destrukční zkoušky kompozitního sloupu. Byly provedeny kontrolní výpočty, které ověřovaly správnost návrhu sloupu. Byl také spočítán horní odhad tlakové únosnosti sloupu, což je hodnota, která je směrodatná pro výběr zatěžovacího lisu.

Při zkoušce došlo ke kolapsu sloupu ve vrchní části. Poškození ukazuje, že i přes použití ztužujících prvků ve formě šroubovice a třmínků došlo k destrukci vlivem příčných tahů. Je tedy třeba věnovat zvýšenou pozornost těmto oblastem. Tato oblast reprezentuje napojení stativa na dřík pilíře nebo spojení nosníku přímo s pilířem. Tento mód porušení naznačuje, že zejména horní napojení pilíře vyžaduje větší míru příčného vyztužení. Alternativně by se tato část sloupu mohla zcela vytvořit z UHPC, což by poskytlo vyšší pevnost a menší náchylnost k poškození. Vznikla by ale nutnost betonáže výplně v poloze opačné, tedy spodní otevřená část by musela být směrem nahoru.

Závěrem této bakalářské práce lze konstatovat, že UHPC se jeví jako slibný materiál budoucnosti v oblasti stavebnictví. S jeho výjimečnými vlastnostmi, jako je vysoká pevnost, trvanlivost a odolnost vůči vnějším vlivům, otevírá UHPC nové možnosti inovativním konstrukčním řešením.

# Seznam literatury

## Tištěné zdroje informací

- [1] AÏTCIN, Pierre-Claude. *Vysokohodnotný beton*. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) a Českou betonářskou společnost vydalo Informační centrum ČKAIT, 2005. Betonové stavitelství. ISBN 80-86769-39-9
- [2] FEHLING, E. et al. *Ultra-High Performance Concrete UHPC: Fundamentals, Design, Examples*. Wilhelm Ernst & Sohn Verlag für Architektur und Technische, 2015.
- [3] GANI, Mary S. J. *Cement and concrete*. London: Chapman & Hall, 1997. London, 1997. ISBN 04-127-9050-5.
- [4] ULTRA VYSOKOHODNOTNÝ BETONU: Technická pravidla ČBS 07. Praha, 2022. ISBN 978-80-907611-7-9.

## Internetové zdroje informací

- [5] Ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. *Case Studies in Construction Materials* [online]. [cit. 2023-03-12]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509522004211>
- [6] *POSOUZENÍ RIZIKA ZTRÁTY VZPĚRNÉ STABILITY PRUTU ZE DVOU RŮZNÝCH MATERIÁLŮ* [online]. Brno, 2013 [cit. 2023-03-16]. Dostupné z: [https://www.vut.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=65841](https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=65841). Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Prof. Ing. JIŘÍ BURŠA, Ph.D.
- [7] *Strojírenská technologie: časopis kateder obrábění a montáže a kateder příbuzných České a Slovenské republiky*. Ústí nad Labem: ÚJEP. ISSN issn1211–4162.
- [8] *EBETON* [online]. 2019. [cit. 2023-03-12]. Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/pojmy/slozeni-uhpc-a-porovnani-s-hpc-a-nsc/>
- [9] *Využití UHPC v konstrukcích pozemních staveb* [online]. Praha, 2012 [cit. 2023-03-12]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10467/92954>. Diplomová práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. Vedoucí práce Martin Tipka.
- [10] *PŘÍMĚSI OVLIVŇUJÍCÍ TUHNUTÍ PORTLANDSKÉHO CEMENTU* [online]. Brno, 2012 [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/30296061.pdf>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.

- [11] ULTRA-VYSOKO HODNOTNÉ BETONY. *KŠ PREFA* [online]. 2023 [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: <https://ksprefa.cz/produkty/uhpc/>
- [12] Unikátní lávky a mosty z UHPC. *Silnice-zeleznice* [online]. 2019 [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: <https://silnice-zeleznice.cz/silnice/unikatni-lavky-a-mosty-z-uhpc-37>
- [13] TYBET INVEST. *BETON A BETONOVÉ SMĚSI* [online]. [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: <http://www.btn.cz/cenik.html>
- [14] *Ultra-high-performance concrete: Constituents, mechanical properties, applications and current challenges* [online]. 2021 [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509521000747>
- [15] Ultra-vysokopevnostní beton TOPCRETE. *TBG METROSTAV s.r.o.* [online]. [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: <https://www.tbg-metrostav.cz/produkty/ultra-vysokopevnostni-beton-uhpc-topcrete/>
- [16] *První použití ultravysokopevnostního transportbetonu v ČR* [online]. 2020 [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: [https://www.imaterialy.cz/rubriky/materialy/prvni-pouziti-ultravysokopevnostniho-transportbetonu-v-cr\\_104841.html](https://www.imaterialy.cz/rubriky/materialy/prvni-pouziti-ultravysokopevnostniho-transportbetonu-v-cr_104841.html)
- [17] *ULTRAZVUKOVÁ ZKOUŠKA* [online]. [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: <https://papco.cz/ultrazvukova-zkouska/>
- [18] UHPC – pevnost v tahu za ohybu. *Ebeton* [online]. [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/pojmy/uhpc-pevnost-v-tahu-za-ohybu-2/>
- [19] ZHOU, Zhidong a Pizhong QIAO. *Direct Tension Test for Characterization of Tensile Behavior of Ultra-High Performance Concrete* [online]. 2020 [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/329333256\\_Direct\\_Tension\\_Test\\_for\\_Characterization\\_of\\_Tensile\\_Behavior\\_of\\_Ultra-High\\_Performance\\_Concrete](https://www.researchgate.net/publication/329333256_Direct_Tension_Test_for_Characterization_of_Tensile_Behavior_of_Ultra-High_Performance_Concrete)
- [20] Compression Response of a Rapid-Strengthening Ultra-High Performance Concrete Formulation. *TECHBRIEF* [online]. 2012 [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/hpc/12064/index.cfm>
- [21] *Odolnost betonu proti CHRL* [online]. Praha, 2019 [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: [https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/81007/F1-DP-2019-Hobza-Jakub-Diplomova%20prace\\_Hobza.pdf?sequence=-1&isAllowed=y](https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/81007/F1-DP-2019-Hobza-Jakub-Diplomova%20prace_Hobza.pdf?sequence=-1&isAllowed=y). Diplomová práce. České vysoké učení technické.
- [22] The potentials of our concrete. *HICON* [online]. 2017 [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: <https://hi-con.blog/2017/05/31/fire-resistance-is-it-a-problem-for-uhpc/>

- [23] *Zastavení č. 21 - Lávka přes Labe* [online]. 2015 [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: <https://www.celakovice.cz/cs/informace/naucna-stezka/zastaveni-c-21-lavka-pres-labe.html>
- [24] *Lávka přes Dřetovický potok* [online]. 2019 [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: <https://www.archiweb.cz/b/lavka-pres-dretovicky-potok>
- [25] *Panely mostního zábradlí z UHPC* [online]. 2020 [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: [https://www.imaterialy.cz/rubriky/materialy/panely-mostniho-zabradli-z-uhpc\\_43824.html](https://www.imaterialy.cz/rubriky/materialy/panely-mostniho-zabradli-z-uhpc_43824.html)
- [26] VÍTEK, Petr. *Lávka z UHPC přes Vltavu v Lužci* [online]. (11) [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: <https://www.casopisstavebnictvi.cz/clanky-lavka-z-uhpc-pres-vltavu-v-luzci.html>
- [27] *UHPC Roofing of Montpellier TGV Station* [online]. [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: <https://www.archdaily.com/catalog/us/products/15441/uhpc-roofing-of-montpellier-tgv-station-ductal>
- [28] Petr. *Rušná Marseille mění svou tvář* [online]. 2017 [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: <https://www.novinky.cz/clanek/cestovani-rusna-marseille-meni-svou-tvar-40038797>
- [29] AYERS, Andrew. *Coq of the walk: MuCEM, Marseille, France by Rudy Ricciotti* [online]. [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: <https://www.architectural-review.com/today/coq-of-the-walk-mucem-marseille-france-by-rudy-ricciotti>
- [30] *Most míru v Soulu* [online]. 2018 [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: <https://www.planete-tp.com/en/peace-bridge-in-seoul-a892.html>
- [31] VICENZINO, Enzo. *First Use of UHPFRC in Thin Precast Concrete Roof Shell For Canadian LRT Station* [online]. 2005 [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/First-Use-of-UHPFRC-in-Thin-Precast-Concrete-Roof-Vicenzino-Culham/5d92fe8c5a597b4c4c5975c5bd8e3bb2779504e9>
- [32] SCHUTOVÁ, Veronika. STEEL FIBRE CONCRETE AS BALLISTIC PROTECTION [online]. 2022, 2022, 113 [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/99621>
- [33] J-Ring Test Set. In: Humboldt: Construction Materials Testing Equipment [online]. [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://www.humboldtmfg.com/j-ring-test-set-for-self-consolidating-concrete.html>
- [34] LMORSY, M. a W.M. HASSAN. Seismic behavior of ultra-high performance concrete elements: State-of-the-art review and test database and trends [online]. In: [cit. 2023-05-13]. ISSN 2352-7102. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710221004307>

- [35] Chillon Viaduct. Structurae [online]. 2017 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://structurae.net/en/structures/chillon-viaduct>
- [36] Field Testing of an Ultra-High Performance Concrete Overlay [online]. 2017. říjen 2017 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/bridge/17096/003.cfm>

## Zdroje obrázků

- [37] ŠMÍD, Karel. VLIV TUHNUTÍ BETONU NA VÝVOJ TLAKU V BEDNĚNÍ [online]. In: Plzeň, 2021 [cit. 2023-04-28]. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/43528/1/Diplomova%20prace%20-%20Vliv%20tuhnuti%20betonu%20na%20vyvoj%20tlaku%20v%20bedneni%20-%20Karel%20Smid.pdf>
- [38] Zastavení č. 21 - Lávka přes Labe. In: *Čelákovice oficiální portál města* [online]. Město Čelákovice, 2015 [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: <https://www.celakovice.cz/cs/informace/naucna-stezka/zastaveni-c-21-lavka-pres-labe.html>
- [39] KOLÍSKO, Jiří. Lávka přes Dřetovický potok. In: *Lávka přes Dřetovický potok* [online]. Praha, 2019 [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: <https://www.archiweb.cz/b/lavka-pres-dretovicky-potok>
- [40] Panely mostního zábradlí z UHPC. In: *IMateriály* [online]. 2016 [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: [https://www.imaterialy.cz/rubriky/materialy/panely-mostniho-zabradli-z-uhpc\\_43824.html](https://www.imaterialy.cz/rubriky/materialy/panely-mostniho-zabradli-z-uhpc_43824.html)
- [41] *Lužec nad Vltavou* [online]. In: 2021 [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: <https://www.luzec.cz/dalsi-oceneni-lavky-pres-vltavu-cena-hlavniho-medialniho-partnera-casopisu-stavebnictvi/>
- [42] Rušná Marseille mění svou tvář. In: *Novinky* [online]. Praha, 2017 [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: <https://www.novinky.cz/clanek/cestovani-rusna-marseille-meni-svou-tvar-40038797>
- [43] FILIGRANES GITTERWERK AUS ULTRA-HOCHLEISTUNGSBETON. In: *Mucem in Marseille* [online]. 2015 [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: <https://www.baunetzwissen.de/beton/objekte/kultur/mucem-in-marseille-3259273/gallery-1/3>
- [44] Peace Bridge in Seoul. In: *All about public works* [online]. 2008 [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: <https://www.planete-tp.com/en/peace-bridge-in-seoul-a892.html>



- [45] PERRY, Vic. In: *First use of ultra-high performance concrete for an innovative train station canopy* [online]. 2004 [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/285832047\\_First\\_use\\_of\\_ultra-high\\_performance\\_concrete\\_for\\_an\\_innovative\\_train\\_station\\_canopy](https://www.researchgate.net/publication/285832047_First_use_of_ultra-high_performance_concrete_for_an_innovative_train_station_canopy)
- [46] SIMUNEK. BL01 - 10 přednáška. In: *Prvky betonových konstrukcí* [online]. Praha [cit. 2023-04-28]. Dostupné z: [https://www.fce.vutbr.cz/BZK/simunek.p/BL01/BL01\\_10\\_prednaska.pdf](https://www.fce.vutbr.cz/BZK/simunek.p/BL01/BL01_10_prednaska.pdf)
- [47] NÁVAROVÁ, Vladislava. Stavební konstrukce. In: PRUTY DOSTŘEDNĚ TLAČENÉ [online]. České Budějovice, 2014, 15.1.2014 [cit. 2023-04-28]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/12471527/>
- [48] ČSN 73 0042 Tlaky čerstvého betonu na svislé konstrukce bednění. Praha: Kloknerův ústav, ČVUT v Praze, 2012.
- [49] VÝPOČET PRŮHYBU NOSNÍKU. In: TECHNICKÉ VÝPOČTY [online]. 2017 [cit. 2023-04-28]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/technicke-vypocty/18-vypocet-pruhybu-nosniku/38-vypocet-pruhybu-staticky-neurcite-nosniky/127-vypocet-pruhybu-staticky-neurciteho-nosniku>
- [50] Chillon Viaduct. In: Structurae [online]. USA, 2017 [cit. 2023-05-18]. Dostupné z: <https://structurae.net/en/structures/chillon-viaduct>
- [51] Field Testing of an Ultra-High Performance Concrete Overlay [online]. 2017. říjen 2017 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/bridge/17096/003.cfm>