ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ

Katedra betonových a zděných konstrukcí

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Experimentální ověření betonových prvků zesílených pomocí UHPC

Experimental verification of concrete members strenghtened with UHPC

Bc. Adam Čítek

2019

Vedoucí bakalářské práce: prof. Ing. Jan Vítek, CSc.

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta stavební
Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Čítek Jméno: Adam Osobní číslo: 401253

Zadávající katedra: K133 - Katedra betonových a zděných konstrukcí

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Experimentální ověření betonových prvků zesílených pomocí UHPC

Název diplomové práce anglicky: Experimental verification of concrete members strengthened with UHPC

Pokyny pro vypracování:
Vyhodnocení ohybových zkoušek. Návrh zkoušky na protlačení.

Seznam doporučené literatury:
ČSN EN 1990 Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí
Martín-Sanz, H., Chatzi, E. and Brühwiler, E.: THE USE OF ULTRA HIGH PERFORMANCE FIBRE REINFORCED CEMENT-BASED COMPOSITES IN REHABILITATION PROJECTS
Metodika 1 - Metodika pro návrh UHPC a pro materiálové zkoušky
Metodika 2 - Medtodika pro navrhování prvků z UHPC

Jméno vedoucího diplomové práce: prof. Ing. Jan Vítek, CSc.

Datum zadání diplomové práce: 1.10.2018 Termín odevzdání diplomové práce: 6.1.2019
Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

[redacted]
Podpis vedoucího práce

[redacted]
Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové 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".

1.10.2018
Datum převzetí zadání

[redacted]
Podpis studenta(ky)

Čestné prohlášení:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Experimentální ověření betonových prvků zesílených pomocí UHPC“ vypracoval samostatně pod vedením prof. Ing. Jana Vítka, CSc., a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v přiloženém seznamu.

Bc. Adam Čítek

V …… dne ..... *……..….*

Poděkování:

Chtěl bych tímto poděkovat zejména vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Janu Vítkovi, CSc. za jeho trpělivost a čas, kdy mi poskytl mnoho nezbytných informací k dané problematice. Také bych chtěl poděkovat všem účastníkům projektu č. FV20472 „Aplikace vysokohodnotných cementových kompozitů na rekonstrukce betonových staveb“ probíhající za podpory MPO ČR, jehož výsledky jsou využity v této práci.

Abstrakt

Tato práce se zabývá experimentálním ověřením betonových prvků zesílených pomocí UHPC. V úvodních kapitolách jsou uvedeny základní informace o ultra-vysokohodnotných betonech, o jejich použití pro zesilování konstrukcí a o problematice soudržnosti UHPC a podkladního betonu. Hlavní část práce je rozdělena do několika dílčích částí. První část se zabývá přípravou, provedením a vyhodnocením ohybových zkoušek betonových prvků, které byly zesíleny vrstvou UHPC. V další části práce bylo provedeno experimentální ověření kontaktu UHPC a podkladního betonu. Závěrečná část práce se zabývá návrhem průběhu zkoušky na protlačení. Výsledky zkoušek potvrdili předpoklad, že při vhodné povrchové úpravě podkladního betonu, lze dosáhnout spolupůsobení obou materiálů bez použití spřahovacích prvků.

Klíčová slova

Ultra-vysokohodnotný beton, UHPC, betonové konstrukce, zesilování betonových konstrukcí, experiment, ohybová zkouška, soudržnost, delaminace, zkouška na protlačení

Abstract

This thesis deals with the experimental verification of concrete members strenghtened with UHPC. Basic information about Ultra-High- Performance Concrete are given in the introduction. One of the main purpose is to define the bond between UHPC overlay and and the existing concrete structure. The main part of the thesis is divided into several sub-parts. The first part deals with the preparation, execution and evaluation of bending tests of concrete elements strengthened by an UHPC overlay. In the next part of the thesis an experimental verification of contact between UHPC and concrete was carried out. The final part of the thesis deals with the design of punching shear test. The test results confirmed that, when the surface finishes of the concrete substrate surface are appropriate, the interaction of both materials can be achieved without the use of connectors.

Keywords

Ultra-high performance concrete, UHPC, concrete structures, strengthening concrete structures, experiment, bending test, bond, delamination, punching shear test

Obsah

1 ÚVOD 7
2 CÍLE PRÁCE 9
3 DŮVODY PROČ ZESILOVAT KONSTRUKCE 10
4 UHPC 12
4.1 Vlastnosti UHPC 12
4.2 Složení UHPC 13
4.2.1 Kamenivo 13
4.2.2 Cement 14
4.2.3 Příměsi 14
4.2.3.1 Latentně hydraulické příměsi 14
4.2.3.2 Inertní příměsi 15
4.2.4 Rozptýlená výztuž 15
4.2.5 Superplasifikátory 15
5 POUŽITÍ UHPC PRO ZESILOVÁNÍ BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ 16
5.1 Motivace 16
5.2 Základní princip 16
5.2.1 Zesílení na ohybové namáhání 16
5.2.2 Zesílení na tlakové namáhání 18
5.2.3 Zesílení na smykové namáhání 19
5.2.4 Zesilování na abrazivní opotřebení 20
5.3 Soudržnost vrstvy UHPC s povrchem původního betonu 21
5.3.1 Faktory ovlivňující soudržnost 21
5.3.1.1 Čistota povrchu 21
5.3.1.2 Povrchové úpravy podkladu 22
5.3.1.3 Vlhkost povrchu 22
5.4 Příklady realizovaných projektů 23
6 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST 26
6.1 Cíle experimentů 26
6.2 Diagnostika železobetonových prvků pro ohybové zkoušky 27
6.2.1 Vyztužení 27

6.2.2 Beton ... 29
6.2.2.1 Destruktivní zkoušky pevnosti betonu v tlaku ... 29
6.2.2.2 Nedestruktivní zkoušky pevnosti betonu v tlaku ... 31
6.3 Krátkodobé ohybové zkoušky zesílených železobetonových prvků ... 32
6.3.1 Příprava zkušebních prvků ... 32
6.3.2 Výpočet ohybové únosnosti zkušebních prvků ... 35
6.3.3 Průběh krátkodobých ohybových zkoušek ... 39
6.3.4 Výsledky krátkodobých ohybových zkoušek ... 41
6.4 Experimentální ověření kontaktu zesilující vrstvy UHPC a původního betonu ... 51
6.4.1 Povrchové úpravy ... 51
6.4.2 Odtrhové zkoušky upravených povrchů ... 55
6.4.3 Tahové zkoušky na ověření kontaktu vrstvy UHPC a upravených povrchů ... 57
6.4.3.1 Odtrhové zkoušky ... 61
6.4.3.2 Tahové zkoušky na jádrových vývrtech ... 65
6.4.4 Shrnutí výsledků ... 73
6.5 Návrh zkoušky na protlačení ... 75
6.5.1 Příprava zkušebních vzorků ... 75
6.5.2 Zkušební systém a průběh zkoušky ... 75
6.5.3 Návrh referenčního prvku ... 76
7 ZÁVĚR ... 81
8 SEZNAM LITERATURY ... 83
9 SEZNAM OBRÁZKŮ ... 85
10 SEZNAM TABULEK ... 89
11 POUŽITÝ SOFTWARE ... 90

1 ÚVOD

Vzhledem k návrhovým životnostem betonových konstrukcí pomalu nastává doba, kdy se značná část betonových konstrukcí postavených v minulém století začíná blížit ke konci své životnosti. Z mnoha hledisek není možné všechny tyto konstrukce po překročení životnosti zbourat a postavit nové. Zejména se jedná o důležité dopravní stavby, na kterých nelze na delší dobu přerušit provoz. V některých případech se jako optimální varianta jeví rekonstrukce těchto konstrukcí. V neposlední řadě je nutné také konstrukce zesilovat. Z ekonomického hlediska se jedná o výhodnou alternativu ke stavbě nové konstrukce, která by nahradila stávající nevyhovující konstrukci. Hlavním cílem zesilování stavebních konstrukcí je zvýšení jejich únosnosti. Je nutné ale zajistit i dostatečnou trvanlivost oprav, aby tak konstrukce mohla plnit po navrženou dobu svůj účel. Co se týče právě dostatečné trvanlivosti oprav, nejsou konvenční postupy natolik účinné. Je tedy nezbytné hledat nové materiály a postupy, které by oba tyto cíle splňovaly.

Jedním z těchto nových materiálů je ultra-vysokohodnotný beton. Jedná se o cementokompozitní materiál, který vyniká nejenom svými vysokými technickými parametry, ale i svojí trvanlivostí a odolností vůči působení agresivních látek.

Ultra-vysokohodnotné betony se již v zahraničí úspěšně používají na opravy, rekonstrukce a zesilování zejména dopravních nebo vodohospodářských konstrukcí. Jako příklad můžeme uvést viadukt Chillon ve Švýcarku, kde bylo během let 2014 až 2015 úspěšně použito UHPC na zesílení přibližně 25000 m^2 mostovky. [10]

Použitím UHPC pro zesilování lze na původní prvek aplikovat relativně tenké vrstvy, které přesto zajistí výrazné zvýšení únosnosti a trvanlivosti, ale na prvek není přidáváno výrazně velké trvalé zatížení.

Podle provedených zahraničních výzkumů, lze zajistit spolupůsobení vrstvy UHPC a podkladního betonu pouze jejich mechanickou soudržností na styčných plochách. [8], [15]

Tato diplomová práce se zabývá ověřením tohoto předpokladu. V rámci práce bude zkoumán vliv povrchových úprav na soudržnost vrstev. Na základě provedených zkoušek bude vybrána vhodná úprava povrchu. Ta bude aplikována na existující prefabrikované panely. Část těchto panelů bude zesílena vrstvou 30 mm a 50 mm UHPC, a následně

na nich budou provedeny ohybové zkoušky. Ty mají ověřit zejména předpoklad, že při namáhání nedojde k delaminaci vrstev. Získané hodnoty na zesílených panelech a referenčních budou porovnány a bude vyhodnoceno, o kolik daný způsob zesílení ovlivňuje únosnost prvku v ohybu. Na závěr práce bude předběžně navržena zkouška na protlačení prvků zesílených pomocí UHPC.

2 CÍLE PRÁCE

Prvním z hlavních cílů této práce je provedení experimentálního ověření betonových prvků zesílených pomocí UHPC z hlediska chování při namáhání v ohybu. V rámci této části bude popsána příprava, provedení a vyhodnocení ohybových zkoušek existujících betonových prvků zesílených vrstvou UHPC. Cílem ohybových zkoušek je ověření předpokladu, že při vhodné povrchové úpravě podkladního betonu lze zajistit spolupůsobení vrstev i bez použití spřahovacích prvků.

Druhým hlavním cílem této práce je experimentální ověření kontaktu původního betonu a vrstvy UHPC. Cílem je ověřit vliv několika vybraných povrchových úprav původního betonu na výslednou soudržnost původního betonu a zesilující vrstvy UHPC.

Třetím hlavním cílem této práce je provedení návrhu zkoušky na protlačení prvků zesílených vrstvou UHPC.

3 DŮVODY PROČ ZESILOVAT KONSTRUKCE

Pokud stav některých nosné konstrukce již nesplňuje požadavky v některém z mezních stavů (tzn. mezní stav únosnosti nebo použitelnosti), konstrukci lze zbourat a postavit novou nebo lze přistoupit k jejímu zesílení. Výstavba nové konstrukce však ale není vždy možná, ať už z ekonomických nebo například provozních důvodů (např. nelze přerušit užívání stávající konstrukce). V takových případech, pokud je to možné, je zesílení konstrukce vhodným postupem.

Důvodů pro zesílení konstrukce může být několik. Asi nejčastějším důvodem je potřeba **navýšení zatížitelnosti konstrukce**. Konstrukce jsou navrhovány k určitému účelu v určité době podle dobových předpisů. Tato hlediska se však mohou během životnosti konstrukce změnit. Jedná se většinou o starší konstrukce, které svojí únosností přestávají stačit současným účelům nebo nevyhovují současným normám. Nebo jde o případy, kdy dochází ke změně účelu užívání konstrukce a je potřeba navýšit její zatížitelnost. Může se také jednat o případy, kdy je konstrukce potřeba zesílit na působení mimořádného zatížení, se kterým se při návrhu nepočítalo. Speciálním případem je zesilování konstrukcí z hlediska seismické odolnosti. Toto je aktuální téma zejména v seizmicky aktivních oblastech, kde je však tento problém velmi důkladně řešen během projektování konstrukce.

Dalším důvodem může být **chybný statický návrh nebo chyba při provádění stavby.** V těchto případech je důležitým faktorem doba, kdy je chyba odhalena. Pokud je chyba objevena v počátečních fázích výstavby, je často ekonomicky výhodnější chybné prvky odstranit a provést znovu. Předejde se tak případně nutnému zesílení nebo sanaci závad a poruch a s nimi spojené náročné údržbě během životnosti konstrukce. Bohužel k odhalení konstrukčních chyb většinou dochází až během provozu, kdy se na konstrukci již objevují závady a poruchy. Možnost a ekonomická výhodnost zesílení konstrukce pak záleží na rozsahu poškození konstrukce.

Zesilovány jsou také konstrukce **poškozené mimořádným zatížením**. Poškození betonu nebo výztuže má za následek snížení únosnosti konstrukce. To neznamená nic jiného, než že konstrukce přestává vyhovovat účelu, ke kterému byla navržena. Je tedy nutné snížit užitné zatížení nebo zajistit opětovné navýšení únosnosti. Snížení užitného zatížení, je efektivní řešení problému hlavně z ekonomického hlediska, ale ne vždy je možné. Druhou možností je konstrukci zesílit, aby i přes poškození mohla dále fungovat. Zesílení může být provedeno mnoha způsoby od využití podpůrných konstrukcí až po zvětšení průřezu nebo přidání výztuže (betonářská výztuž, kompozitní výztuž). Možnost

a ekonomická výhodnost zesílení konstrukce pak opět záleží na rozsahu poškození konstrukce.

Zesílení betonové konstrukce může být provedeno různými způsoby a pomocí různých materiálů. Způsob zesílení je vždy volen s ohledem na možnost provedení a ekonomické možnosti, a musí zohledňovat stav konstrukce jako celku, aby zesílená konstrukce mohla dále plnit svůj účel, pro který byla navržena. Návrh zesílení provádí vždy statik na základě diagnostického průzkumu a musí být vždy podložen statických výpočtem a výkresovou dokumentací. [1]

4 UHPC

Již v průběhu 20. století byl materiálový výzkum zaměřen na vývoj betonů o vyšších pevnostech než u tehdy běžně používaných betonů. K průlomu začalo docházet v 70.letech minulého století s vývojem plastifikačních přísad, objevením vlivu vláken na vlastnosti betonu a změnou přístupu ke granulometrii. Na základě těchto poznatků byly zaznamenány úspěchy ve snaze dosáhnout výroby cemento-kompozitních materiálů nevšedních pevností a vlastností. Tyto materiály se začaly označovat jako ultra-vysokohodnotné betony. Na rozdíl od ultra-vysokopevnostních betonů, vynikají i svými ostatními vlastnostmi než jenom vysokou pevností v tlaku a tahu. [2]

Vývoj UHPC v českých poměrech je ve srovnání se světem teprve relativně v začátcích. První výzkumy zaměřené na vývoj tohoto materiálu lze v ČR zaznamenat koncem minulého desetiletí. Přestože již jsou k dispozici poznatky ze zahraničních výzkumů a zkušenosti z realizovaných konstrukcí, je vývoj tohoto materiálu v českých poměrech neméně lehkým úkolem. Důvodem je poměrně složité hledání vhodných lokálních surovin a vyladění matrice směsi. [3]

4.1 Vlastnosti UHPC

UHPC (zkr. *Ultra-High Performance Concrete*) neboli ultra-vysokohodnotný beton (v české literatuře také jako *velmi-vysokohodnotný beton*) je relativně novým stavebním materiálem. Jedná se o jemnozrnný kompozitní materiál vyznačující se vysokou pevností v tlaku přesahující 150 N/mm^2 (krychelná pevnost okolo 180 N/mm^2) a pevností v tahu za ohybu pohybující se mezi 8 až 16 N/mm^2. Hodnoty modulu pružnosti se u tohoto materiálu pohybují v rozmezí 40-55 GPa. Ve všech těchto materiálových vlastnostech UHPC převyšuje hodnoty, kterých dosahují běžně používané betony. [3], [4]

Struktura materiálu je velice hutná a kompaktní, ale zároveň křehká. Díky velmi nízké permeabilitě se vyznačuje velmi dobrou odolností vůči agresivním látkám a vlivům vnějšího prostředí. Vyniká svou odolností proti působení vlhkosti, rozmrazovacích látek nebo teplotním cyklům. Ve spojení s rozptýlenou výztuží lze dosáhnout velké duktility materiálu. Bez použití výztuže se ovšem UHPC vyznačuje křehkým porušením bez viditelné deformace. [3], [4], [5]

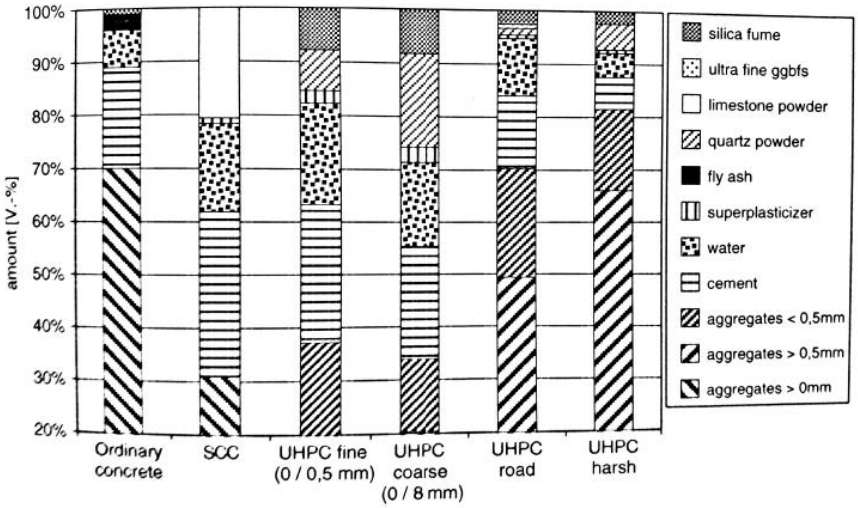
Všechny tyto vlastnosti z UHPC dělají ideální materiál jako pro nové speciální konstrukce tak i pro rekonstrukce a zesilování konstrukcí.

4.2 Složení UHPC

Zásadním rozdílem UHPC oproti běžným betonům je v jeho složení. Je stejně jako běžné moderní betony pětisložkový, ale liší se v použitých surovinách a hlavně v jejich množství. Zásadními rozdíly jsou:

- vyšší množství cementu (nejčastěji CEM I nebo CEM III) → 600-1000 kg/m3
- pouze jemnozrnné kamenivo (do 2 mm)
- příměsi (latentně hydraulické látky, mikroplniva)
- velké množství přísad (superplastifikátory)
- nízký vodní součinitel (hodnoty okolo 0,2) [3], [4]

Rozdíly ve složení běžného betonu a UHPC jsou patrné z následujícího přehledu na obr. 1. V prvním sloupci je zobrazeno složení běžného betonu, kde je více než polovina objemu směsi tvořena kamenivem větší frakce. Naproti tomu ve směsi UHPC tvoří značný podíl obsah cementu, příměsí a jemného kameniva. Výsledkem je velmi hutná, kompaktní a uzavřená struktura, vyznačující se velmi malým množstvím a velikostí pórů.



Obr. 1 Srovnání typických složení pro běžný beton, SCC a UHPC (Zdroj:[4])

4.2.1 Kamenivo

Křivka zrnitosti použitých částic by měla být plynulá, aby výsledná struktura byla velmi hutná a kompaktní. Je tedy zásadní použití spíše menších frakcí kameniva. Maximální frakce kameniva je výrazně nižší než u běžných betonů, přičemž dnes se využívá zřídkakdy kamenivo zrna většího než 2 mm. [4]

4.2.2 Cement

Množství cementu používané do UHPC je vyšší než u běžných betonů (v rozmezí 600-1000 kg/m^3). Do směsí UHPC je většinou používán rychlovazný portlandský cement CEM I s označením cementu 42,5 nebo 52,5. Tento cement se vyznačuje rychlým náběhem pevnosti, ale zároveň velkou mírou smrštění. Obě tyto vlastnosti jsou typické i pro výslednou směs UHPC. Problém větší míry smršťování lze částečně vyřešit použitím například cementu CEM III, který ovšem vykazuje nižší rychlost náběhu pevnosti a nižší hydratační teplo. [3] [4]

I v případě teplotního ošetřování čerstvého betonu při teplotě přibližně 80-90°C zůstává přibližně 30% částic cementu nezhydratováno a funguje ve směsi jako mikroplnivo. Toto množství cementu, který by nezreagoval, je možné částečně nebo úplně nahradit materiály inertními s velmi jemnými částicemi s vyšší pevností než mají cementové částice. [4]

4.2.3 Příměsi

Příměsi do betonu rozlišujeme do dvou základních skupin – latentně hydraulické příměsi a inertní příměsi. Latentně hydraulické příměsi mají schopnost podílet se na procesu hydratace. Na druhou stranu inertní příměsi se tohoto procesu neúčastní a fungují pouze jako mikroplnivo.

4.2.3.1 Latentně hydraulické příměsi

Latentně hydraulické látky se přidávají do betonové směsi ze dvou hlavních důvodů. Prvním z nich je jejich funkce jakožto mikroplniva. Jak již bylo řečeno, je důležité , aby křivka zrnitosti byla co nejvíce plynulá. To má za důsledek konečnou velmi hutnou a kompaktní strukturu UHPC.

Druhým důvodem je jejich vlastnost podílet se na procesu hydratace společně s cementem. Tyto látky samy o sobě ve vodním prostředí nereagují. Hydraulické vlastnosti se projeví až po kontaktu s určitým množstvím cementu, který zde působí jako aktivátor reakce. Ve směsi tedy pak tyto příměsi při reakci s hydroxidem vápenatým ($Ca(OH)_2$) tuhnou a tvrdnou. [6]

Mezi nejrozšířenější latentně hydraulické příměsi patří silika (někdy též jako mikrosilika). Jedná se v podstatě o práškový oxid křemičitý (SiO_2), který se vyznačuje velmi velkým měrným povrchem. Její hydraulické vlastnosti se projevují až při dostatečném hydratačním teple. Dle [4] nastává druhotný proces hydratace siliky okolo teploty 80-90°C. Pokud této teploty není dosaženo, převažuje funkce siliky jako mikroplniva.

Další používanou příměsí je prášková struska. V betonu funguje v první řadě jako mikroplnivo. Jedná se původně o odpadní materiál při výrobě železa. Díky rozšířenosti hutního průmyslu v České republice, je tato surovina snadno dostupná.

4.2.3.2 Inertní příměsi

Mezi inertní příměsi patří velmi jemnozrnné látky, které plní funkci mikroplniva, Jsou důležité při optimalizace granulometrie směsi. Jejich přidáním jsou zlepšeny reologické vlastnosti čerstvé směsi. Kromě toho zvyšují hutnost výsledné struktury. Mezi nejpoužívanější patří kamenná moučka a částečně i mletý vápenec. [7]

4.2.4 Rozptýlená výztuž

Prosté UHPC se chová velice křehce a k dosažení únosnosti dochází bez viditelných přetvoření. Přidání dostatečného množství vláken zajišťuje duktilní chování materiálu. Při dosažení napětí na mezi trhliny nastává v materiálu tahové zpevnění (ang. strain-hardening). Materiál je tak schopen přenášet napětí i po vzniku trhliny až do vyčerpání jeho tahové kapacity a nastane tahové změkčení (ang. strain-softening). Pro dosažení zmíněných vlastností je důležité dávkování, které by se mělo pohybovat mezi 1-3% objemu záměsi. [3]

Díky použití vláken se také snižuje vzdálenost trhlin. Ve spojení s velmi hutnou a kompaktní strukturou je tedy i po vzniku trhlin do jisté míry stále bráněno průniku agresivních látek do hloubky.

Vlákna lze používat ocelová, skleněná či na bázi polymerové bázi. Nejvíce používanou výztuží jsou ocelová vlákna. Ty mohou být různých délek a průměrů, ale mezi nejvíce používané patří délky okolo 20 mm a průměru 0,3 mm. [4]

Právě díky velmi hutné matrici a použití rozptýlené výztuže mají ultra-vysokohodnotné betony kromě vyšší pevnosti také výrazně vyšší odolnost proti vnějším vlivům prostředí a dokáží tak mnohem lépe chránit výztuž před korozí. Díky této vlastnosti jsou konstrukce z UHPC méně náročné na údržbu a mají delší životnost.

4.2.5 Superplasifikátory

Aby bylo dosaženo nízkého vodního součinitele a zároveň dobré zpracovatelnosti, používají se do směsi látky na bázi polykarboxylátetherů (PCE). [3]

pozn.: v celém textu této práce je zkratka UHPC používána namísto UHPFRC

5 POUŽITÍ UHPC PRO ZESILOVÁNÍ BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ

5.1 Motivace

Při zesilování stavebních konstrukcí není jediným cílem zvýšit únosnost. Důležitým cílem je i zajištění dostatečné trvanlivosti zesilované konstrukce a zesílení samotného.

Ultra-vysokohodnotné betony (UHPC) jsou díky svým mechanickým vlastnostem ideálním materiálem pro zesilování konstrukcí. Tento materiál vyniká vysokou pevností tlaku a tahu (oproti běžným betonům), velmi nízkou permeabilitou a odolností vůči okolnímu prostředí. Při aplikací již tenké vrstvy UHPC na zesilovanou konstrukci lze zajistit zvýšení únosnosti a trvanlivosti za minimálního nárůstu stálého zatížení. Kromě těchto vlastnosti byly již prokázány dobré předpoklady pro soudržnost s povrchem běžného betonu. [8], [12]

V zahraničí je již technologie zesilování za pomocí UHPC používána zejména na opravy a zesilování mostních konstrukcí nebo vodohospodářských staveb. Tedy tam, kde je zesilovaná konstrukce vystavena velkému namáhání, nepříznivému vlivu agresivních látek nebo abrasivnímu prostředí. [9], [10].

5.2 Základní princip

Základní myšlenka použití ultra-vysokohodnotného betonu pro zesilování betonových prvků vychází z jeho vlastností. Tento materiál vyniká svými mechanickými vlastnostmi (vysoká pevnost v tlaku a tahu) a velmi dobrou odolností vůči okolnímu prostředí. Z toho vyplývají dvě základní funkce, které může vrstva UHPC v zesíleném průřezu:

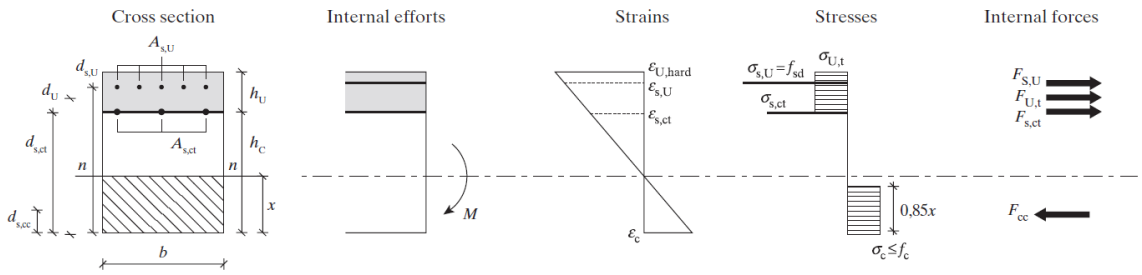
- ochranná funkce (Obr. 3 vlevo)
- statická funkce - zvýšení únosnosti průřezu (Obr. 3 vpravo) [11]

Základním předpokladem pro statické působení vrstvy UHPC je úplné spolupůsobení s povrchem původní konstrukce. Problematice soudržnosti se věnuje kapitola 5.3 a dále pak kapitola 6.4 (experimentální část práce).

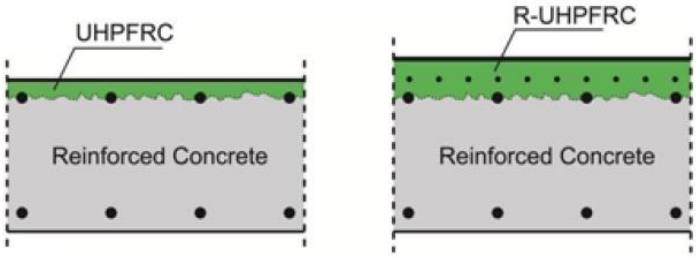
5.2.1 Zesílení na ohybové namáhání

Betonáž zesilující vrstvy probíhá na horní povrch konstrukce, aby bylo technologicky možné vůbec zesílení provést a zajistit dostatečnou soudržnost obou vrstev.

Zesilující vrstva UHPC tak může v ohýbaném průřezu působit buď v tažené anebo tlačené části průřezu podle toho, jak je průřez namáhán. V obou případech namáhání má však zesílení pozitivní vliv na únosnost průřezu.



Obr. 2 Rovinná analýza průřezu - ohybová únosnost zesíleného průřezu v tažené oblasti (Zdroj: [11])



Obr. 3 Základní typy průřezů zesílených vrstvou UHPC (Zdroj: [11])

Zesílení v tažené oblasti:

V prvním průřezu na obr. 3 má vrstva UHPC plnit primárně pouze ochrannou funkci. Běžné materiály pro zesilování konstrukcí dokáží efektivně navýšit únosnost konstrukce, ale ve většině případů nevynikají svou trvanlivostí. Aplikace tenké ochranné vrstvy UHPC dokáže zajistit trvanlivost původní konstrukce. Kompaktní struktura a schopnost tahového zpevnění UHPC totiž zabraňuje prostupu agresivních látek na povrch původního betonu a dále k výztuži. Tloušťka takovéto ochranné vrstvy UHPC pohybuje okolo 25 – 40 mm.[11]

V druhém průřezu na obr. 3 se zesilující vrstva primárně podílí na zvýšení únosnosti průřezu. Do vrstvy je vložena betonářská výztuž o menším průměru (v praxi používány například karisítě). Menší průřezy výztuže ne tolik ovlivňují kompaktnost vrstvy UHPC, která je důležitá pro dobrou soudržnost s povrchem původního betonu. Výztuž vložená do UHPC výrazně zlepšuje tahové vlastnosti.

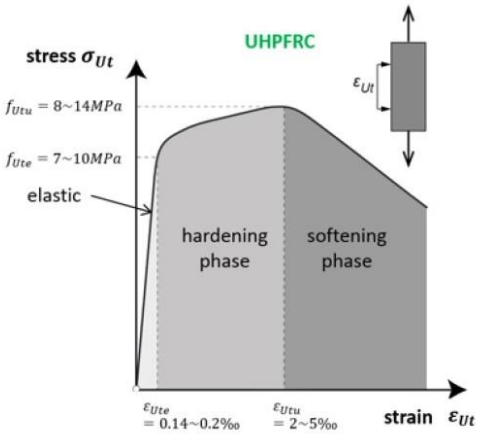
Pozitivní vliv výztuže na duktilní chování UHPC, lze vidět na grafu průběhu závislosti zatížení na deformaci na obr. 5. Pro srovnání je na obr. 4 ukázán graf pracovního diagramu nevyztuženého UHPC v jednoosém tahu. Tloušťka takovéto ochranné vrstvy UHPC pohybuje v rozmezí 40 – 80 mm. [11]

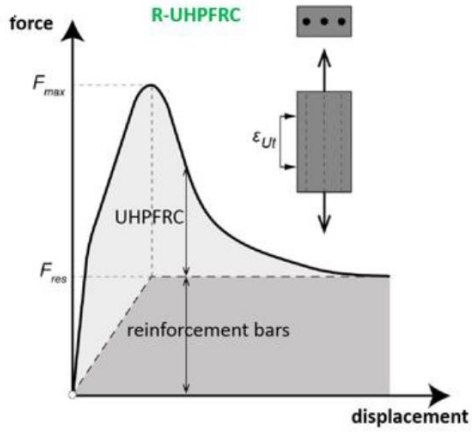
Zesílení v tlačené oblasti:

V experimentální části této práce je popsána příprava, průběh a vyhodnocení ohybových zkoušek. Pro tento experiment byla vrstva UHPC aplikována na horní povrch železobetonových panelů. Vrstva UHPC v tomto případě tedy působí v tlaku. Ke zvýšení únosnosti přispívá zmenšením tlačené oblasti a zvýšením efektivní výšky průřezu. Zaleží

pak na rozměrech prvku a výšce nadbetonávky, zda je celá tlačená oblast pouze v UHPC nebo i částečně v původním betonu.

Při toto způsobu namáhání má i tenčí vrstva bez přidané betonářské výztuže (obr. 3 vlevo) výrazný vliv na zvýšení únosnosti. Únosnost průřezu je výrazně díky velmi vysoké pevnosti UHPC v tlaku. Přidaná betonářská výztuž do průřezu (obr. 3 vpravo) díky malé vzdálenosti k neutrální ose nemá na únosnost až takový vliv.



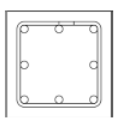
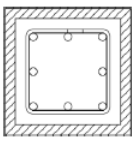
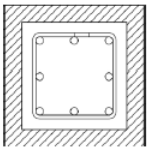
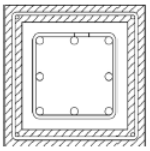


Obr. 4 Charakteristické tahové chování UHPC (Zdroj: [11])
Obr. 5 Charakteristické tahové chování vyztuženého UHPC (Zdroj: [11])

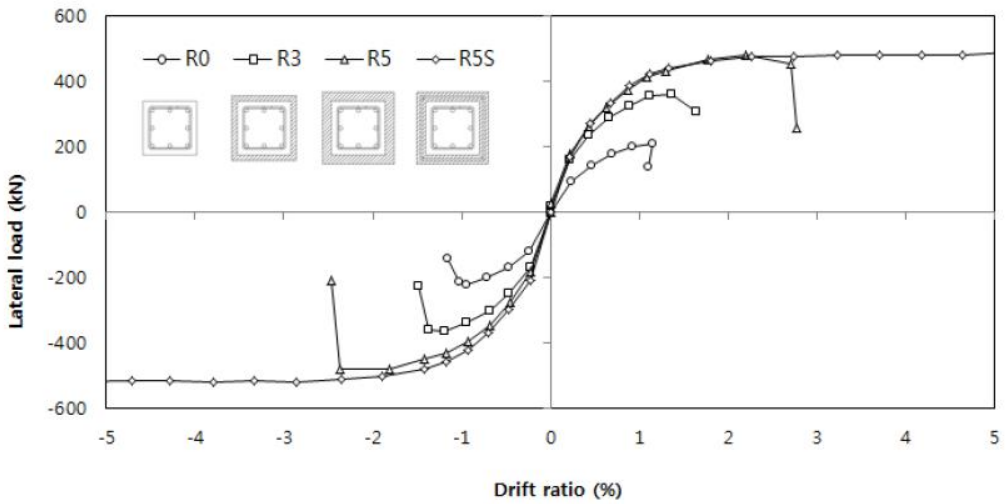
5.2.2 Zesílení na tlakové namáhání

Zesílení tlačených prvků je založeno na principu zvětšení plochy průřezu. Průřez je zvětšen vrstvou UHPC – obetonováním. Jedná se o klasickou a jednu z nejběžněji používaných metod zesilování. Použití UHPC má ale oproti běžným betonům několikanásobně větší pevnost v tlaku a kromě toho vyniká i svou trvanlivostí.

Principem je zvětšení plochy průřezu, což má za následek snížení napětí v daném průřezu. Průřez je ale zesílen hlavně díky vysoké pevnosti UHPC v tlaku, neboť aplikované vrstvy jsou spíše subtilnější. Do nadbetonávky může být přidána betonářská výztuž. Na následujícím příkladu z provedeného zahraničního výzkumu [13] je ukázán vliv změny tloušťky vrstvy UHPC a vložené betonářské výztuže.

	R0	R3	R5	R5S
Retrofit method	unstrengthened	30mm jacket (10% thickness of column)	50mm jacket (16.7% thickness of column)	50mm jacket + stirrups (D10@150)
Section				

Obr. 6 Příklady zesílených průřezů na tlakové namáhání (Zdroj: [13])



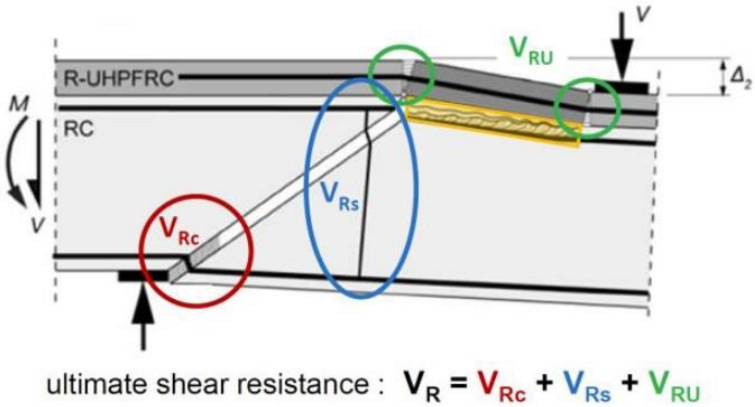
Obr. 7 Graf závislosti zatížení-deformace pro příklady z obr. 6 (Zdroj: [13])

Z grafu na obr. 7 je patrné, že zvětšování tloušťky vrstvy UHPC má za následek výrazné zvýšení únosnosti tlačeného prvku a že přidaná výztuž má vliv pouze na zvýšení duktility průřezu.

Únosnost výsledného průřezu je tedy zjednodušeně součtem únosností v tlaku původního železobetonového průřezu a zesilující vrstvy UHPC

5.2.3 Zesílení na smykové namáhání

Ve většině případů jsou ohýbané prvky namáhány kombinací smyku a ohybu. Zesílený průřez na smykové namáhání má tedy stejnou podobu jako na ohyb. Je provedena betonáž relativně tenké vrstvy UHPC na horní povrch daného prvku. Možnosti zesílení jsou stejné jako pro ohyb (Obr. 3). Výsledná smyková únosnost průřezu se skládá z únosnosti tlačené diagonály betonu, únosnosti smykové výztuže a smykové únosnosti vrstvy UHPC. [11]



Obr. 8 Mechanismus smykového porušení prvku (Zdroj: [11])

5.2.4 Zesilování na abrazivní opotřebení

Díky svým vlastnostem má UHPC velmi široké pole uplatnění. Kromě výborných mechanických vlastností jako vysoká pevnost v tlaku se UHPC vyznačuje také dobrou odolností vůči abrazi.

Zejména kvůli své velmi hutné struktuře a obsahu vláken dosahuje UHPC mnohem lepších výsledků (ve zkouškách zaměřených na odolnost vůči abrazi) než ostatní materiály[9]. Díky této vlastnosti lze UHPC využít na zesílení povrchů, které jsou vystaveny abrasivnímu prostředí. Aplikace tenké vrstvy UHPC dokáže ochránit původní konstrukci a zajistit jí tak delší životnost.

S tímto způsobem použitím se můžeme setkat zejména u vodohospodářských staveb nebo u vozovek mostních konstrukcí. [9], [14]

Tab. 1 Výsledky abrazivních zkoušek vybraných materiálů a UHPC (Zdroj: [9])

Material	Abrasive Strength (CNR test)
Granite	0.35 to 0.85
ALAG	0.4
UHPFRC	0.8
Glass	1
Ordinary concrete	3 to 4 (C60 to C30)

Material	Impact Resistance (CNR test)
UHPFRC	23 – 70 cm^3
Granite	< 100 cm^3
ALAG	< 120 cm^3
Conventional concrete	200 cm^3 to destruction

5.3 Soudržnost vrstvy UHPC s povrchem původního betonu

Při aplikování vrstvy UHPC na stávající betonovou konstrukci vzniká kompozitní průřez. Z hlediska struktury a vlastností původního betonu a UHPC se totiž jedná o dva rozdílné materiály. Pro zajištění spolupůsobení výsledného prvku je zásadní zajištění dostatečné soudržnosti obou vrstev. Při špatné soudržnosti vrstev dochází při zatěžování k delaminaci a obě vrstvy přestávají spolupůsobit.

Spolupůsobení obou vrstev lze zajistit použitím klasických spřahovacích prvků, jako jsou ocelové trny, ocelové lišty a podobné. Jedná se v podstatě o prvky, které jsou zakotveny do původního betonu a zajištují tak spolupůsobení vrstev. Použití těchto prvků má ale dvě základní nevýhody – cena a pracnost provedení.

Soudržnost vrstvy UHPC a povrchu původního betonu lze zajistit i bez použití spřahovacích prvků [8], [15]. Cílem je dosažení takového spoje, který bude mít mechanické vlastnosti alespoň tak dobré nebo lepší než původní beton (k porušení UHPC velmi pravděpodobně nikdy nedojde dříve než k porušení betonu).

Existuje zde několik faktorů ovlivňující soudržnost, kterým je potřeba věnovat pozornost.

5.3.1 Faktory ovlivňující soudržnost

Faktorů, které ovlivňují podmínky soudržnosti v kontaktu betonu a UHPC je celá řada. Mezi nejvýznamnější faktory patří čistota podkladního povrchu, povrchové úpravy podkladu a vlhkost podkladu. Mezi další faktory patří vlastnosti podkladního betonu a použitého UHPC (zejména pevnost v tahu obou materiálů). [8], [15], [16]

5.3.1.1 Čistota povrchu

Základním faktorem, který ovlivňuje soudržnost je čistota povrchu podkladu. Pokud je povrch znečištěn, může být snížena pevnost výsledného spoje. Povrch v době betonáže musí být zbaven všech volných částic a chemických látek, které by zabránily propojení materiálů (například hydrofobní látky).

Čištění méně nechemicky znečištěného lze provést nízkotlakým tryskáním vodou (až 20 MPa), aby tak nedocházelo k dalšímu narušování povrchu. Pokud je povrch chemicky znečištěn je nutné ho vhodným způsobem očistit. [1]

5.3.1.2 Povrchové úpravy podkladu

Vhodný způsob povrchové úpravy povrchu betonu má nezanedbatelný vliv na soudržnost spoje. Lze říci, že do jisté míry s rostoucí drsností povrchu se zlepšují podmínky soudržnosti v kontaktu vrstev.

Povrchové úpravy zajišťují mechanickou soudržnost mezi vrstvami. Existuje několik možností, jak povrch podkladu upravit. Mezi nejpoužívanější patří jednoznačně otryskání povrchu pískem, narušení povrchu vysokotlakým vodním paprskem a mechanické narušení povrchu (sbíjecí kladiva, řezné kotouče). [8], [15]

U povrchů, kde jsou při úpravě povrchu částečně odhalena zrna kameniva, je při zkouškách dosahováno mnohem lepší soudržnosti. Pokud je povrch zvolenou úpravou příliš narušen, že dochází ke tvorbě mikrotrhlin, je snížena pevnost povrchových vrstev a výsledný spoj dosahuje nižších pevností.

V případě UHPC není potřeba velké drsnosti povrchu, aby bylo dosaženo velmi pevného spoje.[15]

Obr. 9 Příklady povrchových úprav - zleva: nízkotlaký vodní paprsek, tryskání pískem, vysokotlaký vodní paprsek (Zdroj: [16])

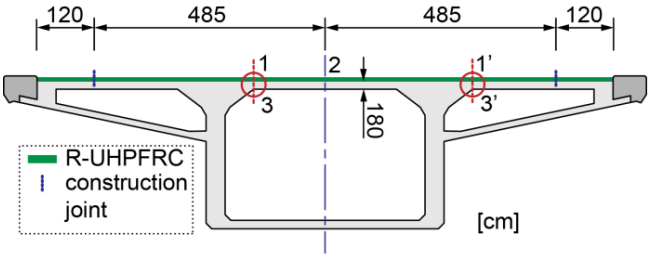
5.3.1.3 Vlhkost povrchu

Před provedením betonáže vrstvy UHPC by měl být povrch původního betonu vhodně navlhčen. Pokud je povrch betonu nedostatečně vlhký dochází po betonáži k absorpci vody z čerstvé záměsi do povrchu podkladu. Nedostatek vody v záměsi potřebné k hydrataci může způsobit vznik smršťovacích trhlin. Vzniká tak tahové napětí na kontaktu vrstev a je snížena pevnost spoje. [12], [15]

5.4 Příklady realizovaných projektů

Zesílení mostovky viaduktů Chillon [10]

Viadukt Chillon se nachází ve Švýcarku nedaleko Ženevského jezera. Jedná se o dálniční most vybudovaný v 60. letech minulého století. Konstrukčně se jedná o dva paralelní segmentové předpjaté mosty s celkovou délkou 2,210m a rozpětím polí 92-104 m. Během kontrolních prohlídek byly zjištěny známky počínající alkalicko-křemičité reakce (ASR) v betonu mostovky. Pokud by se situace neřešila, došlo by postupem času ke snížení pevnosti betonu.



Obr. 10 Příčný řez konstrukce viaduktu Chillon s navrženým zesílením (Zdroj: [10])

V roce 2014 bylo rozhodnuto, že deska mostovky tloušťky 180 mm bude zesílena vrstvou 40 mm UHPC. Zesilující vrstva byla v příčném směru vyztužena betonářskou výztuží o průměru 12 mm umístěnými po 125 mm.

Vrstva UHPC měla zabránit dalšímu prostupu alkalických látek do betonu a zastavit tak ASR. Betonáže probíhaly během let 2014 a 2015. Provedené zesílení splnilo požadavky a kromě toho přispělo k navýšení tuhosti průřezu a celkově k delší životnosti mostu.

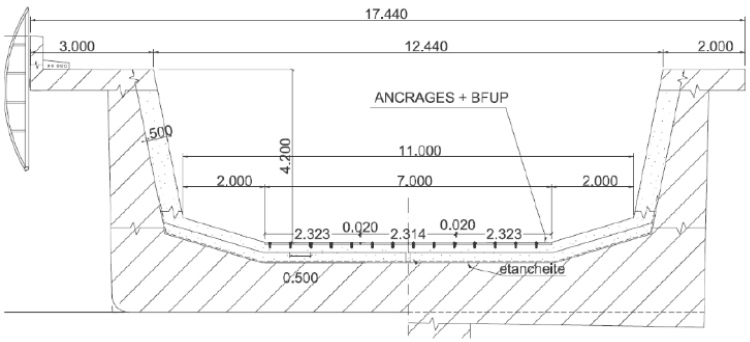
Obr. 11 Probíhající betonáž zesilující vrstvy (Zdroj: [10])

Oprava mostovky kanálových mostů v Alpách [9]

V údolí Maurienne (Savojsko, Francie) se nachází dva kanálové mosty. Mostovka je tvořena až 1,2m tlustými betonovými deskami. Původně byly desky potaženy materiálem ALAG (speciální abrazi-odolný materiálem), který byl však v roce 2004 částečně nahrazen UHPC. Zbytek ochrany desek byl zničen při stoleté vodě v roce 2005.

V roce 2009 bylo rozhodnuto, že budou povrchy desek kompletně zesíleny vrstvou UHPC, aby byla obnovena ochrana jejich ochrana proti abrazi proudící vodou, ale zároveň nebyl příliš zmenšen volný prostor uvnitř mostu.

U těchto mostních konstrukcí bylo velmi důležité při opravě povrchu věnovat pozornost zachování potřebného sklonu, proto byl beton ukládán do speciálních forem. Výsledné parametry opravy na ploše bezmála 1500m^2 dosahovaly výborných hodnot.



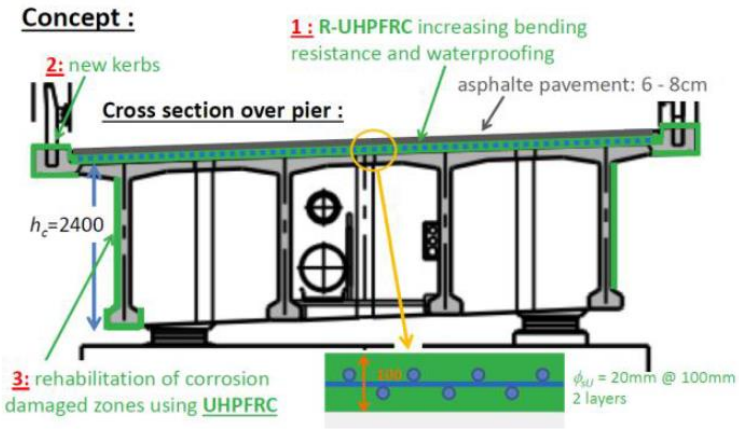
Obr. 12 Příčný řez zesilovaným kanálovým mostem (Zdroj: [9])

Oprava komorových nosníků dálničního viaduktu [11]

V letech 2018 začala v Centrálním Švýcarsku rekonstrukce tří dálničních viaduktů, která probíhá až do současnosti. Ve všech případech se jednalo o dvě samostatné trámové konstrukce tvořené třemi předpjatými prefabrikovanými nosníky délek 38-42 m.

Během výstavby došlo ke zmonolitnění nosníků a vznikl tak vlastně spojitý nosník. Původně byly ale nosníky navrženy s prostým uložením, což mělo za následek vznik poruch. Při mostních prohlídkách také byl objeven výskyt koroze výztuže. Bylo tedy nutné konstrukci zesílit, aby mohla nadále plnit svoji funkci.

Bylo navrženo zesílení mostovky vrstvou 45 mm vyztuženou v příčném i podélném směru betonářskou výztuží. Ta měla zvýšit zejména torzní tuhost průřezu nad podporami a měla přispět k lepšímu přerozdělení napětí od osamělých břemen v příčném směru. Dále byla navržena sanace zkorodované výztuže na krajních trámech, opět s použitím UHPC. Koncept návrhu je ukázán na následujícím schématu.



Obr. 13 Příčný řez viaduktem s vyznačenými navrženými úpravami (Zdroj: [11])

Zesilování průmyslových podlah [17], [18]

V oblasti zesilování a sanací průmyslových podlah je už od 80. let využíváno HPC (*vysokohodnotný beton z anglického „high performance concrete“*) a v posledních letech i UHPC. Povrchy průmyslových podlah musejí především odolávat působení velkých zatížení. Často jsou také vystaveny působení agresivních látek nebo jsou pojížděny.

Jak už již bylo v této práci několikrát zmíněno, UHPC vyniká vysokou pevností v tlaku, odolností proti působení agresivních látek a abrazi a v neposlední řadě i samozhutnitelností. Právě tyto vlastnosti z UHPC dělají ideální materiál na zesilování podlah.

Zesílení může mít statickou funkci, kdy je potřeba zvýšit například zvýšit únosnost stropních konstrukcí nebo zajistit lepší roznos zatížení od těžkých osamělých břemen. Zesílení ale může mít pouze funkci ochranou, kdy je potřeba například potřeba zabránit průniku látek na podkladní beton.

Obr. 14 Probíhající betonáž vrstvy UHPC na průmyslovou podlahu (Zdroj: [18])

6 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V této části práce bude řešen problém zesilování konstrukce pomocí UHPC z experimentálního hlediska. Nejprve bude popsána příprava, provedení a vyhodnocení ohybových zkoušek referenčních (nezesílených) a zesílených existujících prefabrikovaných prvků. Dále budou provedeny a vyhodnoceny zkoušky zaměřené na problém soudržnosti vrstvy UHPC s původním povrchem zesilovaného betonového prvku. Na závěr bude proveden schématický návrh zkoušky na protlačení nezesílených a zesílených betonových prvků

6.1 Cíle experimentů

Zahraniční zkušenosti (viz 5.4) ukazují, že technologie zesilování betonových konstrukcí pomocí UHPC již byla a je úspěšně používána, zejména pak na mostních a vodohospodářských konstrukcích. Je ale používána spíše v omezené míře, hlavně díky tomu, že se jedná o relativně novou a nepříliš vyzkoušenou technologii.

Část zkoušek, kterým se věnuje tato práce, měla ověřit chování zesílených betonových prvků v ohybu. Pro potřeby experimentu byly opatřeny existující prefabrikované prvky, které byly zesíleny v tlačené části průřezu vrstvou UHPC. Na těchto panelech byly provedeny zkoušky ve čtyřbodovém ohybu. Stěžejním bylo ověřit předpoklad, zda zesílený průřez při vhodné povrchové úpravě povrchu zesilovaného betonu (bez použití spřahujících prvků) při zatěžování staticky spolupůsobí. Jinak řečeno, zda nedojde delaminaci vrstev. Zkoušky byly provedeny na 3 typech průřezu s různou tloušťkou nadbetonované vrstvy UHPC (viz 6.3). U všech těchto sad byl proveden výpočet ohybové únosnosti průřezů.

Část zkoušek, které byly provedeny v rámci této práce, bylo zaměřeno na problematiku soudržnosti vrstev. Cílem bylo ověřit vliv povrchových úprav původního betonu na výslednou soudržnost s vrstvou UHPC.

6.2 Diagnostika železobetonových prvků pro ohybové zkoušky

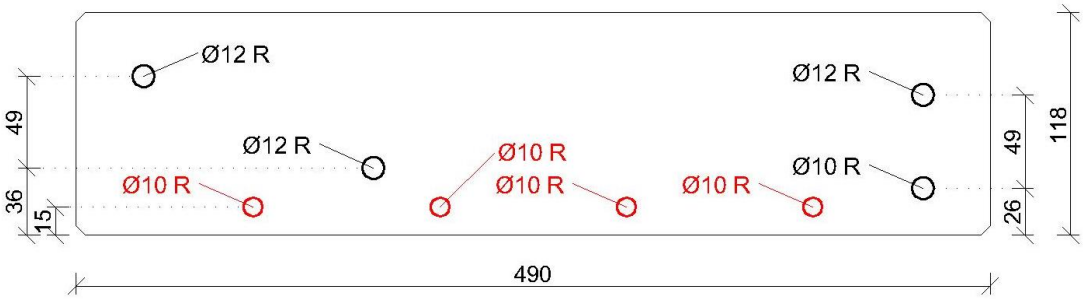
Pro potřeby ohybových zkoušek byly opatřeny existující prefabrikované železobetonové prvky stáří několika let. Jednalo se o panely tloušťky cca 120 mm půdorysných rozměrů cca 5500 mm x 490 mm. Tyto panely byly po několik let uskladněny ve venkovním prostředí a vystaveny tak jeho vlivům.

K opatřeným železobetonovým panelům chyběla technická a výkresová dokumentace. Nebyly tedy kromě základních rozměrů známy způsob a stupeň vyztužení a ani třída použitého betonu. Panely byly zakoupeny až po plánování časového harmonogramu zkoušek a bylo tedy nutné v krátkém časovém horizontu zjistit tyto parametry, aby bylo možné přistoupit k návrhu zkoušek. Pro zjištění materiálových parametrů a vyztužení byly provedena základní diagnostika panelů za použití destruktivních i nedestruktivních zkoušek.

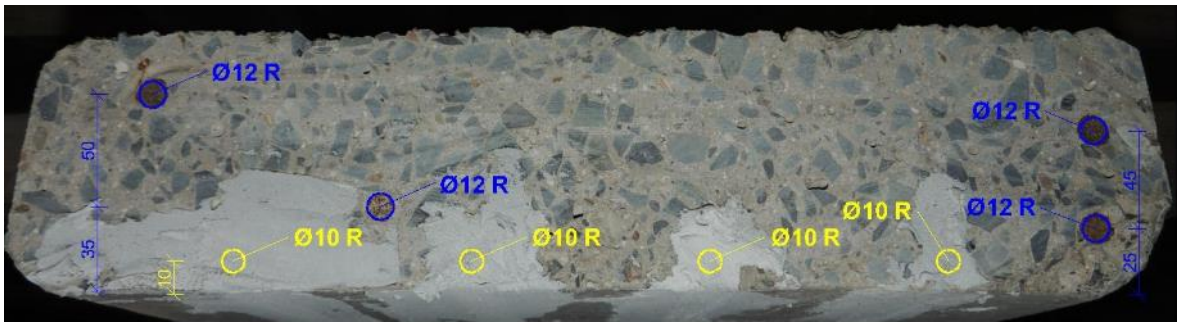
6.2.1 Vyztužení

Aby bylo zjištěno vyztužení panelů, byla provedena jedna destruktivní sonda k betonářské výztuži. Sonda byla provedena na referenčním panelu REF-3 (přehled a označení zkušebních vzorků viz 6.3.1). Sondou byla zjištěna hlavní betonářská výztuž ø12 R, v počtu dvě u spodního povrchu a dvě u horního povrchu panelu. U spodního povrchu bylo zjištěno krytí výztuže cca 30 mm a 20 mm. Předpokládá se charakteristická mez kluzu 500 MPa (materiálové testy oceli nebyli v rámci této práce prováděny).

Vzhledem k nízkému stupni vyztužení bylo přistoupeno k přidání hlavní nosné výztuže, aby byla navýšena únosnost prvků. Toto zesílení bylo provedeno vyfrézováním čtyř 20 mm hlubokých drážek do spodního povrchu a vlepením výztuže ø10 R. Takovéto vyztužení panelů bylo dále považováno za výchozí, tedy referenční, stav. Schéma zjištěného vyztužení panelu REF-3 je ukázáno na obr. 15.



Obr. 15 Zjištěné vyztužení panelu REF-3



Obr. 16 Příčný řez panelem REF-3 s vyznačeným zjištěným vyztužením

Obr. 17 Provedená sonda k betonářské výztuži

Obr. 18 Pohled na provedenou sondu k betonářské výztuži v příčném směru

6.2.2 Beton

Pro zjištění třídy použitého betonu a pevnosti betonu v tlaku byly provedeny destruktivní zkoušky pevnosti v tlaku na jádrových vývrtech a doplňkové nedestruktivní zkoušky pevnosti betonu v tlaku. Provedení a vyhodnocení jednotlivých zkoušek je shrnuto v podkapitolách 6.2.2.1 a 6.2.2.2.

Podle výsledků destruktivních zkoušek byl beton zatřízen jako C30/37. Výsledky doplňkových nedestruktivních tvrdoměrných zkoušek ukazovaly na třídu vyšší, tedy C35/45, ale zkouška hloubky karbonatace zjistila zkarbonatovanou vrstvu betonu o tloušťce 3 mm, která zvyšuje tvrdost betonu a tedy zvyšuje hodnoty odrazů. Výsledky plošně provedených (na všech vzorcích) nedestruktivních tvrdoměrných zkoušek potvrdily, že všechny zkušební panely jsou vyrobeny ze stejného betonu.

Do výpočtu ohybové únosnosti panelů pro potřeby ohybových zatěžovacích zkoušek byla použita **průměrná** hodnota zjištěných válcových pevností betonu v tlaku destruktivními zkouškami. Ta byla stanovena na $\mathbf{f_{c,cyl}}$ **= 32,3 MPa.**

Obr. 19 Jádrové vývrty pro materiálové zkoušky

6.2.2.1 Destruktivní zkoušky pevnosti betonu v tlaku

Pro účely destruktivních zkoušek pevnosti betonu v tlaku bylo ze zkušebních panelů odebráno pět jádrových vývrtů Ø cca 84 mm. Jádrové vývrty byly odebrány a odzkoušeny až po provedení ohybových zkoušek z neporušených oblastí panelů, neboť nebylo možné tyto destruktivní zkoušky provést na zkušebních panelech před provedením samotných ohybových zkoušek. Vývrty byly odebrány z panelu referenčního panelu REF-3 (přehled a označení zkušebních vzorků viz 6.3.1). V laboratoři byly vývrty zaříznuty a zabroušeny.

Poté byly vzorky zváženy a změřeny, aby bylo možno stanovit objemovou hmotnost betonu. Vzorky byly zkoušeny v WPM 500 kN. Odběry jádrových vývrtů a zkoušky vzorků byly provedeny dle ČSN EN 12504-1 [19]. Vyhodnocení tlakových zkoušek na jádrových vývrtech bylo provedeno dle ČSN EN 13791 [20].

Tab. 2 Vyhodnocení pevnosti v tlaku na jádrových vývrtech

Vývrt	Ozn. zk. vzorku	Průměr vzorku	Výška vzorku	Hmotnost	Objem. hmot.	Max. tlak. síla **F**	Pevnost betonu na vývrtu $f_{c,\,core}$	Štíhl. poměr **l**	Opravný součinitel (štíhlost) $\kappa_{c,\,cyl}$	Převodní součinitel (průměr) $\kappa_{d,\,cyl}$	Válcová pevnost betonu $f_{c,\,cyl}$	Převodní součinitel (cyl-cube) $\kappa_{cyl,\,cube}$	Krychelná pevnost betonu $f_{c,\,cube}$
		[mm]	[mm]	[g]	[kg/m^3]	[kN]	[MPa]	[--]	[--]	[--]	[MPa]	[--]	[MPa]
V	V1	78,4	76,3	875	2380	209,0	43,3	0,973	0,839	0,933	33,9	1,245	42,2
	V2	78,5	77,4	913	2440	184,0	38,0	0,986	0,845	0,933	30,0	1,248	37,4
	V3	78,5	77,5	899	2400	203,0	41,9	0,987	0,845	0,933	33,1	1,247	41,2
	V4	78,4	78,3	923	2450	178,0	36,9	0,999	0,850	0,933	29,2	1,252	36,6
	V5	78,3	90,7	1105	2540	155,0	32,2	1,158	0,892	0,933	26,8	1,249	33,5
Průměr ze všech vzorků:					2450						**32,3**		**38,2**

Vysvětlivky k tabulce:

Zkušební vzorek nesplňuje požadavek ČSN EN 12504-1 na poměr velikosti max. zrna kameniva k průměru vývrtu (max. 1 : 3).

Zkušební vzorek obsahoval výztuž. Objemová hmotnost betonu je přítomností výztuže ovlivněna.

➔ **<u>Posouzení charakteristické pevnosti betonu v tlaku v konstrukci zkoušením vývrtů</u>**

(ČSN EN 13791, čl. 7.3.3 – Postup B)

Počet zkoušek **n**: 5

Krajní mez **k** příslušející malému počtu zkoušek (v závislosti na **n**): 7

Odhad charakteristické pevnosti betonu v tlaku je nižší hodnota z následujících hodnot:

$$f_{ck,\,is} = f_{m(n),\,is} - k = 38{,}2 - 7 = \mathbf{31{,}2\ MPa}$$

$$f_{ck,\,is} = f_{is,\,min} + 4 = 33{,}5 + 4 = 37{,}5\ \text{MPa}$$

<u>Kritérium shody dle tab. 1, ČSN EN 13791 pro **beton pevnostní třídy C 30/37**</u>

$$f_{ck,\,is,\,cube} = 31{,}2\ \text{MPa} \geq 31{,}0\ \text{MPa} = f_{ck,\,is,\,cube}$$

6.2.2.2 Nedestruktivní zkoušky pevnosti betonu v tlaku

Pro nedestruktivní stanovení pevnosti betonu v tlaku byla použita tvrdoměrná metoda Schmidtova tvrdoměru (typu N-34). Pro potřeby vyhodnocení byly provedeny zkoušky na třech zkušebních místech na každém panelu (přehled a označení zkušebních vzorků viz 6.2.2). Zkoušky a vyhodnocení byly provedeny dle ČSN 73 1373 [21], ČSN EN 12504-2 [22] a ČSN 73 0038 [23].

Tab. 3 Vyhodnocení tvrdoměrných zkoušek

Zk. místo	**Směr úderu**	**Odskok tvrdoměru *a***									**Průměr**	**f_{be} [MPa]**	**$f_{be}\, a_t\, a_w$ [MPa]**
REF 1													
1	→	47	46	45	48	47	45	46	45	45	46	52	39,8
2	→	45	49	45	43	46	48	45	47	47	46	52	39,8
3	→	45	47	47	45	49	47	47	48	46	47	53	40,5
REF 2													
1	→	47	49	47	47	49	48	46	47	47	47	53	40,5
2	→	45	46	49	51	45	47	47	49	45	47	53	40,5
3	→	49	45	47	47	49	45	48	47	49	47	53	40,5
REF 3													
1	→	47	45	47	46	45	49	51	47	45	47	53	40,5
2	→	46	49	51	45	47	49	47	49	46	48	55	42,1
3	→	45	49	47	48	49	45	46	47	45	47	53	40,5
30-1													
1	→	45	46	49	48	45	49	45	47	45	47	53	40,5
2	→	47	49	47	43	47	47	49	45	45	47	53	40,5
3	→	49	47	43	45	43	45	47	49	48	46	52	39,8
30-2													
1	→	49	45	47	47	51	50	49	45	47	48	55	42,1
2	→	49	51	49	45	51	49	47	45	49	48	55	42,1
3	→	47	45	50	53	47	45	49	51	47	48	55	42,1
30-3													
1	→	49	45	47	49	51	49	45	47	45	47	53	40,5
2	→	49	47	49	45	47	45	49	53	45	48	55	42,1
3	→	45	49	46	51	50	45	47	49	47	48	55	42,1
50-1													
1	→	45	45	43	47	47	49	51	45	47	47	53	40,5
2	→	47	47	47	46	43	45	49	45	47	46	52	39,8
3	→	49	45	48	47	45	47	49	45	45	47	53	40,5
50-2													
1	→	47	49	45	47	49	46	47	49	47	47	53	40,5
2	→	49	47	49	49	47	45	44	47	49	47	53	40,5
3	→	45	49	47	50	45	51	49	47	45	48	55	42,1
50-3													
1	→	47	45	49	48	47	49	45	45	47	47	53	40,5
2	→	49	49	47	51	49	47	45	49	47	48	55	42,1
3	→	45	49	47	47	49	45	48	47	51	48	55	42,1
Průměr													**40,9**

a_w = 0,85 a_t = 0,90

s_r = 0,84 MPa V_x = 0,02

m_x = 40,9 MPa

k_n = 1,71

Charakteristická pevnost $\mathbf{f_{ck,\,cube}} = m_x\,(1 - k_n V_x) =$ **39,5 MPa**

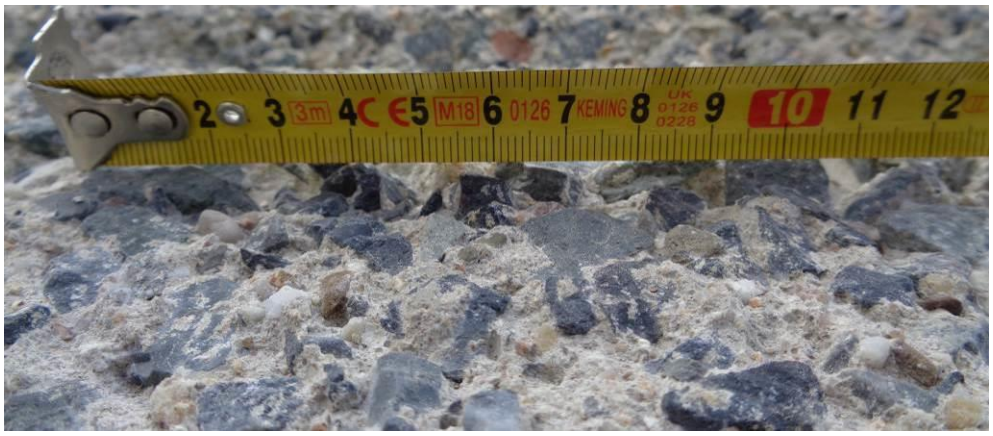
6.3 Krátkodobé ohybové zkoušky zesílených železobetonových prvků

6.3.1 Příprava zkušebních prvků

Vzhledem k původním rozměrům panelů, jejich stupně vyztužení a možnostem daným zkušebním zařízením byly panely rozříznuty na polovinu a jejich výsledné půdorysné rozměry tedy byly 2750 mm x 490 mm. Každý panel byl vzhledem k zjištěnému nízkému stupni vyztužení zesílen přidáním čtyř prutů betonářské výztuže průměru 10 mm (viz 6.2.1).

Poté byly horní povrchy prvků upraveny (na základě doporučení [15] a provedených experimentů viz 6.4)vybranou povrchovou úpravou – ručním tryskáním vodním paprskem. Po provedení povrchových úprav byly povrchy omyty vodou a očištěny od cizích částic. Na takto upravené povrchy byla provedena betonáž zesilujících vrstev UHPC. Zesíleny byly horní povrchy vzorků. Při zkouškách tak vrstva UHPC působila v tlaku. Byly tak vytvořeny 3 sady panelů, vždy po 4 vzorcích v každé sadě. Pro krátkodobé zkoušky byly použity vždy 3 prvky z každé sady a zbylý jeden kus byl použit na dlouhodobé zkoušky (dlouhodobým zkouškám se tato práce nevěnuje). Po betonáži byly prvky z TBG převezeny do Kloknerova ústavu, kde byly uskladněny v laboratorním prostředí až do dne zkoušek.

Obr. 20 Zkušební panely po provedení povrchové úpravy vodním paprskem



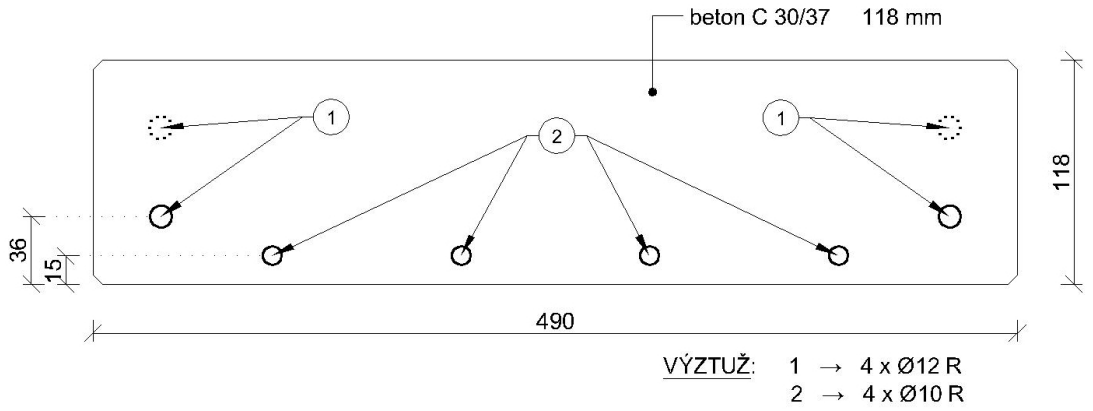
Obr. 21 Detailní pohled na povrch upravený vodním paprskem (průměrný materiálový úbytek 3,2mm)

Obr. 22 Betonáž zesilující vrstvy UHPC na zkušební vzorky

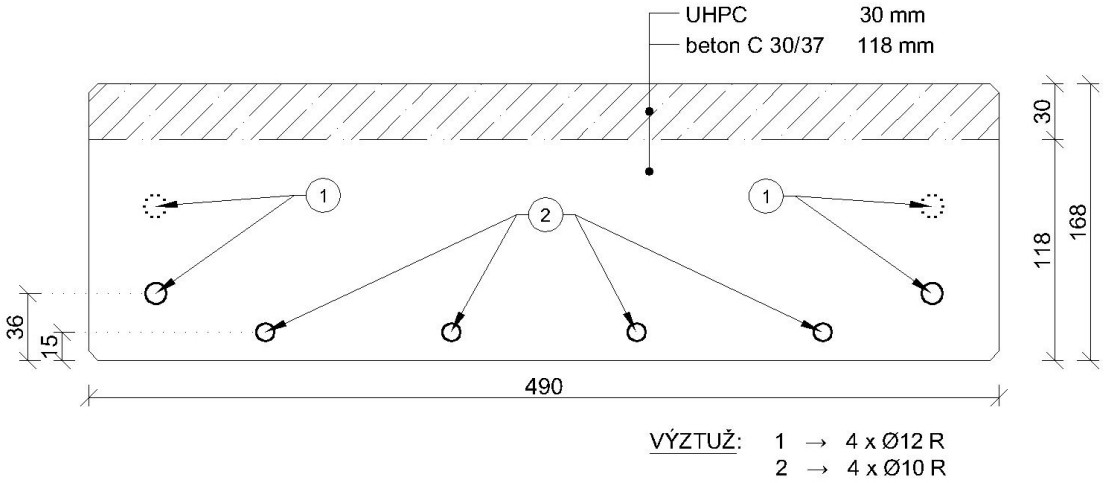
První sada panelů obsahovala referenční panely (označení REF-1, REF-2, REF-3). Jednalo se o nezesílené původní panely s výškou průřezu cca 118 mm (vyztužení viz 6.2.1.1). Příčný řez typickým referenčním panelem je ukázán na obr. 23.

Druhá sada panelů obsahovala zesílené panely 30 mm vrstvou UHPC bez použití měkké výztuže (označení 30-1, 30-2, 30-3). Povrch panelu byl zdrsněn ručním tryskáním vodním paprskem (viz 6.4). Výška průřezu byla cca 118 mm+ 30 mm. Příčný řez typickým panelem je ukázán na obr. 24.

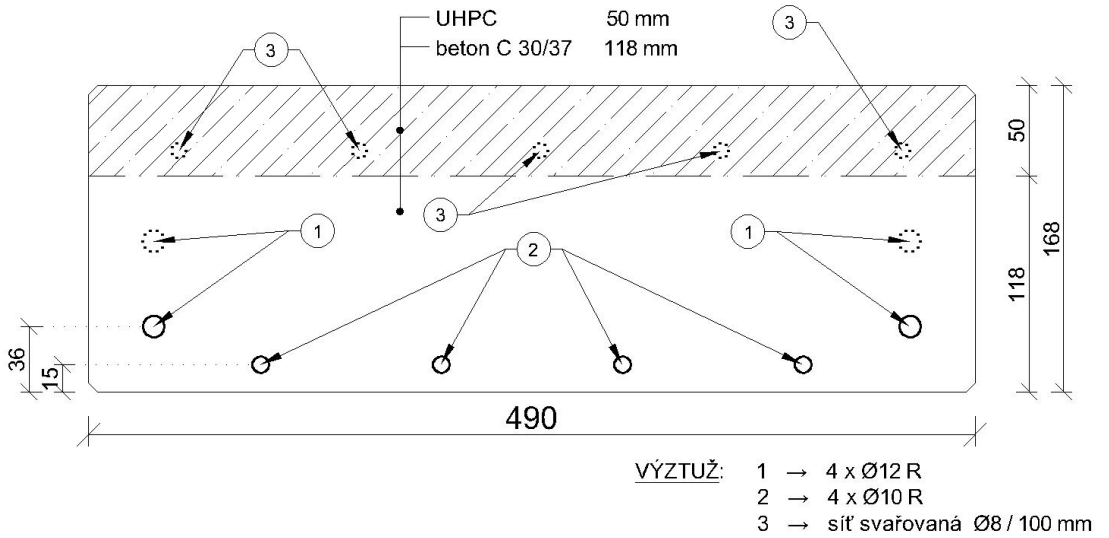
Třetí sada panelů obsahovala zesílené panely 50 mm vrstvou UHPC a vloženou kari-sítí o průměru 8 mm (označení 50-1, 50-2, 50-3). Povrch panelu byl zdrsněn ručním tryskáním vodním paprskem (viz 6.4). Výška průřezu byla cca 118 mm+ 50 mm. Příčný řez typickým panelem je ukázán na obr. X.



Obr. 23 Typický příčný řez referenčních panelů



Obr. 24 Typický příčný řez zesílených panelů - 30 mm UHPC



Obr. 25 Typický příčný řez zesílených panelů - 50 mm UHPC

6.3.2 Výpočet ohybové únosnosti zkušebních prvků

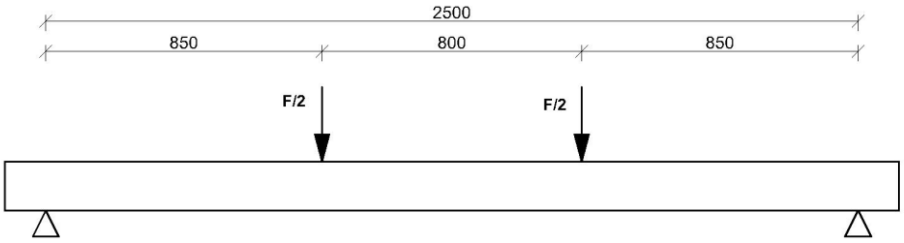
Pro potřeby ohybových zkoušek byl proveden orientační zjednodušený výpočet únosnosti v ohybu pro jednotlivé sady panelů. Ve výpočtu byl zanedbán vliv tlačené výztuže. Ve výpočtu také nebylo, díky nízké výšce vrstvy nadbetonávky a předpokládané poloze neutrální osy, počítáno s taženou částí UHPC. Mimo jiné také nebylo uvažováno napětí způsobené rozdílným smrštěním a dotvarováním betonu a nadbetonávky UHPC.

Do výpočtu byla použita průměrná hodnota pevnosti v tlaku zjištěná provedenými destruktivními zkouškami pevnosti betonu v tlaku (viz 6.2.2.1). Ta byla stanovena na $\mathbf{f_{c,cyl}}$ **= 32,3 MPa.** Pro použitou směs UHPC byla převzata průměrná hodnota pevnosti v tlaku z materiálových zkoušek provedených Kloknerovým ústavem. Ta byla stanovena na $\mathbf{f_{UHPC,c,cyl}}$ **= 140 MPa.** Výpočet byl proveden bez součinitelů používaných při návrhu, aby výsledky výpočtu co nejvíce odpovídaly skutečnosti.

Hodnota krycí vrstvy původní hlavní výztuže u spodního povrchu pro výpočet je brána jako průměrná hodnota z krycích vrstev na všech prvcích. Ta byla stanovena na 30 mm. Hodnota krytí dodatečně přidané výztuže je 10 mm.

Následují samotné výpočty provedené pro referenční panel, zesílený panel 30mm vrstvou UHPC a zesílený panel 50 mm vrstvou UHPC s kari-sítí (z důvodu blízkosti k neutrální ose, a tedy minimálního vlivu na únosnost, ve výpočtu zanedbána). U výpočtu zesílených panelů bylo základním předpokladem, že spolu UHPC a původní beton spolupůsobí. Bylo uvažováno, že tlačená oblast průřezu leží celá ve vrstvě UHPC (tento předpoklad byl ve výpočtech ověřen).

Na obr. 23-25 jsou zobrazeny typické příčné řezy jednotlivými prvky, pro které byl proveden výpočet. U všech třech průřezů byla spočtena ohybová únosnost a hodnota zatížení, které by mělo být dosaženo při zkoušce. Schéma uspořádání zkoušky ve čtyřbodovém ohybu je zobrazeno na následujícím obrázku.



Obr. 26 Schéma uspořádání čtyřbodové ohybové zkoušky

REFERENČNÍ PANELY

- není uvážena tlačená výztuž

- třída betonu C 30/37 → f_c = 32,3 MPa
- betonářská výztuž f_{yk} = 500 MPa

- výztuž: 4 x Ø 10 mm → A_{s1} = 314,1593 mm^2
  c_1 = 10 mm
  d_1 = 103 mm

  2 x Ø 12 mm → A_{s2} = 452,3893 mm^2
  c_2 = 30 mm
  d_2 = 82 mm

- šířka panelu b = 495 mm
- výška panelu h = 118 mm

$$x = \frac{A_{s1} * f_{yk} + As_2 * f_y}{0,8 * b * f_c} = 29,96 \text{ mm}$$

- ověření napětí ve výztuži:

$$\varepsilon_{yd} = \frac{f_{yk}}{E} = 0,0025$$

$$\varepsilon_{cu} = 0,0035$$

$$\varepsilon_{s1} = \frac{\varepsilon_{cu} * (d_1 - x)}{x} = 0,009 \quad \text{OK}$$

$$\varepsilon_{s2} = \frac{\varepsilon_{cu} * (d_2 - x)}{x} = 0,006 \quad \text{OK}$$

$$\mathbf{M_{Rd} = A_{s1} * f_{yk} * (d_1 - 0,4x) + As_2 * f_y * (d_2 - 0,4x) = 30,13 \text{ kNm}}$$

4 bodý ohyb → L = 2500 mm
d = 800 mm

$$\boxed{\mathbf{F = \frac{4 * MEd}{L - 800} = 70,90 \text{ kN}}}$$

Zesílený panel 30mm vrstvou UHPC

- není uvážena výztuž u horního povrchu původního průřezu kvůli zanedbatelnému vlivu na únosnost zesíleného průřezu

- třída betonu	C 30/37	→	f_c =	32,3	MPa
- UHPC			$f_{ck,UHPC}$ =	140	MPa
- betonářská výztuž			f_{yk} =	500	MPa

- výztuž:

4 x Ø	10	mm	→	A_{s1} =	314,1593	mm^2
				c_1 =	10	mm
				d_1 =	133	mm
2 x Ø	12	mm	→	A_{s2} =	452,3893	mm^2
				c_2 =	30	mm
				d_2 =	112	mm

- šířka panelu	b =	495	mm
- výška panelu	h =	118	mm
- výška nadbetonávky	h_{UHPC} =	30	mm

$$x = \frac{A_{s1} * f_{yk} + As_2 * f_y}{0,8 * b * f_{c,UHPC}} = 6,91 \text{ mm} \quad \text{OK}$$

- ověření napětí ve výztuži:

$$\varepsilon_{yd} = \frac{f_{yk}}{E} = 0,0025$$

$$\varepsilon_{cu} = 0,0035$$

$$\varepsilon_{s1} = \frac{\varepsilon_{cu} * (d_1 - x)}{x} = 0,064 \quad \text{OK}$$

$$\varepsilon_{s2} = \frac{\varepsilon_{cu} * (d_2 - x)}{x} = 0,053 \quad \text{OK}$$

$$\mathbf{M_{Rd} = A_{s1} * f_{yk} * (d_1 - 0,4x) + As_2 * f_y * (d_2 - 0,4x) = 45,17 \text{ kNm}}$$

4 bodý ohyb →

L =	2500	mm
d =	800	mm

$$\boxed{\mathbf{F = \frac{4 * MEd}{L - 800} = 106,27 \text{ kN}}}$$

Zesílený panel 50mm vrstvou UHPC

- není uvážena výztuž u horního povrchu původního průřezu ani karisíť kvůli zanedbatelnému vlivu na únosnost zesíleného průřezu

- třída betonu	C 30/37	→	f_c =	32,3	MPa
- UHPC			$f_{c,UHPC}$ =	140	MPa
- betonářská výztuž			f_{yk} =	500	MPa

- výztuž:

4 x Ø	10	mm	→	A_{s1} =	314,1593	mm^2
				c_1 =	10	mm
				d_1 =	153	mm
2 x Ø	12	mm	→	A_{s2} =	452,3893	mm^2
				c_2 =	30	mm
				d_2 =	132	mm

- šířka panelu	b =	495	mm
- výška panelu	h =	118	mm
- výška nadbetonávky	h_{UHPC} =	50	mm

$$x = \frac{A_{s1} * f_{yk} + As_2 * f_y}{0{,}8 * b * f_{c,UHPC}} = 6{,}91 \text{ mm} \quad \text{OK}$$

- ověření napětí ve výztuži:

$$\varepsilon_{yd} = \frac{f_{yk}}{E} = 0{,}0025$$

$$\varepsilon_{cu} = 0{,}0035$$

$$\varepsilon_{s1} = \frac{\varepsilon_{cu} * (d_1 - x)}{x} = 0{,}074 \quad \text{OK}$$

$$\varepsilon_{s2} = \frac{\varepsilon_{cu} * (d_2 - x)}{x} = 0{,}063 \quad \text{OK}$$

$$\mathbf{M_{Rd} = A_{s1} * f_{yk} * (d_1 - 0{,}4x) + As_2 * f_y * (d_2 - 0{,}4x) = 52{,}83 \text{ kNm}}$$

4 bodý ohyb →

L =	2500	mm
d =	800	mm

$$\boxed{\mathbf{F = \frac{4 * MEd}{L - 800} = 124{,}31 \text{ kN}}}$$

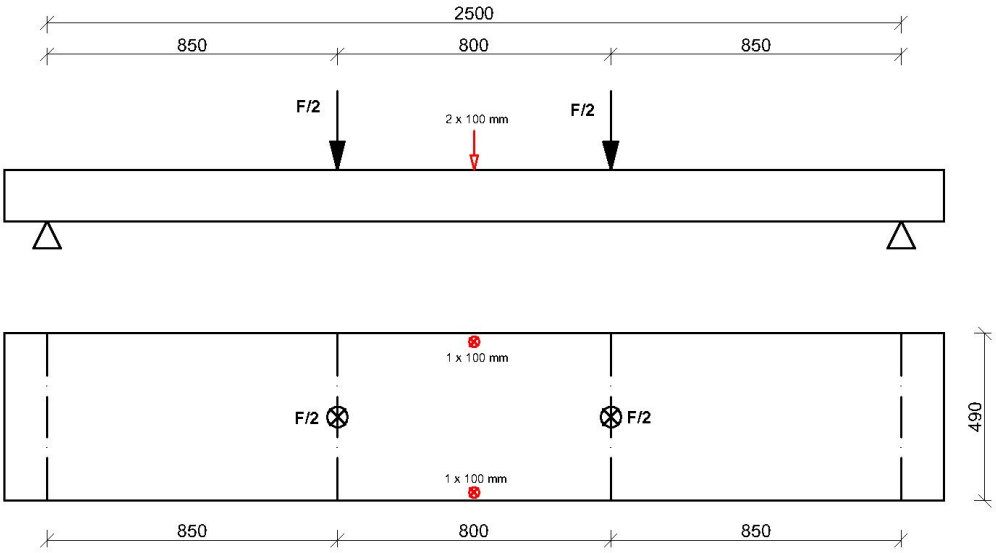
6.3.3 Průběh krátkodobých ohybových zkoušek

Připravené prvky byly do doby zkoušky uskladněny v laboratorním prostředí se stabilní teplotou a vlhkostí. Před zkouškou byly všechny prvky popsány přiděleným značením, vyfotografovány a kontrolně přeměřeny.

Pro samotné ohybové zkoušky bylo zvoleno čtyřbodové uspořádání zkoušky na zatěžovacím roštu. Při tomto uspořádání je vzorek namáhán pouze čistým ohybem, neboť mezi břemeny nepůsobí žádná posouvající síla.

Vzhledem k rozměrům zkušebních panelů a možnostem zkušebního zařízení bylo zvoleno rozpětí podpor 2500 mm se vzdáleností břemen 800 mm. Během jednotlivých zkoušek byl měřen průhyb uprostřed rozpětí prvku na obou krajích, aby bylo vyloučeno nesymetrické zatěžování. Dále byla měřena síla působící skrze hydraulický válec na prvek.

Pro měření průhybu byly použity dva potenciometry s rozsahem 100 mm umístěnými uprostřed rozpětí na obou krajích. Síla působící na prvek byla měřena silovým snímačem umístěným na hydraulickém válci. Schéma zkoušky je zobrazeno na obr. 27 včetně vyznačení umístění snímačů.



Obr. 27 Schéma zkoušky ve čtyřbodovém ohybu včetně umístění snímačů

Průběh ohybové zkoušky byl rozdělen na 2 fáze. První fáze zatěžovací zkoušky byla prováděna kvůli plánovaným dlouhodobým zkouškám v rámci projektu ČR MPO č. FV 20472. V této fázi probíhalo cyklické zatěžování prvku na vypočtené síly, při kterých by mělo dojít k iniciaci trhlin. Zatěžování bylo řízeno silou. V průběhu zatěžování byl po každém cyklu monitorován vznik trhlin. Mělo tak být ověřeno, že při vypočteném zatížení (vypočtené břemena pro dlouhodobé zkoušky) dojde ke vzniku trhlin.

Cyklické zatěžování probíhalo vždy v pěti cyklech. V každém cyklu docházelo k řízenému nárůstu síly z 0 kN na vypočtenou sílu a poklesu síly zpět na hodnotu 0 kN. Tyto síly byly pro jednotlivé sady prvků následující:

- Referenční panely → 0 kN – 15,3 kN
- Zesílený panel (30 mm UHPC) → 0 kN – 20,0 kN
- Zesílený panel (50mm UHPC) → 0 kN – 23,5 kN

Tyto síly pro potřeby ohybových zkoušek byly převzaty z výpočtů provedených Fakultou stavební ČVUT v Praze (nebylo předmětem této práce). Pro tyto krajní hodnoty cyklu byly během zkoušky zaznamenávány hodnoty průhybu ve středu rozpětí na obou krajích prvku.

V druhé fázi zkoušky probíhalo zatěžování prvku až do kolapsu. V této fázi bylo zatěžování řízeno posunem. Během této části byl monitorován vznik a rozvoj trhlin.

Obr. 28 Pohled na zkušební zařízení s připraveným prvkem ke zkoušce

6.3.4 Výsledky krátkodobých ohybových zkoušek

V první fázi ohybových zkoušek probíhalo cyklické zatěžování. Byly zaznamenávány hodnoty průhybu pro mezní hodnoty cyklu. Tyto hodnoty jsou shrnuty v tab. 4. V tabulce je pro každý prvek vyznačeno, v jakém cyklu byla zpozorována první viditelná trhlina (v tabulce vyznačeno vybarvením čísla cyklu.)

Tab. 4 Hodnoty průhybu při cyklickém zatěžování na stanovené hodnoty zatížení

	Cyklus	Síla [kN]	Průhyb [mm]
REF 1	1.	-1,0 -15,3	0,1 5,2
	2.	-1,0 -15,3	0,2 5,2
	3.	-1,0 -15,3	0,2 5,3
	4.	-1,0 -15,3	0,2 5,3
	5.	-1,0 -15,3	0,3 5,4
		-1,0	0,3
REF 2	1.	-1,0 -15,3	0,1 6,9
	2.	-1,0 -15,3	0,3 7,8
	3.	-1,0 -15,3	0,3 6,5
	4.	-1,0 -15,3	0,4 7,1
	5.	-1,0 -15,3	0,4 7,4
		-1,0	0,4
REF 3	1.	-1,0 -15,3	0,1 8,6
	2.	-1,0 -15,3	0,2 10,6
	3.	-1,0 -15,3	0,7 7,5
	4.	-1,0 -15,3	0,6 8,8
	5.	-1,0 -15,3	0,6 9,5
		-1,0	0,6

	Cyklus	Síla [kN]	Průhyb [mm]
30-1	1.	-1,0 -20,0	0,0 1,1
	2.	-1,0 -20,0	0,1 1,1
	3.	-1,0 -20,0	0,2 1,2
	4.	-1,0 -20,0	0,2 1,3
	5.	-1,0 -20,0	0,2 1,3
		-1,0	0,3
30-2	1.	-1,0 -20,0	0,0 1,1
	2.	-1,0 -20,0	0,1 1,2
	3.	-1,0 -20,0	0,2 1,3
	4.	-1,0 -20,0	0,2 1,3
	5.	-1,0 -20,0	0,2 1,3
		-1,0	0,2
30-3	1.	-1,0 -20,0	0,0 1,2
	2.	-1,0 -20,0	0,2 1,2
	3.	-1,0 -20,0	0,2 1,3
	4.	-1,0 -20,0	0,3 1,3
	5.	-1,0 -20,0	0,3 1,3
		-1,0	0,3

	Cyklus	Síla [kN]	Průhyb [mm]
50-1	1.	-1,0 -23,5	0,0 1,2
	2.	-1,0 -23,5	0,1 1,4
	3.	-1,0 -23,5	0,2 1,4
	4.	-1,0 -23,5	0,2 1,5
	5.	-1,0 -23,5	0,2 1,5
		-1,0	0,3
50-2	1.	-1,0 -23,5	0,0 1,4
	2.	-1,0 -23,5	0,2 1,8
	3.	-1,0 -23,5	0,2 1,8
	4.	-1,0 -23,5	0,3 1,9
	5.	-1,0 -23,5	0,3 1,9
		-1,0	0,3
50-3	1.	-1,0 -23,5	0,0 1,1
	2.	-1,0 -23,5	0,1 1,1
	3.	-1,0 -23,5	0,2 1,2
	4.	-1,0 -23,5	0,2 1,2
	5.	-1,0 -23,5	0,2 1,2
		-1,0	0,2

Z výsledků je patrné, že u referenčních panelů a zesílených panelů 50 mm UHPC došlo při cyklickém zatěžování na dané síly vždy ke vzniku trhlin. Vypočtené hodnoty pro tyto dvě sady tedy vyhovují pro použití při plánovaných dlouhodobých, kdy by mělo

dojít ke vzniku trhlin, aby zkoušky byly relevantní. U panelů zesílených 30 mm UHPC došlo ke vzniku trhlin pouze u vzorku 30-2. Pro tuto sadu by tedy mělo být zvýšeno zatížení pro dlouhodobé zkoušky.

Vznik trhlin lze u některých vzorků dobře vidět na hodnotách průhybu. Po vzniku trhlin dochází při cyklování k větším skokům v hodnotách trvalých deformací při odtížení (viz tabulka). Zejména tomu je tak u referenčních panelů, kde jsou hodnoty průhybů při cyklickém zatěžování vyšší než u zbylých dvou sad panelů.

V druhé fázi ohybových zkoušek byl prvek zatěžován až do jeho kolapsu. Během zkoušky byl zaznamenáván průhyb uprostřed dvěma potenciometry umístěnými uprostřed. Vzhledem k jejich rozsahu 100 mm a rozsahu hydraulického válce 200 mm bylo nutné podle situace během zkoušek prvek odtížit a přenastavit rozsahy snímačů i válce. Odtěžování je patrné na grafech průběhů závislosti zatížení na průhybu, které byly z dat vyhodnoceny. Během zkoušky došlo ve třech případech (REF 2, REF 3, 50-2) k šumu na snímači síly umístěném na hydraulickém válci. U těchto prvků byl vytvořen průběh křivky lineárním propojením bodů, které odpovídají správnému průběhu.

V následující tab. 5 jsou pro každý vyzkoušeny prvek uvedeny maximální hodnota zatížení a příslušný průhyb uprostřed rozpětí, kterých bylo při zkoušce dosaženo.

Tab. 5 Maximální hodnoty zatížení dosažené při ohybových zkouškách

	Průhyb při F_{max} [kN]	$F_{max,exp,REF}$ [kN]	$F_{max,cal,REF}$ [kN]
REF - 1	75,8	68,3	**70,9**
REF - 2	79,6	66,3	
REF - 3	84,2	69,3	
Průměr		**67,9**	

	Průhyb při F_{max} [kN]	$F_{max,exp,30}$ [kN]	$F_{max,cal,30}$ [kN]
30-1	147,9	107,4	**106,36**
30-2	161,5	108,0	
30-3	242,8	106,5	
Průměr		**107,3**	

	Průhyb při F_{max} [kN]	$F_{max,exp,50}$ [kN]	$F_{max,cal,50}$ [kN]
50-1	126,7	129,8	**124,39**
50-2	110,2	136,7	
50-3	153,4	134,4	
Průměr		**133,6**	

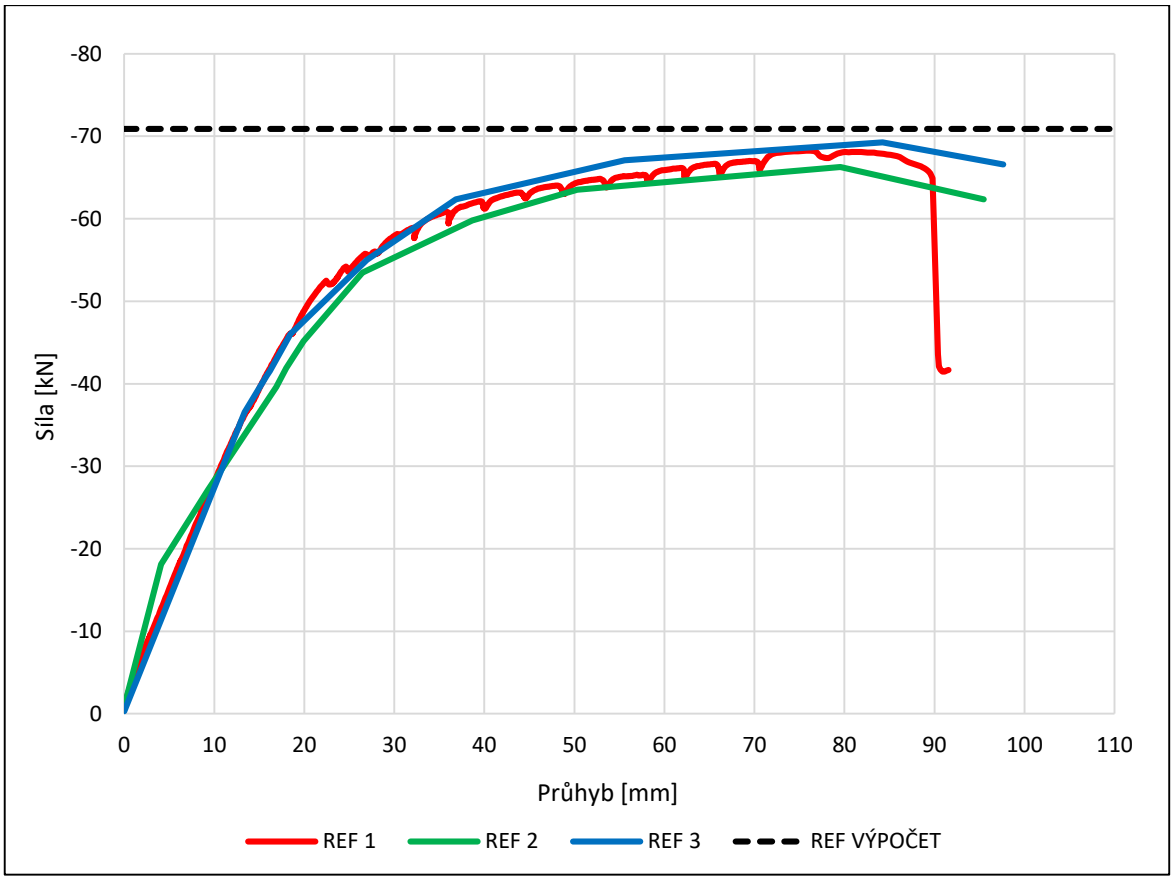
Výsledky na referenčních prvcích odpovídají vypočteným hodnotám. I přes zanedbání vlivu tlačené výztuže, který je díky malé vzdálenosti k neutrální ose zanedbatelný, lze předpokládat, že diagnostikou zjištěné parametry odpovídají skutečnosti. U zesílených prvků 30 mm UHPC bylo dosaženo lehce větší únosnosti, než bylo vypočteno. U zesílených panelů 50 mm UHPC byl pak rozdíl již větší. V průměru bylo dosaženo o cca 10 kN větších hodnot maximálního zatížení, než bylo zjištěno z výpočtu. Ve výpočtech tedy správně měla být započítána výztuž u horního povrchu původního průřezu. Díky vysoké pevnosti UHPC v tlaku se neutrální osa výrazně posune směrem k hornímu povrchu a původně tlačená horní výztuž se stává taženou. S rostoucí výškou vrstvy UHPC roste rameno vnitřních sil v průřezu a roste tedy i vliv tažené výztuže u horního povrchu původního betonu.

Ze zaznamenaných dat z ohybových zkoušek byly vyhodnoceny grafy průběhů závislosti působícího zatížení na průhybu uprostřed rozpětí zkušebních prvků. Tyto závislosti jsou vykresleny na grafech na obr. 28-29. Na grafu na obr. 30 je pak vykresleno srovnání typických průběhů pro jednotlivé typy zkoušených průřezů (REF, 30, 50). Na tomto srovnávacím grafu lze pozorovat vliv zesilující vrstvy (a její tloušťky) na průběh závislosti působícího zatížení na průhybu.

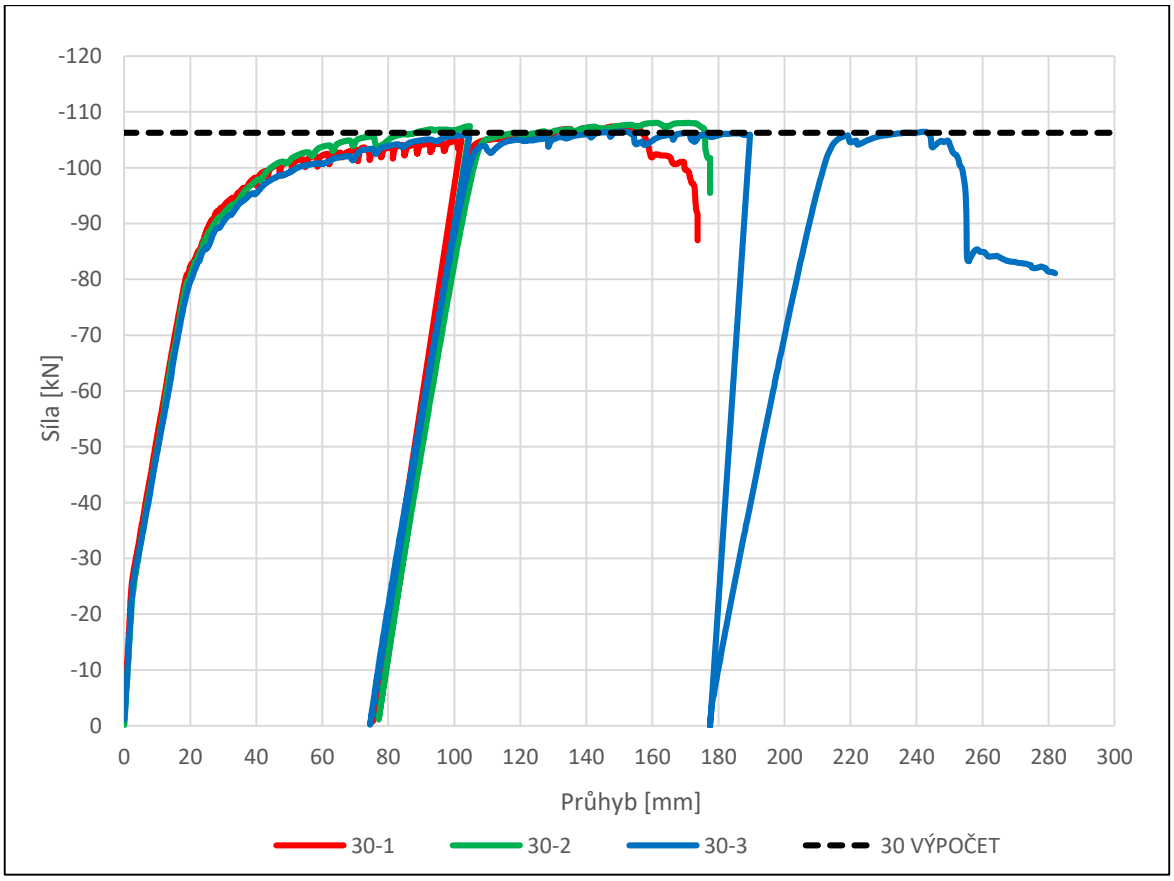
Z grafů je vidět, že vrstva UHPC má zásadní vliv na zvýšení únosnosti průřezu. U zesíleného panelu 30 mm UHPC bylo při ohybových zkouškách dosaženo v průměru o 58% vyššího maximálního zatížení, než které přenesly referenční prvky. Zesílený panel 50 mm UHPC vykazoval dokonce skoro dvojnásobnou únosnost v ohybu. Míra zvýšení únosnosti průřezu je vyjádřena v tab. 6, kde jsou pro všechny zkoušené prvky shrnuty maximální dosažené hodnoty zatížení při ohybových zkouškách a hodnoty z výpočtu. V tab. 4 je pak vyjádřeno, o kolik se procentuálně zvětšila únosnost zesílených průřezů vůči referenčnímu (nezesílenému) průřezu.

Tab. 6 Vypočtené stupně zesílení (procentuální nárůst vůči referenčním vzorkům)

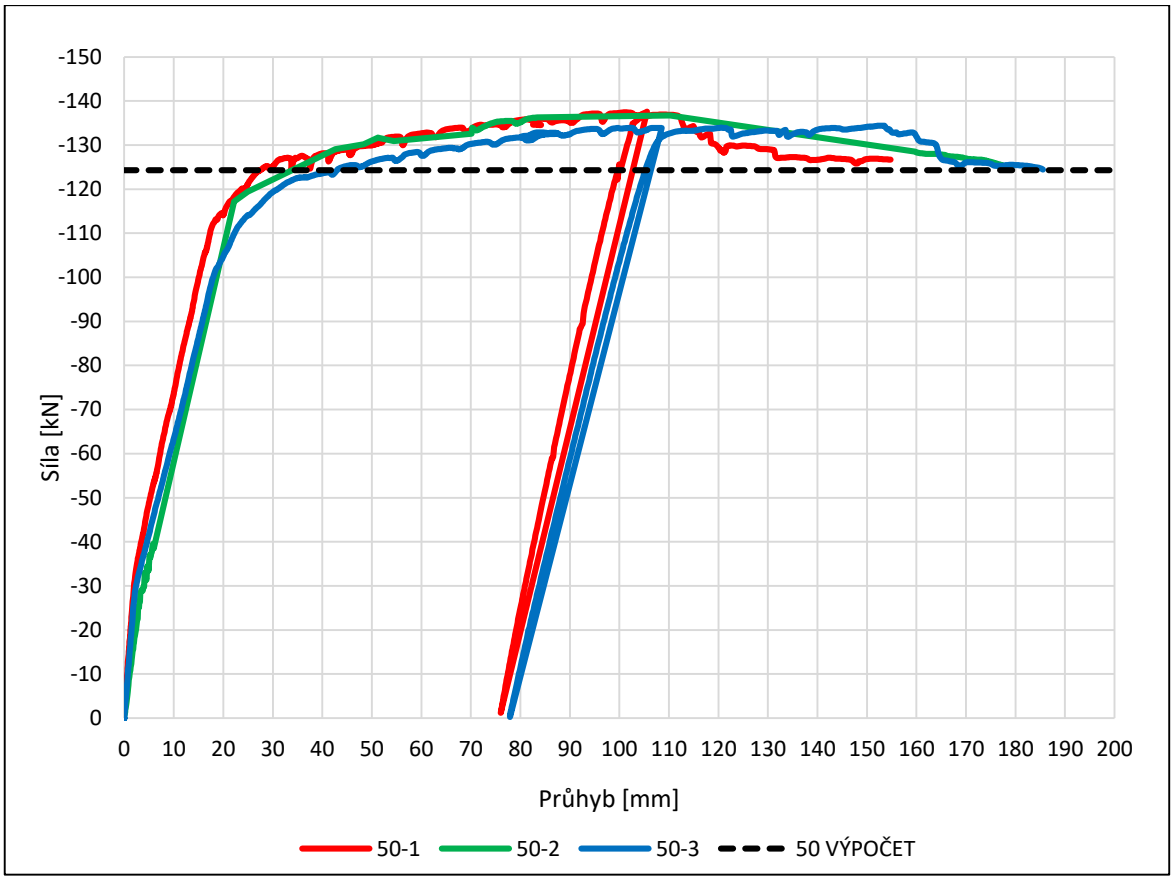
			REF	30	50
VÝPOČET	$F_{max,cal,i}$	[kN]	70,9	106,4	124,4
	$\mu_{cal} = \frac{(F_{max,cal,i} - F_{max,cal,REF})}{F_{max,cal,REF}}$	[%]	0%	50%	75%
EXPERIMENT	$F_{max,exp,i}$	[kN]	67,9	107,3	133,6
	$\mu_{exp} = \frac{(F_{max,exp,i} - F_{max,exp,REF})}{F_{max,exp,REF}}$	[%]	0%	58%	97%



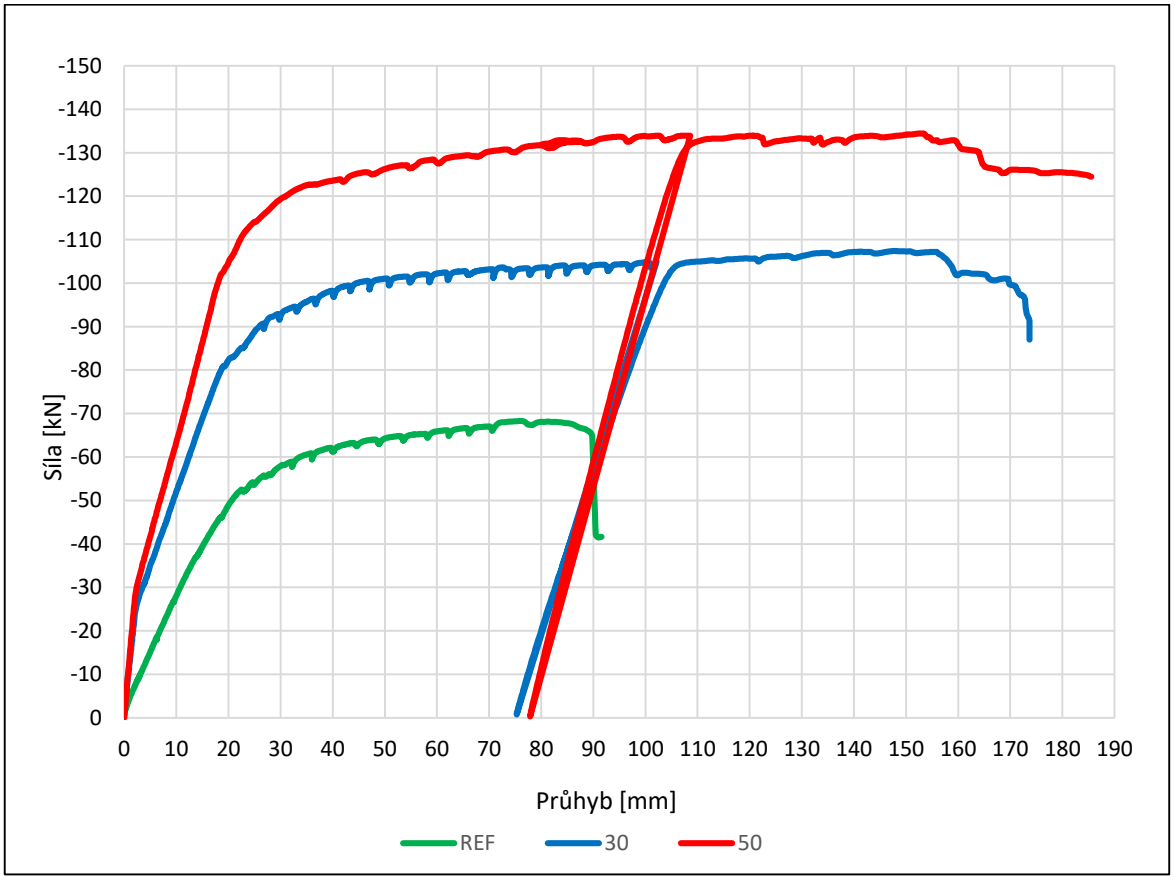
Obr. 29 Průběh závislosti zatížení na průhybu uprostřed rozpětí - REF



Obr. 30 Graf závislosti zatížení na průhybu uprostřed rozpětí - 30 mm UHPC



Obr. 31 Graf závislosti zatížení na průhybu uprostřed rozpětí - 50 mm UHPC



Obr. 32 Srovnání typických průběhů grafů závislosti zatížení na průhybu uprostřed rozpětí

Obr. 33 Detail porušení prvku při ohybové zkoušce - REF-1

Obr. 34 Detail porušení prvku při ohybové zkoušce - REF-2

Obr. 35 Detail porušení prvku při ohybové zkoušce – REF -3

Obr. 36 Detail porušení prvku při ohybové zkoušce – 30-1

Obr. 37 Detail porušení prvku při ohybové zkoušce – 30-2

Obr. 38 Detail porušení prvku při ohybové zkoušce - 30-3

Obr. 39 Detail porušení prvku při ohybové zkoušce - 50-1

Obr. 40 Detail porušení prvku při ohybové zkoušce - 50-2

Obr. 41 Detail porušení prvku při ohybové zkoušce - 50-3

Obr. 42 Monitoring vzniku trhlin během ohybové zkoušky (50 mm UHPC)

Obr. 43 Rozvoj trhlin během ohybové zkoušky (30 mm UHPC)

Obr. 44 Zatěžování panelu při ohybové zkoušce (30 mm UHPC)

Obr. 45 Ukázka duktilního chování zesílených prvků (30 mm UHPC)

6.4 Experimentální ověření kontaktu zesilující vrstvy UHPC a původního betonu

Základním předpokladem pro působení zesíleného průřezu jako celku je spolupůsobení zesilované betonové konstrukce a vrstvy UHPC. Provedené zahraniční výzkumy prokázaly, že lze zajistit dostatečnou únosnost spoje bez použití spřahujících prvků pouze s vhodně zvolenou povrchovou úpravou [15], [8]. Cílem je tedy vytvořit průřez, který je spřažen pouze soudržností použitých materiálů. V českých podmínkách s použitím receptur z lokálních surovin však tato skutečnost ověřena nebyla.

V rámci této práce byla zkoumána soudržnost zesilující vrstvy UHPC s povrchem původního betonu v závislosti na vybraných povrchových úpravách podkladu.

6.4.1 Povrchové úpravy

Pro účely experimentu byly opatřeny dva železobetonové panely staršího data výroby. Panely byly nejprve otočeny každý na opačnou stranu, tzn. horní relativně drsný povrch betonu po betonáži a spodní povrch panelu, který byl při betonáži v kontaktu s bedněním. Vznikly tím tak dva různé základní povrchy, na kterých byly aplikovány další povrchové úpravy. Jako finální povrchové úpravy byly zvoleny tyto čtyři typy povrchových úprav:

- Povrch bez úpravy
- Ruční tryskání vodním paprskem
- Strojní tryskání vodním paprskem
- Tryskání pískem

Povrchy ošetřené vodním paprskem (ručním i strojním) byly na obou panelech brány vzhledem k charakteru upraveného povrchu jako totožné. Zkoumáno bylo tedy ve výsledku 6 typů povrchových úprav, a to:

- Povrch bez úpravy – strana z bednění
- Povrch bez úpravy – horní strana
- Tryskání pískem – strana z bednění
- Tryskání pískem – horní strana
- Ruční tryskání vodním paprskem
- Strojní tryskání vodním paprskem

Obr. 46 Schéma rozmístění a označení jednotlivých ploch panelů pro odtrhové zkoušky na upravených površích (viz 6.4.2)

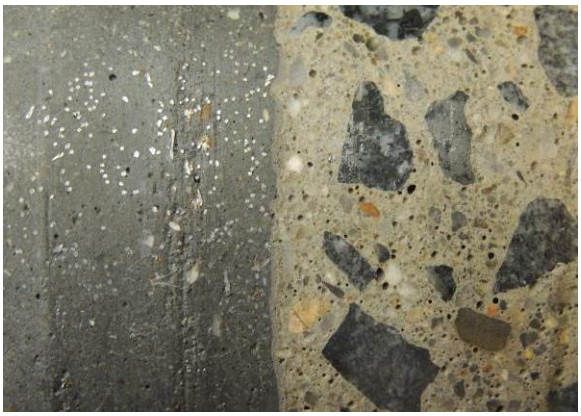
Materiálové úbytky způsobené povrchovými úpravami byly zjednodušeně změřeny a vyjádřeny jako jejich průměrná hodnota. Výsledné průměrné hodnoty materiálových úbytků jsou následující:

- Povrch bez úpravy → 0 mm
- Ruční tryskání vodním paprskem → 3,2 mm
- Strojní tryskání vodním paprskem → 27,6 mm
- Tryskání pískem → 1,0 mm

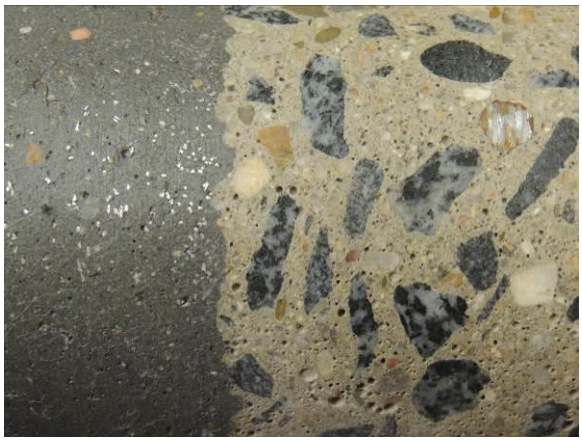
Při úpravě ručním tryskáním vodním paprskem docházelo spíše pouze k vymývání cementového pojiva mezi zrny kameniva a výška průřezu tedy zůstala téměř totožná s původní. Při úpravě strojním vodním paprskem docházelo nejen k vymývání cementového pojiva mezi zrny kameniva, ale i k uvolňování samotných zrn, což mělo za důsledek relativně velké ubrání z výšky průřezu. Pískování mělo ze všech úprav nejmenší vliv na drsnost povrchu.

Charakter úprav lze dobře vidět z obr. 46-55. Na nich jsou detailně zachyceny kontakty nové vrstvy UHPC s upravenými povrchy původního betonu. Soubor fotek obsahuje i vzorky, kde byl povrch původního betonu opatřen adhezním můstkem. Pro focení byly využity jádrové vývrty později použité pro tahové zkoušky (viz 6.4.3.2).

Obr. 47 Detail kontaktu vrstev – úprava HA

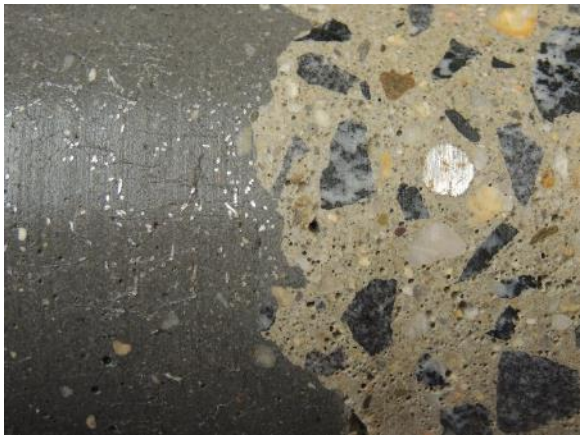


Obr. 48 Detail kontaktu vrstev – úprava HMA

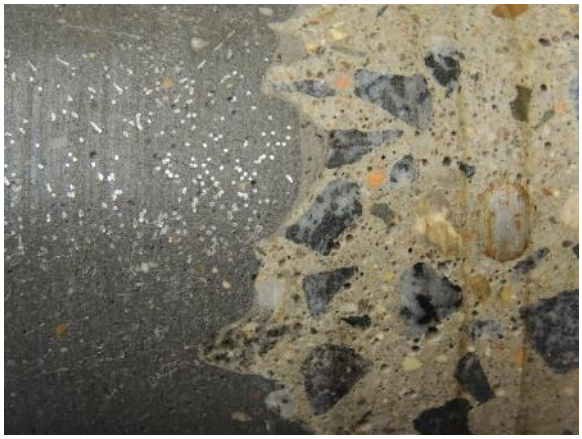


Obr. 49 Detail kontaktu vrstev – úprava HB

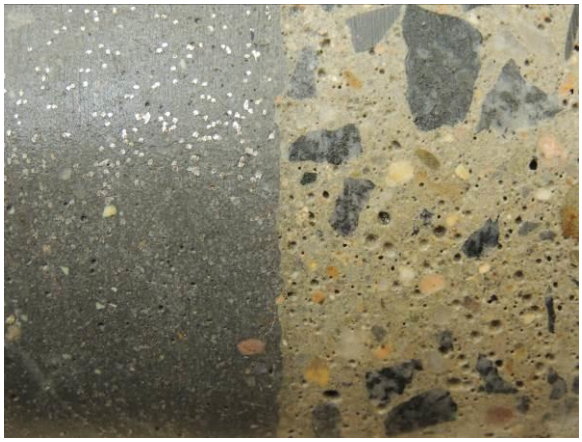
Obr. 50 Detail kontaktu vrstev – úprava HMB



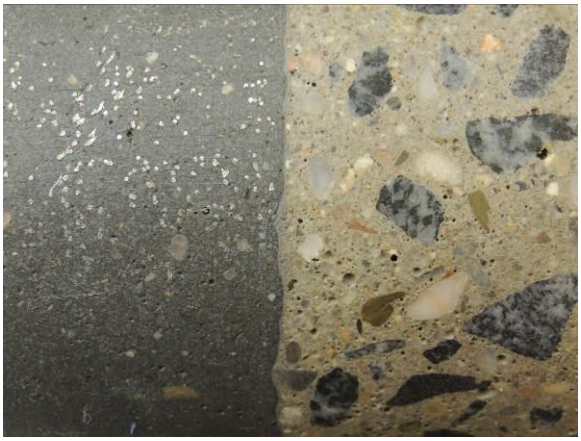
Obr. 51 Detail kontaktu vrstev - úprava HC



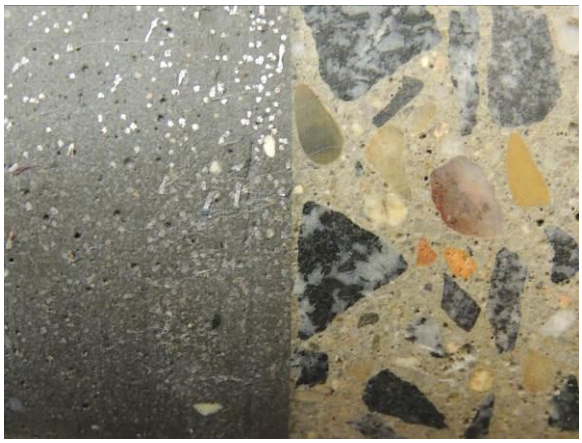
Obr. 52 Detail kontaktu vrstev - úprava HMC



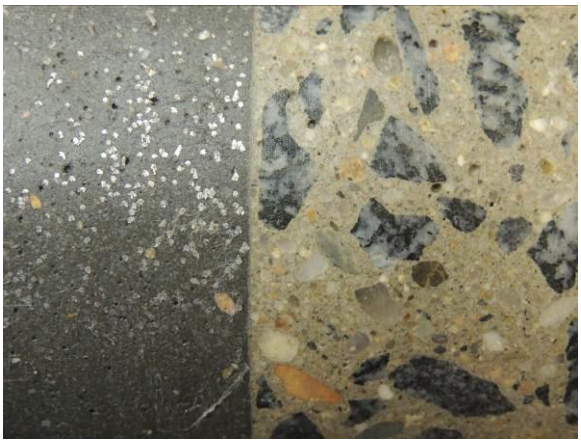
Obr. 53 Detail kontaktu vrstev - úprava HD



Obr. 54 Detail kontaktu vrstev - úprava HMD



Obr. 55 Detail kontaktu vrstev - úprava BD



Obr. 56 Detail kontaktu vrstev - úprava BMD

Obr. 57 Pohled na panel s dílčími plochami po úpravách

6.4.2 Odtrhové zkoušky upravených povrchů

Na jednotlivých upravených površích (viz schéma na obr. 45) byly před nanesením adhezního můstku a betonáží nadbetonávky provedeny odtrhové zkoušky, které měly ověřit přídržnost upravených povrchů. Pro odtrhové zkoušky musely být do povrchu nejprve předvrtány jádrovou vrtačkou kruhové zářezy o průměru 50 mm. Poté byly povrchy na předvrtaných místech očištěny a byly na ně nalepeny kruhové odtrhové terče průměru 50 mm (jako spojovací prostředek bylo použito lepidlo s rychlým nárůstem pevnosti a konečnou pevností v tahu převyšující běžné i vysokohodnotné betony).

V každé oblasti s jinak upraveným povrchem byly provedeny tři odtrhové zkoušky. Výsledky těchto zkoušek jsou shrnuty v tab. 7.

Tab. 7 Výsledky odtrhových zkoušek na upravených površích

BEDNĚNÍ		F [kN]	σ [MPa]
BA	BA - 1	4,9	2,50
	BA - 2	4,4	2,24
	BA - 3	6,7	3,41
Průměr			2,72
BB	BB - 1	6,7	3,41
	BB - 2	7,0	3,57
	BB - 3	5,5	2,80
Průměr			3,26
BC	BC - 1	viz HC	
	BC - 2		
	BC - 3		
Průměr			-
BD	BD - 1	7,0	3,57
	BD - 2	8,1	4,13
	BD - 3	7,0	3,57
Průměr			3,75

HORNÍ POVRCH		F [kN]	σ [MPa]
HA	HA - 1	8,3	4,23
	HA - 2	7,6	3,87
	HA - 3	6,8	3,46
Průměr			3,85
HB	HB - 1	9,0	4,58
	HB - 2	6,4	3,26
	HB - 3	7,8	3,97
Průměr			3,94
HC	HC - 1	4,3	2,19
	HC - 2	4,5	2,29
	HC - 3	3,9	1,99
Průměr			2,16
HD	HD - 1	4,7	2,39
	HD - 2	6,5	3,31
	HD - 3	4,3	2,19
Průměr			2,63

Z výsledků zkoušek na neupravených površích (oblast A) je patrný vliv původní hrubosti opačných stran prvku. Napětí při porušení dosahuje u hrubšího povrchu vyšších hodnot srovnatelných s hodnotami získanými na površích upravených ručním vodním paprskem (BB a HB). U oblastí upravených strojním vodním paprsek docházelo při úpravě ke značnému vymývání cementového pojiva a odhalení kameniva, což mělo za důsledek oslabení tahové únosnosti povrchových vrstev. Povrchy v oblastech BC a HC byly svým charakterem totožné, proto byly provedeny zkoušky pouze na jednom z povrchů. Při odtrhových zkouškách tak docházelo k vytrhávání kameniva při nižších hodnotách napětí. Nejlepších výsledků přídržnosti bylo dosaženo u hrubšího povrchu panelu upraveného ručním tryskáním vodním paprskem (oblast HB). Tento povrch se tedy zdá jako nejvhodnější úprava povrchu panelu pro následnou betonáž vrstvy UHPC.

Obr. 58 Detail povrchu - nahoře vodní paprsek strojní, dole pískování (hrubá strana panelu)

Obr. 59 Detail povrchu - nahoře vodní paprsek sruční, dole bez úpravy (hladký strana panelu)

Obr. 60 Detail povrchu - nahoře pískování, dole vodní paprsek strojní (hladká strana panelu)

Obr. 61 Detail povrchu - nahoře vodní paprsek ruční, dole bez úpravy (hrubá strana panelu)

6.4.3 Tahové zkoušky na ověření kontaktu vrstvy UHPC a upravených povrchů

Tahové zkoušky mají ověřit, zda povrchová úprava poskytuje dobré podmínky soudržnosti. Získané hodnoty napětí, při kterém se vzorek poruší, v podstatě vyjadřují pouze pevnost v tahu daného materiálu, který se ve spoji poruší. Tahová pevnost původního betonu, respektive pevnost povrchových vrstev, může být ovlivněna použitou povrchovou úpravou. Povrchová úprava může do jisté míry povrch betonu narušit (vznik mikrotrhlin). V tomto případě lze ze získaných hodnot z tahových zkoušek vypozorovat, do jaké míry dané povrchové úpravy ovlivňují pevnost povrchových vrstev betonu a následně i celkovou pevnost spoje.

Cílem bylo zjistit, jaké porušení vzorků s vybranými povrchovými úpravami původního betonu nastane. Při tahové zkoušce mohou teoreticky nastat 2 typy porušení vzorku (za předpokladu, že pevnost v tahu použitého spojovacího materiálu k nalepení tahových terčů na vzorky přesahuje tahovou pevnost původního betonu):

- porušení původního betonu
- delaminace vrstev

Pokud se vzorek při tahové zkoušce poruší v původním betonu, lze konstatovat, že použitá povrchová úprava poskytuje spoji dostatečnou soudržnost a nemělo by dojít k delaminaci. V případě porušení vzorku přímo na kontaktu vrstev (delaminace) daná povrchová úprava neposkytuje dobré podmínky soudržnosti, aby mohla vrstva UHPC a

původní beton spolupůsobit. Porušení vzorku ve vrstvě UHPC nelze předpokládat, neboť tahová pevnost UHPC značně přesahuje pevnost původního betonu.

Na každý z panelů byl ještě před betonáží z poloviny nanesen adhezní můstek. Poté byla provedena betonáž zesilující vrstvy UHPC (její tloušťka se liší v závislosti na materiálových úbytcích jednotlivých úprav). Výsledkem bylo tedy 12 oblastí s různými povrchovými a technologickými úpravami povrchu původního betonu. Schéma oblastí vytvořených na zkušebních prvcích je zobrazeno na obr. 62.

POVRCH Z BEDNĚNÍ (B)		HORNÍ POVRCH (H)	
BMD úprava: TRYSKÁNÍ PÍSKEM + MŮSTEK	**BD** úprava: TRYSKÁNÍ PÍSKEM	**HMD** úprava: TRYSKÁNÍ PÍSKEM + MŮSTEK	**HD** úprava: TRYSKÁNÍ PÍSKEM
BMC úprava: VODNÍ PAPRSEK SILNĚJŠÍ + MŮSTEK	**BC** úprava: VODNÍ PAPRSEK SILNĚJŠÍ	**HMC** úprava: VODNÍ PAPRSEK SILNĚJŠÍ + MŮSTEK	**HC** úprava: VODNÍ PAPRSEK SILNĚJŠÍ
BMB úprava: VODNÍ PAPRSEK SLABŠÍ + MŮSTEK	**BB** úprava: VODNÍ PAPRSEK SLABŠÍ	**HMB** úprava: VODNÍ PAPRSEK SLABŠÍ + MŮSTEK	**HB** úprava: VODNÍ PAPRSEK SLABŠÍ
BMA úprava: ŽÁDNÁ ÚPRAVA + MŮSTEK	**BA** úprava: ŽÁDNÁ ÚPRAVA	**HMA** úprava: ŽÁDNÁ ÚPRAVA + MŮSTEK	**HA** úprava: ŽÁDNÁ ÚPRAVA

Obr. 62 Schéma rozmístění a označení jednotlivých ploch panelů pro zkoušky soudržnosti vrstev

V rámci rozsahu experimentu byly provedeny a vyhodnoceny dva typy zkoušek zaměřené na soudržnost zesilující vrstvy UHPC s původním betonem. Po betonáži vrstvy UHPC a době zrání 28 dní byly v každé oblasti s jinou povrchovou a technologickou úpravou provedeny odtrhové a tahové zkoušky na jádrových vývrtech (v obou případech se jedná o zkoušky v prostém tahu). V každé oblasti byly obě zkoušky provedeny na třech vzorcích.

Povrchové úpravy v některých oblastech neposkytovaly spoji dostatečnou soudržnost a docházelo k oddělení vrstev už při jádrovém vrtání. Na obr. 65-66 jsou znázorněny zkušební panely s vyznačenými oblastmi, na kterých byly odebrány jádrové vývrty a provedeny odtrhové zkoušky. Jsou na nich vyznačeny i oblasti, kde se nepovedlo odebrat jádrové vývrty nebo provést odtrhové zkoušky, neboť došlo k delaminaci vrstev již při odvrtávání.

Obr. 63 Otvory po odebrání jádrových vývrtů na tahové zkoušky

Obr. 64 Provádění odtrhových zkoušek

BEDNĚNÍ	M adh. můstek	-
D TRYSKÁNÍ PÍSKEM	OK 3x odtrh	OK 3x odtrh
C VODNÍ PAPRSEK SILNĚJŠÍ	OK 3x odtrh	OK 3x odtrh
B VODNÍ PAPRSEK SLABŠÍ	viz HMB	viz HB
A BEZ POVRCHOVÉ ÚPRAVY	delaminace již při odvrtávání	delaminace již při odvrtávání

HRUBÝ PORVCH	M adh. můstek	-
D TRYSKÁNÍ PÍSKEM	OK 3x odtrh	OK 3x odtrh
C VODNÍ PAPRSEK SILNĚJŠÍ	viz HMC	viz HC
B VODNÍ PAPRSEK SLABŠÍ	OK 3x odtrh	OK 3x odtrh
A BEZ POVRCHOVÉ ÚPRAVY	OK 3x odtrh	OK 3x odtrh

Obr. 65 Schéma rozmístění odtrhových zkoušek

BEDNĚNÍ	M adh. můstek	-
D TRYSKÁNÍ PÍSKEM	OK 3x tah	OK 3x tah
C VODNÍ PAPRSEK SILNĚJŠÍ	viz HMC	viz HC
B VODNÍ PAPRSEK SLABŠÍ	viz HMB	viz HB
A BEZ POVRCHOVÉ ÚPRAVY	OK 1x tah (ostatní delaminace při odvrtávání)	delaminace již při odvrtávání

HRUBÝ PORVCH	M adh. můstek	-
D TRYSKÁNÍ PÍSKEM	OK 3x tah	OK 3x tah
C VODNÍ PAPRSEK SILNĚJŠÍ	OK 3x tah	OK 3x tah
B VODNÍ PAPRSEK SLABŠÍ	OK 3x tah	OK 3x tah
A BEZ POVRCHOVÉ ÚPRAVY	OK 3x tah	OK 3x tah

Obr. 66 Schéma rozmístění odběru jádrových vývrtů

6.4.3.1 Odtrhové zkoušky

Odtrhové zkoušky jsou zkoušky v prostém tahu prováděné přímo insitu na povrchu konstrukce. Aby bylo při zkoušce namáháno rozhraní vrstev a ne pouze povrchové vrstvy zesilující vrstvy UHPC, musely být zkušební místa předvrtány. Vrtnou korunkou byly skrze vrstvu UHPC předvrtány kruhové zářezy cca 5 mm do původního betonu. Poté byly povrchy na předvrtaných místech očištěny a byly na ně nalepeny kruhové odtrhové terče průměru 50 mm (jako spojovací prostředek bylo použito opět lepidlo Sikadur 31 CF Rapid). V každé oblasti s jinak upraveným povrchem byly provedeny tři odtrhové zkoušky. Výsledky odtrhových zkoušek jsou shrnuty v tab. 8.

Tab. 8 Výsledky odtrhových zkoušek

BEDNĚNÍ		F [kN]	charakter porušení	σ [MPa]
BA	BA - 1	delaminace vrstev již při odvrtání		
	BA - 2			
	BA - 3			
Průměr				-
BMA	BMA - 1	delaminace vrstev již při odvrtání		
	BMA - 2			
	BMA - 3			
Průměr				-
BB	BB - 1	viz HB		
	BB - 2			
	BB - 3			
Průměr				-
BMB	BMB - 1	viz HMB		
	BMB - 2			
	BMB - 3			
Průměr				-
BC	BC - 1	5,4	beton	2,75
	BC - 2	5,1	beton	2,60
	BC - 3	6,2	beton	3,16
Průměr				2,84
BMC	BMC - 1	3,4	můstek	1,73
	BMC - 2	3,0	můstek	1,53
	BMC - 3	3,2	můstek	1,63
Průměr				1,63
BD	BD - 1	7,3	beton	3,72
	BD - 2	4,8	beton	2,44
	BD - 3	8,3	beton	4,23
Průměr				3,46
BMD	BMD - 1	3,8	můstek	1,94
	BMD - 2	2,7	můstek	1,38
	BMD - 3	3,7	můstek	1,88
				1,73

HORNÍ POVRCH		F [kN]	charakter porušení	σ [MPa]
HA	HA - 1	6,3	beton	3,21
	HA - 2	6,0	beton	3,06
	HA - 3	5,8	beton	2,95
Průměr				3,07
HMA	HMA - 1	5,20	můstek	2,65
	HMA - 2	6,10	můstek	3,11
	HMA - 3	4,90	můstek	2,50
Průměr				2,75
HB	HB - 1	7,2	beton	3,67
	HB - 2	7,8	beton	3,97
	HB - 3	4,9	beton	2,50
Průměr				3,38
HMB	HMB - 1	4,90	můstek	2,50
	HMB - 2	5,20	můstek	2,65
	HMB - 3	6,10	můstek	3,11
Průměr				2,75
HC	HC - 1	viz BC		
	HC - 2			
	HC - 3			
Průměr				-
HMC	HMC - 1	viz BMC		
	HMC - 2			
	HMC - 3			
Průměr				-
HD	HD - 1	8,2	beton	4,18
	HD - 2	7,8	beton	3,97
	HD - 3	8,1	beton	4,13
Průměr				4,09
HMD	HMD - 1	2,90	můstek	1,48
	HMD - 2	3,60	můstek	1,83
	HMD - 3	3,10	můstek	1,58
Průměr				1,63

Z výsledků provedených odtrhových zkoušek je patrné, že použitý adhezní můstek nesplňuje svůj předpokládaný účel. U povrchů, kde byl použit adhezní můstek, bylo dosaženo ve všech případech výrazně nižších hodnot napětí a k porušení došlo vždy v kontaktu vrstev (v adhezním můstku). Na výsledcích získaných z neupraveného hrubšího povrchu panelu lze dobře demonstrovat nefunkčnost adhezního můstku (u hladkého povrchu panelu z bednění došlo k delaminaci vrstev již při vrtání jádrových vývrtů v obou případech). Hodnoty získané na povrchu s použitím a bez použití adhezního můstku vykazují nejen nejmenší rozdíly, ale zároveň hodnoty na povrchu s použitím adhezního můstku dosahují menších hodnot než bez něj.

Ve všech případech, kdy nebyl použit adhezní můstek, došlo vždy k porušení původního betonu. K porušení vrstvy UHPC nebo k porušení spoje nedošlo ani v jednom případě. Na obr. 67-76 jsou detailně vyfoceny charaktery porušení.

Obr. 67 Odtrh z oblasti HA (porušení v betonu)

Obr. 68 Odtrh z oblasti HMA (porušení v adhezním můstku)

Obr. 69 Odtrh z oblasti HB (porušení v betonu)

Obr. 70 Odtrh z oblasti HMB (porušení v adhezním můstku)

Obr. 71 Odtrh z oblasti HD (porušení v betonu)

Obr. 72 Odtrh z oblasti HMD (porušení v adhezním můstku)

Obr. 73 Odtrh z oblasti BC (porušení v betonu)

Obr. 74 Odtrh z oblasti BMC (porušení v adhezním můstku)

Obr. 75 Odtrh z oblasti BD (porušení v betonu)

Obr. 76 Odtrh z oblasti BMD (porušení v adhezním můstku)

6.4.3.2 Tahové zkoušky na jádrových vývrtech

Z každé oblasti s jinak upraveným povrchem byly odebrány tři jádrové vývrty průměru 100 mm. Vývrty byly poté v laboratoři změřeny a vyfotografovány. Obě dvě čela vývrtu byla zdrsněna a očištěna. Poté byly na čela nalepeny kruhové terče s průměrem >100 mm (jako spojovací prostředek bylo použito opět lepidlo Sikadur 31 CF Rapid) a na takto připravených vzorcích byly provedeny tahové zkoušky. Výsledky tahových zkoušek na jádrových vývrtech jsou shrnuty v tab. 9.

Obr. 77 Jádrové vývrty připravené na nalepení tahových terčů

Obr. 78 Sada jádrových vývrtů připravených na nalepení tahových terčů

Tab. 9 Výsledky tahových zkoušek provedených na jádrových vývrtech

BEDNĚNÍ		Ø [mm]	L_{CELK} [mm]	L_{UHPC} [mm]	L_{BET} [mm]	F [kN]	charakter porušení	σ [MPa]	PRŮMĚR
BA	BA - 1	delaminace vrstev již při odvrtávání jádrových vývrtů							
	BA - 2								
	BA - 3								
BMA	BMA - 1	93,5	162,1	44,8	117,3	1,25	adh. můstek	0,18	0,18
	BMA - 2	delaminace vrstev již při odvrtávání jádrových vývrtů							
	BMA - 3								
BB	BB - 1	viz HB							
	BB - 2								
	BB - 3								
BMB	BMB - 1	viz HMB							
	BMB - 2								
	BMB - 3								
BC	BC - 1	viz HC							
	BC - 2								
	BC - 3								
BMC	BMC - 1	viz HMC							
	BMC - 2								
	BMC - 3								
BD	BD - 1	93,5	153,4	39,8	113,6	21,75	beton	3,17	3,19
	BD - 2	93,5	155,5	40,8	114,7	23,50	beton	3,42	
	BD - 3	93,7	154,0	40,6	113,4	20,50	beton	2,97	
BMD	BMD - 1	93,6	152,2	38,5	113,7	6,75	adh. můstek	0,98	0,80
	BMD - 2	93,5	154,2	38,8	115,4	4,00	adh. můstek	0,58	
	BMD - 3	93,5	153,6	38,2	115,4	5,75	adh. můstek	0,84	

HRUBÝ POVRCH		Ø [mm]	L_{CELK} [mm]	L_{UHPC} [mm]	L_{BET} [mm]	F [kN]	charakter porušení	σ [MPa]	PRŮMĚR
HA	HA - 1	94,3	161,2	43,0	118,2	16,50	beton	2,36	2,59
	HA - 2	93,6	160,2	41,2	119,0	18,25	beton	2,65	
	HA - 3	93,7	160,5	42,4	118,1	19,00	beton	2,76	
HMA	HMA - 1	94,1	158,9	41,6	117,3	9,75	adh. můstek	1,40	1,24
	HMA - 2	93,8	163,0	46,3	116,7	10,25	adh. můstek	1,48	
	HMA - 3	93,7	162,4	43,9	118,5	5,75	adh. můstek	0,83	
HB	HB - 1	92,9	161,3	43,3	118,0	19,50	beton	2,88	2,81
	HB - 2	92,9	159,7	44,0	115,7	16,50	beton	2,43	
	HB - 3	94,4	160,9	42,1	118,8	21,75	beton	3,11	
HMB	HMB - 1	93,0	163,9	47,7	116,2	7,50	adh. můstek	1,10	1,69
	HMB - 2	92,9	165,4	49,3	116,1	13,50	adh. můstek	1,99	
	HMB - 3	93,2	163,3	46,5	116,8	13,50	adh. můstek	1,98	
HC	HC - 1	94,4	162,4	74,1	88,3	21,75	beton	3,11	2,84
	HC - 2	94,4	163,2	71,4	91,8	19,50	beton	2,79	
	HC - 3	94,6	161,6	73,0	88,6	18,50	beton	2,63	
HMC	HMC - 1	94,6	164,5	68,6	95,9	13,50	adh. můstek	1,92	1,99
	HMC - 2	94,6	165,5	71,9	93,6	12,75	adh. můstek	1,81	
	HMC - 3	94,7	166,2	68,9	97,3	15,75	adh. můstek	2,24	
HD	HD - 1	94,9	165,1	46,8	118,3	17,00	beton	2,40	2,28
	HD - 2	94,3	163,2	46,3	116,9	18,25	beton	2,61	
	HD - 3	94,3	159,8	45,6	114,2	12,75	beton	1,83	
HMD	HMD - 1	94,4	169,8	48,6	121,2	7,00	adh. můstek	1,00	1,40
	HMD - 2	94,4	167,5	48,4	119,1	10,25	adh. můstek	1,46	
	HMD - 3	94,4	165,4	47,8	117,6	12,25	adh. můstek	1,75	

Výsledky tahových zkoušek na odebraných jádrových vývrtech potvrzují výsledky odtrhových zkoušek v otázce adhezního můstku. Opět bylo dosaženo výrazně nižších hodnot napětí při porušení spoje než u povrchů bez adhezního můstku. K porušení těchto vzorků došlo ve všech případech ve spoji vrstev (v adhezním můstku).

U ostatních úprav byly získány velmi podobné hodnoty (okolo 3 MPa, viz tabulka 9). Ve všech případech, kdy nebyl použit adhezní můstek, došlo opět vždy k porušení původního betonu. K porušení vrstvy UHPC nebo k porušení spoje (bez adhezního můstku) nedošlo ani v jednom případě.

Na následujících obrázcích 79-89 jsou vyfoceny jádrové vývrty po provedení tahových zkoušek. Z každé oblasti s jinou povrchovou úpravou je zde ukázka jednoho vybraného vývrtu s popisem charakteru porušení (beton/adh.můstek).

Obr. 79 Jádrový vývrt HA-1 po tahové zkoušce (porušení v betonu)

Obr. 80 Jádrový vývrt HMA-2 po tahové zkoušce (porušení v adhezním můstku)

Obr. 81 Jádrový vývrt HB-1 po tahové zkoušce (porušení v betonu)

Obr. 82 Jádrový vývrt HMB-3 po tahové zkoušce (porušení v adhezním můstku)

Obr. 83 Jádrový vývrt HC-2 po tahové zkoušce (porušení v betonu)

Obr. 84 Jádrový vývrt HMC-2 po tahové zkoušce (porušení v adhezním můstku)

Obr. 85 Jádrový vývrt HD-3 po tahové zkoušce (porušení v betonu)

Obr. 86 Jádrový vývrt HMD-3 po tahové zkoušce (porušení v adhezním můstku)

Obr. 87 Jádrový vývrt BMA-1 po tahové zkoušce (porušení v adhezním můstku)

Obr. 88 Jádrový vývrt BD-3 po tahové zkoušce (porušení v betonu)

Obr. 89 Jádrový vývrt BMD-2 po tahové zkoušce (porušení v adhezním můstku)

6.4.4 Shrnutí výsledků

Na základě provedených odrthových a tahových zkoušek na vzorcích byla sestaven přehled získaných hodnot shrnutých v tab. 10.

Tab. 10 Shrnutí výsledků z tahových zkoušek

			ODTRHOVÁ ZKOUŠKA		PROSTÝ TAH		PRŮMĚR
			σ [MPa]	porušení	σ [MPa]	porušení	σ [MPa]
POVRCH Z BEDNĚNÍ	adhezní můstek	žádná úprava	-	můstek	0,18	můstek	0,18
		vodní paprsek slabší	2,75	můstek	1,69	můstek	2,22
		vodní paprsek silnější	1,63	můstek	1,99	můstek	1,81
		tryskání pískem	1,73	můstek	0,80	můstek	1,27
	bez adhezního můstku	žádná úprava	-	rozhraní	-	-	
		vodní paprsek slabší	3,38	beton	2,81	beton	3,09
		vodní paprsek silnější	2,84	beton	2,84	beton	2,84
		tryskání pískem	3,46	beton	3,19	beton	3,33
HORNÍ POVRCH	adhezní můstek	žádná úprava	2,75	můstek	1,24	můstek	1,99
		vodní paprsek slabší	2,75	můstek	1,69	můstek	2,22
		vodní paprsek silnější	1,63	můstek	1,99	můstek	1,81
		tryskání pískem	1,63	můstek	1,40	můstek	1,52
	bez adhezního můstku	žádná úprava	3,07	beton	2,59	beton	2,83
		vodní paprsek slabší	3,38	beton	2,81	beton	3,09
		vodní paprsek silnější	2,84	beton	2,84	beton	2,84
		tryskání pískem	4,09	beton	2,28	beton	3,19

Základním získaným poznatkem je, že zvolený adhezní můstek nemá pozitivní vliv na zajištění soudržnosti vrstev. Z přehledu je patrné, že získané hodnoty tahových napětí, při kterém se spoj delaminuje, jsou u povrchů s použitím adhezního můstku v průměru nižší než u povrchů bez použití adhezního můstku. U všech zkoušených vzorků došlo k delaminaci vrstev přímo v adhezním můstku. Charakter porušení je dobře vidět na fotkách zkušebních vzorků po odtrhových a tahových zkouškách. Můstek zde tedy vrstvy spíše separoval.

U všech ostatních povrchových úprav došlo k porušení původního betonu u všech zkoušených vzorků. To ukazuje na to, že provedené úpravy poskytly velmi dobré podmínky pro výslednou pevnost spoje, která byla vyšší než pevnost původního betonu. Lze tedy předpokládat, že bude při použití jakékoliv z těchto úprav dosaženo dostatečné soudržnosti vrstev a nemělo by dojít k delaminaci.

Všechny získané hodnoty jsou v podstatě pevnosti původního betonu v tlaku. Přesto se získané hodnoty mírně liší. Z výsledných hodnot tedy lze vypozorovat, jaký vliv na pevnost povrchových vrstev daná úprava má (jak daná úprava mechanicky poškodila povrch). Nejlepší hodnoty byly získány u povrchů upravených tryskáním pískem. Jednalo se o mírnou úpravu povrchu, která spíše jenom očistila povrch a odstranila tenkou vrstvičku

betonu. Povrch tak nebyl nijak mechanicky poškozen a nedocházelo ke vzniku mikrotrhlin ani k přílišnému odhalení kameniva.

Podobně tomu bylo u povrchů upravených ručním vodním paprskem. Zde byly hodnoty sice nižší ale pořád velmi dobré. Při úpravě strojním tryskáním vodním paprskem docházelo k výraznějšímu zásahu do struktury povrchu. Došlo k odhalení či uvolnění zrn kameniva a byla tak narušena pevnost povrchových vrstev betonu a to následně ovlivnilo výslednou soudržnost spoje.

U povrchů, kde nebyla provedena žádná úprava, byl zaznamenán největší rozdíl mezi výsledky na hladkém povrchu z bednění a hrubém povrch. Zatímco na hladkém povrchu docházelo k delaminaci vrstev již při odběru jádrových vývrtů a navrtávání drážek pro odtrhové zkoušky, na hrubém povrchu jsou výsledné hodnoty srovnatelné s hodnotami při úpravě strojním tryskáním vodním paprskem.

6.5 Návrh zkoušky na protlačení

Protlačení je způsob porušení betonových desek způsobeného velkým smykovým namáháním. Toto smykové porušení může nastat v místech pod působícím osamělým břemenem nebo v místech bodových podepření. Nastává tedy u lokálně podepřených desek nebo u základových konstrukcí, konkrétně u základových desek.

Zesilování lokálně podepřených prvků lze realizovat několika možnými způsoby, jako jsou například zvětšení tloušťky desky nebo zvětšení průřezu sloupu u desky náběhem. Ohybové zkoušky provedené v této práci prokázaly, že použitím UHPC lze výrazně navýšit ohybovou únosnost. Lze tedy předpokládat i zvýšení smykové únosnosti betonového prvku. V českých poměrech však tato skutečnost ověřena nebyla a je tedy nutné ji ověřit.

Cílem této části práce je navrhnout způsob, jak by bylo možné v budoucnu experimentálně ověřit únosnost zesílených betonových prvků v protlačení.

6.5.1 Příprava zkušebních vzorků

Pro tuto zkoušku nebudou použity již stávající prvky, ale budou vyrobeny prvky nové, které budou přesně odpovídat požadavků, zejména pak prostorovým rozměrům roštu. Předběžným návrhem referenčního vzorku se zabývá kapitola 6.5.3.

Pro potřeby této zkoušky budou vyrobeny 3 sady čtvercových železobetonových desek s nízkým zárodkem sloupu uprostřed (rozměry viz 6.5.3.) a kruhovými otvory uprostřed stran blízko hraně desky pro možnost upevnění. Každá z těchto sad bude obsahovat 3 prvky. Pro zkoušky byly navrženy tyto tři typy průřezů:

- Referenční nezesílený prvek
- Prvek zesílený pomocí vrstvy 30 mm UHPC
- Prvek zesílený pomocí vrstvy 50 mm UHPC s přidanou výztuží

Zesilován bude povrch bez zárodku sloupu, který bude při zkoušce namáhán tahem. Zesilované povrchy budou upraveny ručním tryskáním vodním paprskem, který se osvědčil při ohybových zkouškách, provedených v rámci této práce. Následně bude provedena betonáž zesilující vrstvy UHPC.

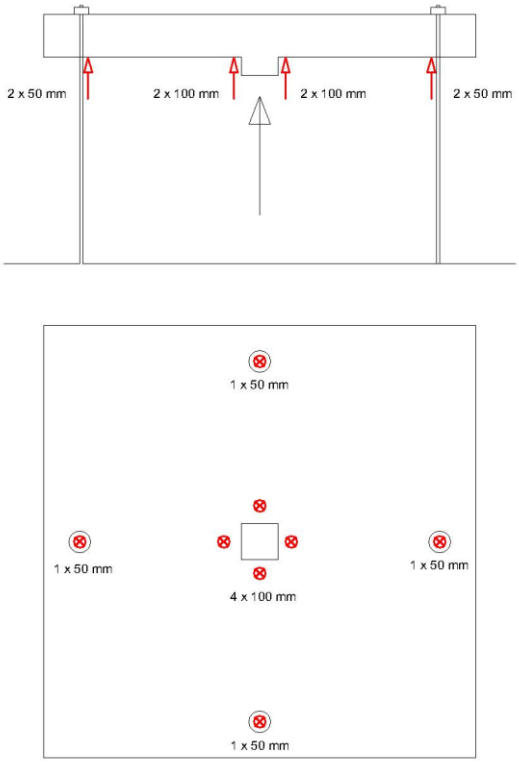
6.5.2 Zkušební systém a průběh zkoušky

Zkušební prvky budou zkoušeny na zatěžovacím roštu, na který budou vzorky upevněny. Aby bylo možné snadněji monitoring vzniku a rozvoje trhlin, bylo navrženo, že protlačování bude probíhat směrem nahoru. Na rošť bude upevněn hydraulický válec s rozsahem 20t a zkušební prvky budou umístěny nad něj. Ab bylo takto prvek možné zkoušet, musí být na rošt připevněny 4 závitové tyče (návrh dimenzí nebyl v rámci této práce

proveden). Na ty bude před zkouškou nasazen vzorek a položen na hydraulický válec, který bude umístěn na zárodku sloupu. Poté na závitovou tyč budou nasazeny masivní ocelové podložky s maticemi, které budou tvořit podpory desky. Síla bude do desky vnášena přes ocelovou roznášecí desku rozměrů 100x100 mm, která bude umístěna mezi válec a zárodek sloupu na desce. Jednoduché schéma zkušebního systému je ukázáno na obr. 90.

Měřeno bude 8 potenciometry umístěnými podle schéma na obr. 90. Čtyři potenciometry s rozsahem 50 mm budou umístěny v místě podepření a další čtyři s rozsahem 100 mm budou umístěny okolo zárodku sloupu.

Během zkoušky budou zaznamenávány hodnoty průhybu z potenciometrů a síla vnášená do prvku.Samotná zatěžovací zkouška bude řízena posunem a bude zatěžováno až do kolapsu prvku.



Obr. 90 Schéma zkušebního zařízení s rozmístěním snímačů

6.5.3 Návrh referenčního prvku

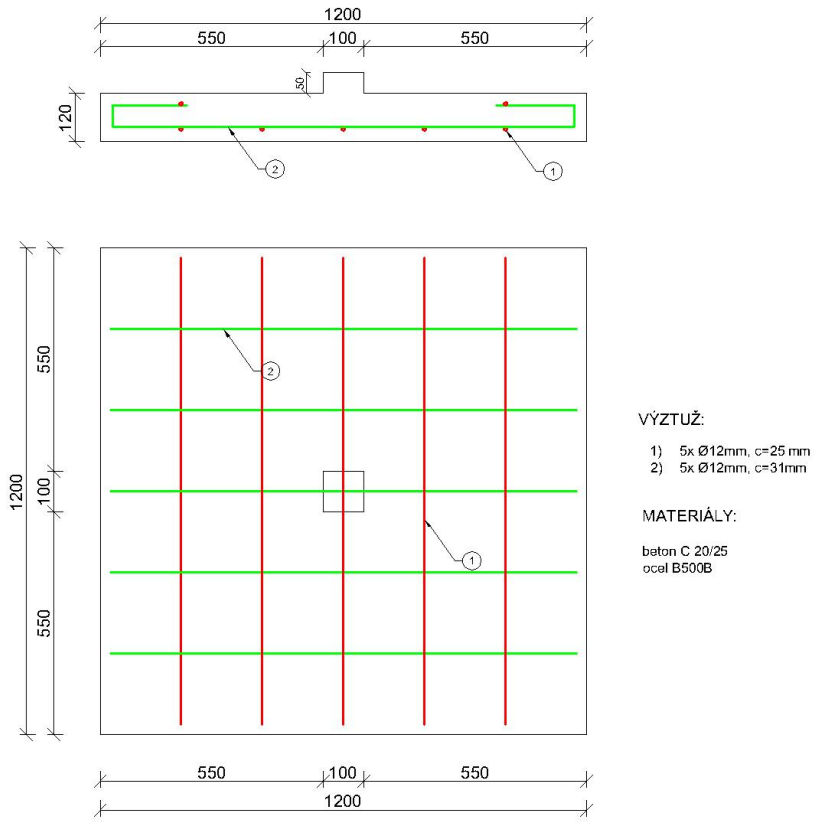
Jelikož je nutné prvky vyrobit, musel být proveden návrh referenčního prvku. Návrh byl ovlivněn zejména prostorovým omezením zkušebního roštu a silovým rozsahem válce. Rozměry a vyztužení zkušebního tělesa byly navrženy tak, aby porušení prvku nastalo přibližně v polovině silového rozsahu válce, tzn. přibližně při síle 100 kN. Hlavní při návrhu bylo zajistit, aby nebyl prvek porušen ohybem. Prvek byl navržen tak, aby nastalo

porušení protlačením. Díky ověřeným schopnostem UHPC zesílit prvek v ohybu, nemusela být při návrhu ponechána velká rezerva v momentové únosnosti prvku.

Navržena byla deska bez výztuže na protlačení, aby při zkouškách nebylo dosahováno velkých hodnot zatížení (nemusí být použity masivnější prvky pro ukotvení, atd..).

Při návrhu byla navržena deska o tloušťce 120 mm a půdorysných rozměrů 1200x1200 mm. Rozpětí podpor při zkoušce bylo zvoleno 1000 m. Při návrhu se uvažovalo kloubové podepření desky v polovinách jednotlivých stran ve vzdálenosti 100 mm od hrany desky. V desce bylo navrženo vyztužení 5 x Ø 12 mm u horního povrchu desky v obou směrech. Malé nadpodporové momenty na spodním povrchu způsobené uložením desky byly zachyceny protažením výztuže z horního povrchu do vzdálenosti 300 mm od okraje desky, aby nebyla ovlivněna únosnost v protlačení. Návrh vyztužení zárodku sloupu nebyl v rámci této práce řešen. Schématický výkres prvku je na obr. 92.

Podle provedeného výpočtu by mělo dojít k porušení prvku protlačením při síle okolo 105 kN.



Obr. 91 Schéma referenčního prvku s vyztužením

VÝPOČET ÚNOSNOSTI V PROTLAČENÍ NAVRŽENÉHO REFERENČNÍHO VZORKU

pozn.: Ve výpočtu je uvažována průměrná hodnota pevnosti betonu v tlaku a nejsou uvažovány návrhové součinitel

- navržené použité materiály:

- třída betonu	C 20/25	f_{ck} =	20,0	MPa
		f_{cm} =	28,0	MPa
		f_{ctm} =	2,2	MPa
-betonářská ocel	B500 B	f_y =	500	MPa

- navržené rozměry zkušebního prvku:

šířka sloupu	a =	100	mm
šířka desky	b_{CELK} =	1200	mm
rozpětí mezi podporami	b =	1000	mm
tloušťka desky	h =	120	mm

- navržené vyztužení:

v obou směrech u horního povrchu	**5**	**Ø 12 mm**	**$A_{s,prov}$ = 565**	**mm^2**
u spodního povrchu podpor stejné vyztužení v oblasti do vzdálenosti 200 mm od kraje → zachycenínadpodporových nývrhových momentů nad podporami				

krytí výztuže	c_x =	25	mm
použitá bet. výztuž	Ø =	12	mm

$$A_{s,min,1} = \frac{0{,}23\ f_{ctm} * b * d}{f_{yk}} = \frac{0{,}23 \quad 2 \quad 1000 \quad 94}{500} = \mathbf{95{,}1\ mm^2}$$

$$A_{s,min,2} = 0{,}0013 * b * d = 0{,}0013 \quad 1000 \quad 89 = 115{,}7\ mm^2$$

$S_{sl,pmax,1}$ = 2h = **240 mm** > 200,0 mm OK

$S_{sl,pmax,2}$ = 300 mm

- výpočet únosnosti v protlačení

- účinná výška průřezu

$d_x = h - c - Ø/2 =$ 89 mm

$d_y = h - c - Ø/2 - Ø =$ 77 mm

$d = (d_x + d_y)/2 =$ 83 mm

- kontrolované obvody

$u_0 = 4a =$ 400 mm

$u_1 = 4a + 4\pi d =$ 1518 mm

- maximální smyk. napětí v kontrolovaných obvodech

$\beta =$ 1,15 ….. uvažováno jako vnitřní sloup

$$\rho_{1x} = \frac{A_{sx}}{d_x * b} = \frac{565{,}5}{89 \quad 1000} = 0{,}00635$$

$$\rho_{1x} = \frac{A_{sx}}{d_x * b} = \frac{565{,}5}{77 \quad 1000} = 0{,}00734$$

$\rho_1 = (\rho_{1x} * \rho_{1v})^{0,5} = 0,00683$

$k = 1 + (200/d)^{0,5} = 2,55230 < 2,0$ NOK → $k = 2,0$

- únosnost tlačené diagonály

$\upsilon_{r,max} = 0,4 * 0,6 *(1 - f_{ck}/250)*f_{cm} = 6,182$ Mpa

$\boldsymbol{\upsilon_{r,max} = 6,18}$ **MPa**

- únosnost desky bez výztuže na protlačení

$\upsilon_{r,c} = 0,18*k*(100\rho_1*f_{cm})^{1/3} = 0,963$ Mpa

$\boldsymbol{\upsilon_{r,c} = 0,96}$ **MPa**

- zatížení při porušení prvku

1) podrcením tlačené diagonály

$$F_{max} = \frac{\upsilon_{r,max} * u_0 * d}{\beta} = \frac{6,18 \quad 0,4 \quad 0,083}{1,15} = 178,5 \text{ kN}$$

2) protlačením

$$\mathbf{F_{max}} = \frac{\upsilon_{r,c} * u_1 * d}{\beta} = \frac{0,96 \quad 1,518 \quad 0,083}{1,15} = \mathbf{105,5 \text{ kN}}$$

- ověření, zda nedojde k porušení ohybem dříve než protlačením

- výpočetní model v softwaru SCIA Engineer 18

Prvek byl modelován jako izotropní deska uložená na čtyřech kloubových bodových podporách umístěných ve středu každé ze stran. Tento model byl zatížen silou F = 105,5 kN, při které by mělo dojít k porušení prvku protlačením desky.

$$x = \frac{A_s * f_{yk}}{0,8 * b * f_{cm}} = \frac{565,5 \quad 500}{0,8 \quad 1000 \quad 28,0} = 12,62 \text{ mm}$$

$M_{R,x} = A_s * f_{yk} * (d_x - 0,4x) = 23,74$ kNm

$M_{R,y} = A_s * f_{yk} * (d_y - 0,4x) = 20,34$ kNm

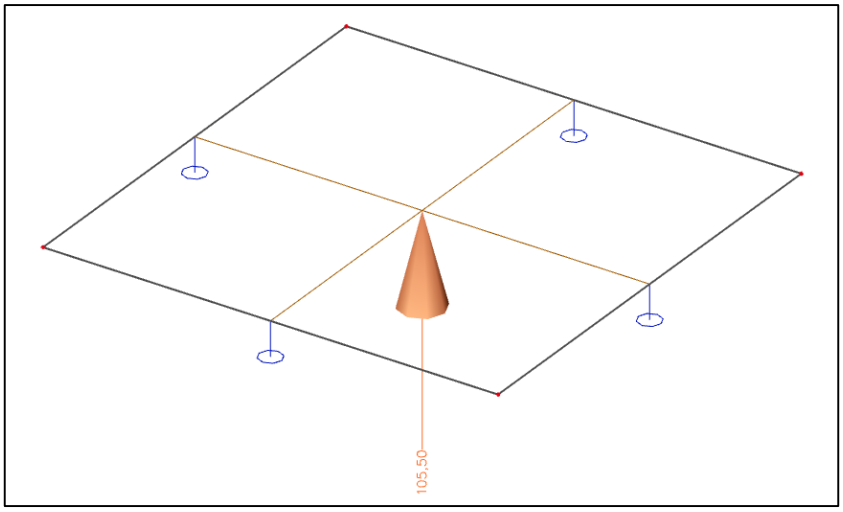
- horní povrch: $M_x = 17,34$ kNm < $M_{R,x} = 23,74$ kNm OK

$M_y = 17,34$ kNm < $M_{R,y} = 20,34$ kNm OK

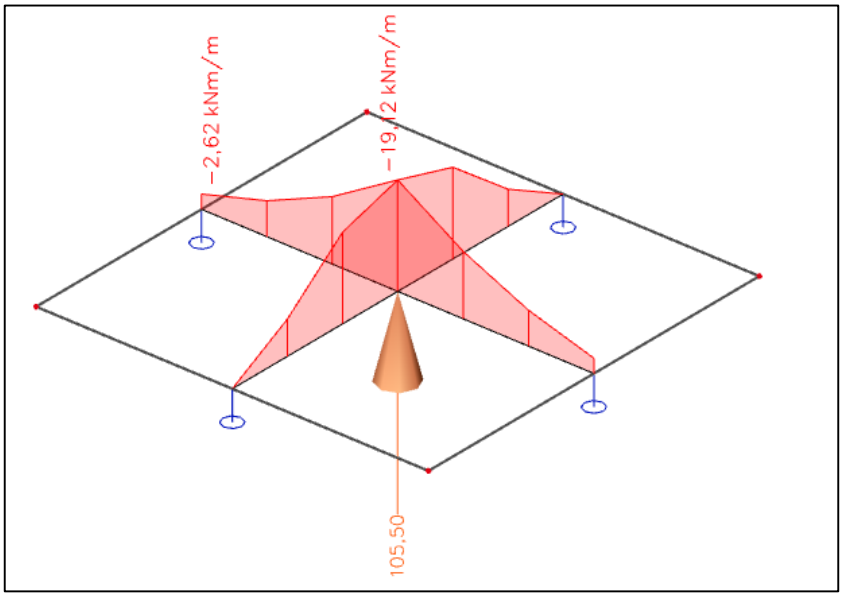
- spodní povrch: $M_x = 5,09$ kNm < $M_{R,x} = 23,74$ kNm OK

$M_y = 5,09$ kNm < $M_{R,y} = 20,34$ kNm OK

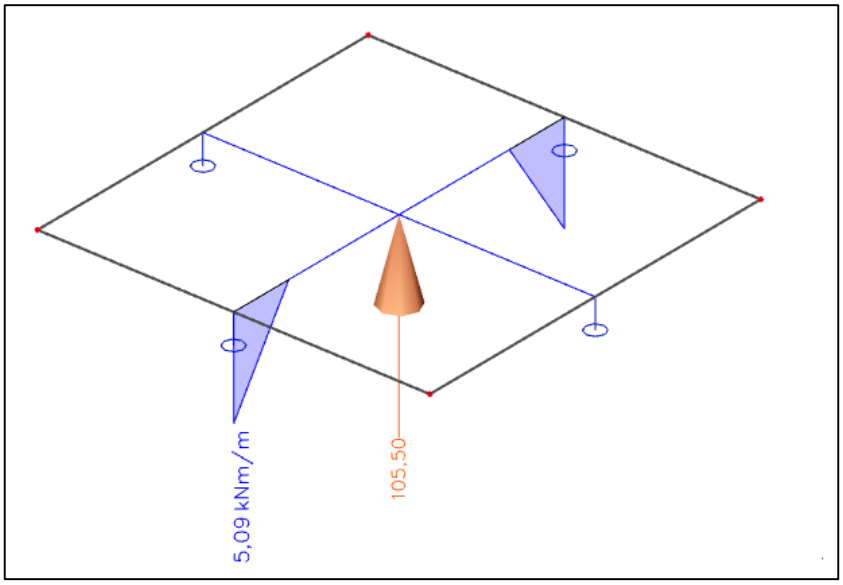
Navržené zkušební těleso by během zkoušky mělo porušit protlačením desky při zatížení silou Fmax = 95,7 kN



Obr. 92 Výpočetní model



Obr. 93 Průběh návrhového momentu ve směru X u horního povrchu



Obr. 94 Průběh návrhového momentů u spodního povrchu ve směru X

7 ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo experimentální ověření betonových prvků zesílených pomocí UHPC. V úvodu práce byly shrnuty základní důvody vedoucí k zesílení konstrukce. Dále zde byly shrnuty základní vlastnosti ultra-vysokohodnotného betonu a jeho užití při zesilování konstrukcí včetně uvedení několika příkladů realizací. Část teoretické části také byla věnována problematice soudržnosti mezi vrstvou UHPC a původním betonem.

Jedním z hlavních cílů této práce bylo experimentální ověření kontaktu původního betonu a vrstvy UHPC. Cílem bylo ověřit vliv několika vybraných povrchových úprav původního betonu na výslednou soudržnost původního betonu a zesilující vrstvy UHPC.

Byly ověřovány čtyři v praxi běžné úpravy povrchů - povrch bez úpravy, tryskání vodním paprskem (strojní a ruční) a tryskání pískem. Byly takto upraveny oba povrchy zkušebních panelů, což zvýšilo počet povrchů s rozdílnou hrubostí povrchu

Při odtrhových testech provedených přímo na ošetřených površích vykazoval nejlepší výsledky povrch upravený ručním tryskáním vodním paprskem, kde pevnost povrchových vrstev v tahu dosahovala průměrné hodnoty 3,94 MPa na 50 mm odtrhových terčích. To jenom podpořilo rozhodnutí o použití této úpravy pro úpravu povrchu prvků na ohybové testy popsané výše. Dobré výsledky také vykazoval neupravený hrubý povrch panelu, kde bylo dosaženo průměrné hodnoty 3,85 MPa. Nejhorší výsledky vykazoval povrch upravený strojním tryskáním vodním paprskem. To poukazuje na skutečnost, že touto úpravou byly poškozeny povrchové vrstvy betonu.

Pro tahové zkoušky na již spřaženém povrchu byl na poloviny obou panelů nanesen adhezní můstek. Tahové zkoušky na jádrových vývrtech a odtrhové zkoušky jednoznačně prokázaly nefunkčnost zvoleného adhezního můstku. Na všech zkušebních vzorcích s adhezním můstkem došlo k delaminaci v kontaktu vrstev při nízkých napětích v tahu. Dále se také neosvědčil neupravený povrch hladké strany zkušebního panelu, kdy docházelo k delaminaci vrstev již při jádrovém vrtání. U všech ostatních povrchů bylo prokázáno, že dokáží zajistit spolupůsobení vrstvy UHPC s původním betonem, neboť všechny zkušební vzorky byly v tahových zkouškách porušeny v původním betonu.

Že má drsnost přesto jistý vliv na soudržnost spoje, lze ukázat na výsledcích na neupravených površích panelů. Na hladkém povrchu z bednění docházelo k delaminaci při odběru vzorků, ale na hrubém horním povrchu bylo dosaženo při zkouškách porušení v původním betonu. Nijak neupravené hladké povrchy tedy neposkytují dobrou soudržnost. Pokud je však povrch alespoň mírně zdrsněn (viz tryskání pískem) tyto podmínky se výrazně zlepší a jsou srovnatelné s hrubějšími úpravami. Naopak pokud je povrch zdrsněn příliš,

dochází k poškození povrchu, a opět se tak snižuje pevnost povrchových vrstev a tak i výsledná pevnost spoje.

Dalším z hlavních cílů této práce byla příprava, provedení a vyhodnocení ohybových zkoušek na prvcích zesílených pomocí UHPC. Tyto zkoušky měly ověřit předpoklad, že při vhodné povrchové úpravě podkladního betonu lze zajistit spolupůsobení vrstev i bez použití spřahovacích prvků. Pro ohybové zkoušky byly připraveny 3 typy zkušebních prvků – referenční (nezesílený) panel, zesílený panel vrstvou 30 mm UHPC a zesílený prvek vrstvou 50 mm UHPC s přidanou betonářskou výztuží. Před provedením nadbetonávky byly povrchy upraveny na doporučení [15] vodním paprskem.

Během průběhu ohybových zkoušek nedošlo na žádném panelu k delaminaci vrstev. Zvolená úprava vodním paprskem se tak ukázala jako velmi efektivní prostředek, jak zajistit spolupůsobení vrstev pouze jejich mechanickou soudržností v kontaktu vrstev. Bylo tedy potvrzeno doporučení [15] o vhodnosti této povrchové úpravy.

Výsledky ohybových zkoušek na zesílených panelech prokázaly značné navýšení únosnosti prvku v ohybu. Panely zesílené 30 mm UHPC vykazovaly přibližně 58% nárůst únosnosti v ohybu oproti referenčním panelům. U panelů zesílených 50 mm UHPC byl zaznamenán v průměru 97% nárůst únosnosti. Kromě jiného byl také patrné značné zlepšení duktilního chování u zesílených panelů. Průhyby u zesílených panelů při maximálním zatížení byly navzájem velmi podobné, ale oproti referenčním panelům byly více než dvojnásobné.

V rámci návrhu zkoušky na protlačení bylo navrženo referenční nezesílené tělěso. Dále byly zvoleny způsoby zesílení, a to vrstvou 30 mm UHPC a vrstvou 50 mm UHPC, pro které by byly zkoušky provedeny. Byl popsán průběh zkoušky a zkušební zařízení.

Při návrhu zesílení pomocí UHPC je stěžejní zvolit správnou úpravu povrchu, aby bylo dosaženo požadovaného chování spřaženého průřezu. Autor práce doporučuje vždy na povrchu zesilované konstrukce provést odtrhové testy. Pokud již původní povrch vykazuje dobré výsledky, nemusí být nutné provádět jakoukoliv povrchovou úpravu. V případě, že je povrchová úprava nutná, lze doporučit úpravu ručním tryskáním vodním paprskem, aby nedocházelo k porušování povrchových vrstev betonu a nebyla tak snížena soudržnost vrstev ve výsledném průřezu. Na základě výsledků ohybových zkoušek, je jednoznačné, že zesilování betonových konstrukcí pomocí UHPC je efektivní metodou, jak výrazně zvyšovat únosnost betonových prvků a také především jejich trvanlivost. Je tedy více než pravděpodobné, že postupem času bude čím dál tím více využívána v praxi.

8 SEZNAM LITERATURY

[1] BILČÍK, J., DOHNÁLEK, J. *Sanace betonových konstrukcí*. Bratislava: Jaga group, 2003. ISBN 80-88905-24-9.

[2] http://www.ebeton.cz/pojmy/ultra-vysokohodnotny-beton-uhpc

[3] METODIKA 1. *Metodika pro návrh UHPC a materiálové zkoušky*. Kloknerův ústav v Praze, Praha, 2015

[4] FEHLING, E., SCHMIDT, M., WALRAVEN, J., LEUTBECHER,. T., FROHLICH, S. *Ultra-high performance concrete UHPC: Fundamentals – design – examples.* Berlin, 2014. ISBN 978-3-433-03087-5

[5] GRAYBEAL, B.A., HARTMANN, J.L. *Ultra-high performance concrete material properties*. Transportation Research Board, Washington, D.C., 2003. [ONLINE]. www.researchgate.net

[6] http://www.ebeton.cz/pojmy/latentne-hydraulicke-primesi

[7] HELA, R., *Příměsi do betonu.* Beton TKS, Praha: Beton TKS, s.r.o.. 2015. roč. 15,.č. 2, str. 4-11. [ONLINE]. www.betontks.cz, s

[8] HABER, Z.B., GRAYBEAL, B.A. *Field Testing of an Ultra-High Performance Concrete Overlay.* Federal Highway Administration. Washington, D.C., 2003. [ONLINE]. www.fhwa.dot.gov

[9] GUINGOT, L., DEKHIL, D., SOULIER, P. *Strengthening of hydraulic structures with UHPC.* RILEM-fib-AFGC Int. Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete UHPFRC. Marseille, France, 2013. [ONLINE].www.researchgate.net

[10] BRÜHWILLER, E., BASTIEN-MASSE. M., MÜHLBERG. H., HOURIET, B., FLEURY, B., CUENNET, S., SCHÄR, P., BOUNDRY, F., MAURER, M. *Strengthening the Chillon viaducts deck slabs with reinforced UHPFRC.* IABSE Conference – Structural Engineering: Providing Solutions to Global Challenges. Geneva, Switzerland, 2015. [ONLINE]. www.infoscience.epfl.ch

[11] BRÜHWILLER, E.,XIUJIANG, S. *Strenghtening of existing structures using R-UHPFRC: Principles and conceptual desing.* The 2nd ACF Symposium. Lausanne, Switzerland, 2017. [ONLINE]. www.infoscience.epfl.ch

[12] WIBOWO, H., SRITHARAN, S. *Use of Ultra-High Performance Concrete for Bridge Deck Overlays.*Iowa State University. Iowa, USA, 2018. [ONLINE].www.researchgate.net

[13] KOO, I., HONG., S. *Strengthening RC Columns with Ultra-High-Performance Concrete*. The 2016 Structures Congress. Jeju Island, Korea, 2016. [ONLINE]. http://www.i-asem.org

[14] BRÜHWILLER, E. *Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete for andvanced rehabilitation of Bridges*. École Polytechnique Fédérale de Lausanne. Lausanne, Switzerland, 2005. [ONLINE].www.researchgate.net

[15] GRAYBEAL, B.A, HABER, Z.B. *Ultra-High Performance Concrete for Bridge Deck Overlays*. Federal Highway Administration. Washington, D.C., 2018. [ONLINE]. www.fhwa.dot.gov

[16] GRAYBEAL, B.A. *Bond of field-Cast Grouts to Precast Concrete Elements.* Federal Highway Administration. Washington, D.C., 2017. [ONLINE]. www.fhwa.dot.gov

[17] BRÜHWILLER, E. *Rehabilitation and Strengthening of Concrete Structures Using Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete.*Structural Engineering International. 2013. DOI: 10.2749/101686613X13627347100437. [ONLINE].www.researchgate.net

[18] BUITELAAR, P. *35 Years of HPC and UHPC toppings for industrial floors*. Concrete – The magazine of the concrete society. 2018. roč. 52, č.7. str. 25-31. [ONLINE].www.researchgate.net

[19] ČSN EN 12504-1. *Zkoušení betonu v konstrukcích - Část 1: Vývrty - Odběr, vyšetření a zkoušení v tlaku*. Český normalizační institut, Praha, 2009

[20] ČSN EN 13791. *Posuzování pevnosti betonu v tlaku v konstrukcích a v prefabrikovaných betonových dílcích.* Český normalizační institut, Praha, 2007

[21] ČSN 73 1373. *Nedestruktivní zkoušení betonu - Tvrdoměrné metody zkoušení betonu.* Český normalizační institut, Praha, 2011

[22] ČSN EN 12504-2. *Zkoušení betonu v konstrukcích - Část 2: Nedestruktivní zkoušení - Stanovení tvrdosti odrazovým tvrdoměrem*. Český normalizační institut, Praha, 2013

[23] ČSN 73 0038. *Navrhování a posuzování stavebních konstrukcí při přestavbách.* Úřad pro normalizaci a měření, Praha, 1987

9 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Srovnání typických složení pro běžný beton, SCC a UHPC 13
Obr. 2 Rovinná analýza průřezu - ohybová únosnost zesíleného průřezu v tažené oblasti) 17
Obr. 3 Základní typy průřezů zesílených vrstvou UHPC 17
Obr. 4 Charakteristické tahové chování UHPC 18
Obr. 5 Charakteristické tahové chování vyztuženého UHPC 18
Obr. 6 Příklady zesílených průřezů na tlakové namáhání 18
Obr. 7 Graf závislosti zatížení-deformace pro příklady z obr. 6 19
Obr. 8 Mechanismus smykového porušení prvku 19
Obr. 9 Příklady povrchových úprav - zleva: nízkotlaký vodní paprsek, tryskání pískem, vysokotlaký vodní paprsek 22
Obr. 10 Příčný řez konstrukce viaduktu Chillon s navrženým zesílením 23
Obr. 11 Probíhající betonáž zesilující vrstvy 23
Obr. 12 Příčný řez zesilovaným kanálovým mostem 24
Obr. 13 Příčný řez viaduktem s vyznačenými navrženými úpravami 25
Obr. 14 Probíhající betonáž vrstvy UHPC na průmyslovou podlahu 25
Obr. 15 Zjištěné vyztužení panelu REF-3 27
Obr. 16 Příčný řez panelem REF-3 s vyznačeným zjištěným vyztužením 28
Obr. 17 Provedená sonda k betonářské výztuži 28
Obr. 18 Pohled na provedenou sondu k betonářské výztuži v příčném směru 28
Obr. 19 Jádrové vývrty pro materiálové zkoušky 29
Obr. 20 Zkušební panely po provedení povrchové úpravy vodním paprskem 32
Obr. 21 Detailní pohled na povrch upravený vodním paprskem (průměrný materiálový úbytek 3,2mm) 33
Obr. 22 Betonáž zesilující vrstvy UHPC na zkušební vzorky 33
Obr. 23 Typický příčný řez referenčních panelů 34
Obr. 24 Typický příčný řez zesílených panelů - 30 mm UHPC 34
Obr. 25 Typický příčný řez zesílených panelů - 50 mm UHPC 34
Obr. 26 Schéma uspořádání čtyřbodové ohybové zkoušky 35
Obr. 27 Schéma zkoušky ve čtyřbodovém ohybu včetně umístění snímačů 39
Obr. 28 Pohled na zkušební zařízení s připraveným prvkem ke zkoušce 40
Obr. 29 Průběh závislosti zatížení na průhybu uprostřed rozpětí - REF 44
Obr. 30 Graf závislosti zatížení na průhybu uprostřed rozpětí - 30 mm UHPC 44

Obr. 31 Graf závislosti zatížení na průhybu uprostřed rozpětí - 50 mm UHPC 45
Obr. 32 Srovnání typických průběhů grafů závislosti zatížení na průhybu uprostřed rozpětí.....45
Obr. 33 Detail porušení prvku při ohybové zkoušce - REF-1.....46
Obr. 34 Detail porušení prvku při ohybové zkoušce - REF-2.....46
Obr. 35 Detail porušení prvku při ohybové zkoušce – REF -3.....46
Obr. 36 Detail porušení prvku při ohybové zkoušce – 30-1 47
Obr. 37 Detail porušení prvku při ohybové zkoušce – 30-2 47
Obr. 38 Detail porušení prvku při ohybové zkoušce - 30-3.....47
Obr. 39 Detail porušení prvku při ohybové zkoušce - 50-1.....48
Obr. 40 Detail porušení prvku při ohybové zkoušce - 50-2.....48
Obr. 41 Detail porušení prvku při ohybové zkoušce - 50-3.....48
Obr. 42 Monitoring vzniku trhlin během ohybové zkoušky (50 mm UHPC).....49
Obr. 43 Rozvoj trhlin během ohybové zkoušky (30 mm UHPC) 49
Obr. 44 Zatěžování panelu při ohybové zkoušce (30 mm UHPC).....50
Obr. 45 Ukázka duktilního chování zesílených prvků (30 mm UHPC).....50
Obr. 46 Schéma rozmístění a označení jednotlivých ploch panelů pro odtrhové zkoušky na upravených površích (viz 6.4.2).....52
Obr. 47 Detail kontaktu vrstev – úprava HA Obr. 48 Detail kontaktu vrstev – úprava HMA 53
Obr. 49 Detail kontaktu vrstev – úprava HB Obr. 50 Detail kontaktu vrstev – úprava HMB 53
Obr. 51 Detail kontaktu vrstev - úprava HC Obr. 52 Detail kontaktu vrstev - úprava HMC 53
Obr. 53 Detail kontaktu vrstev - úprava HD Obr. 54 Detail kontaktu vrstev - úprava HMD 53
Obr. 55 Detail kontaktu vrstev - úprava BD Obr. 56 Detail kontaktu vrstev - úprava BMD 54
Obr. 57 Pohled na panel s dílčími plochami po úpravách.....54
Obr. 58 Detail povrchu - nahoře vodní paprsek strojní, dole pískování (hrubá strana panelu).....56
Obr. 59 Detail povrchu - nahoře vodní paprsek sruční, dole bez úpravy (hladký strana panelu) 56

Obr. 60 Detail povrchu - nahoře pískování, dole vodní paprsek strojní (hladká strana panelu) ... 56
Obr. 61 Detail povrchu - nahoře vodní paprsek ruční, dole bez úpravy (hrubá strana panelu) ... 57
Obr. 62 Schéma rozmístění a označení jednotlivých ploch panelů pro zkoušky soudržnosti vrstev ... 58
Obr. 63 Otvory po odebrání jádrových vývrtů na tahové zkoušky ... 59
Obr. 64 Provádění odtrhových zkoušek ... 59
Obr. 65 Schéma rozmístění odtrhových zkoušek ... 60
Obr. 66 Schéma rozmístění odběru jádrových vývrtů ... 60
Obr. 67 Odtrh z oblasti HA (porušení v betonu) ... 62
Obr. 68 Odtrh z oblasti HMA (porušení v adhezním můstku) ... 62
Obr. 69 Odtrh z oblasti HB (porušení v betonu) ... 63
Obr. 70 Odtrh z oblasti HMB (porušení v adhezním můstku) ... 63
Obr. 71 Odtrh z oblasti HD (porušení v betonu) ... 63
Obr. 72 Odtrh z oblasti HMD (porušení v adhezním můstku) ... 63
Obr. 73 Odtrh z oblasti BC (porušení v betonu) ... 64
Obr. 74 Odtrh z oblasti BMC (porušení v adhezním můstku) ... 64
Obr. 75 Odtrh z oblasti BD (porušení v betonu) ... 64
Obr. 76 Odtrh z oblasti BMD (porušení v adhezním můstku) ... 64
Obr. 77 Jádrové vývrty připravené na nalepení tahových terčů ... 65
Obr. 78 Sada jádrových vývrtů připravených na nalepení tahových terčů ... 65
Obr. 79 Jádrový vývrt HA-1 po tahové zkoušce (porušení v betonu) ... 67
Obr. 80 Jádrový vývrt HMA-2 po tahové zkoušce (porušení v adhezním můstku) ... 68
Obr. 81 Jádrový vývrt HB-1 po tahové zkoušce (porušení v betonu) ... 68
Obr. 82 Jádrový vývrt HMB-3 po tahové zkoušce (porušení v adhezním můstku) ... 69
Obr. 83 Jádrový vývrt HC-2 po tahové zkoušce (porušení v betonu) ... 69
Obr. 84 Jádrový vývrt HMC-2 po tahové zkoušce (porušení v adhezním můstku) ... 70
Obr. 85 Jádrový vývrt HD-3 po tahové zkoušce (porušení v betonu) ... 70
Obr. 86 Jádrový vývrt HMD-3 po tahové zkoušce (porušení v adhezním můstku) ... 71
Obr. 87 Jádrový vývrt BMA-1 po tahové zkoušce (porušení v adhezním můstku) ... 71
Obr. 88 Jádrový vývrt BD-3 po tahové zkoušce (porušení v betonu) ... 72
Obr. 89 Jádrový vývrt BMD-2 po tahové zkoušce (porušení v adhezním můstku) ... 72
Obr. 90 Schéma zkušebního zařízení s rozmístěním snímačů ... 76

Obr. 91 Schéma referenčního prvku s vyztužením 77
Obr. 92 Výpočetní model 80
Obr. 93 Průběh návrhového momentu ve směru X u horního povrchu 80
Obr. 94 Průběh návrhového momentů u spodního povrchu ve směru X 80

10 SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Výsledky abrazivních zkoušek vybraných materiálů a UHPC 20
Tab. 2 Vyhodnocení pevnosti v tlaku na jádrových vývrtech 30
Tab. 3 Vyhodnocení tvrdoměrných zkoušek 31
Tab. 4 Hodnoty průhybu při cyklickém zatěžování na stanovené hodnoty zatížení ... 41
Tab. 5 Maximální hodnoty zatížení dosažené při ohybových zkouškách 42
Tab. 6 Vypočtené stupně zesílení 43
Tab. 7 Výsledky odtrhových zkoušek na upravených površích 55
Tab. 8 Výsledky odtrhových zkoušek 61
Tab. 9 Výsledky tahových zkoušek provedených na jádrových vývrtech 66
Tab. 10 Shrnutí výsledků z tahových zkoušek 73

11 POUŽITÝ SOFTWARE

-	Microsoft:	MS Office 2016 – Word
		MS Office 2016 – Excel
-	AutoDesk	AutoCAD 2018
-	Nemetschek	SCIA Engineer