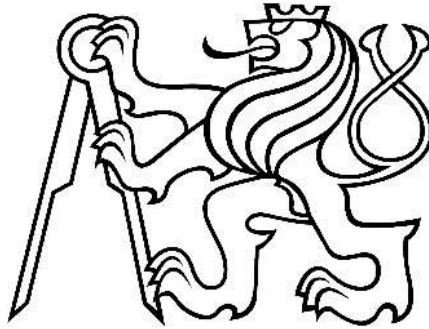


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE



Kloknerův ústav

Oddělení experimentálních a měřicích metod

EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZA SOUDRŽNOSTI UHPC A VÝZTUŽE

EXPERIMENTAL ANALYSIS BETWEEN UHPC AND REINFORCEMENT

DISERTAČNÍ PRÁCE

Ing. David Čítek

Doktorský studijní program: P 3607 Stavební inženýrství

Studijní obor: Nauka o nekovových materiálech a stavebních hmotách

Školitel: doc. Ing. Jiří Kolísko, Ph.D.

Praha, prosinec 2020

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou disertační práci vypracoval samostatně a obsah práce nebyl předložen k jiným akademickým nebo profesním řízením. Potvrzuji, že tato disertační práce byla vytvořena v souladu se všemi závaznými pravidly a že jsem řádně uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací. Prohlašuji, že práce vznikla jako součást doktorského studia, do kterého jsem řádně zapsán.

V Praze, prosinec 2020

Ing. David Čítek

Poděkování

Rád bych tímto v první řadě poděkoval svému školiteli doc. Ing. Jiřímu Kolískovi, Ph.D. za podporu, cenné rady poskytnuté v průběhu celého studia a při vypracování této disertační práce a také za poskytnutí příležitosti řešení zajímavých grantových a pracovních projektů v rámci Kloknerova ústavu. Dále bych rád poděkoval prof. Ing. Janu L. Vítkovi, CSc. za množství cenných konzultací, rad, profesního vedení a nasměrování společně s možností podílet se na zajímavých experimentálních výzkumech. Svým kolegům z Kloknerova ústavu, kteří se v menší či větší míře podíleli na dílčích experimentech, bych rád poděkoval za vstřícnost a pomoc nejen při zpracování této práce. V neposlední řadě bych rád poděkoval také své rodině za celoživotní podporu a poskytnuté studijní a životní možnosti. Řada popsanych experimentů vznikla za přispění grantových projektů TAČR, GAČR, MPO, CESTI a SGS odkazovaných přímo v práci. Velmi si cením spolupráce a děkuji dalším kolegům z firem KŠ PREFA a.s, Metrostav a.s, Novák a Partner s.r.o., TBG Metrostav s.r.o., Betotech s.r.o. a dalších za příjemnou spolupráci při realizaci a řešení dílčích experimentů a problematik popsanych v této práci.

Anotace

Materiál UHPC (Ultra - High Performance Concrete) se v aktuální době stává stále více využívaným moderním materiálem. Tento jemnozrnný cementový kompozit vyznačující se vynikající trvanlivostí a významně lepšími materiálovými charakteristikami oproti běžnému betonu umožňuje nejen inovaci z hlediska jeho využití pro konstrukce náročných architektonických tvarů, tenkostěnných konstrukcí či například subtilních předpjatých mostních nosníků, ale s jeho využitím je možné významně optimalizovat namáhané konstrukční detaily. Jedním z takto exponovaných konstrukčních detailů vyžadujících trvanlivost a vysoké pevnosti jsou spoje prefabrikovaných částí konstrukcí a spřažení. Aby bylo možné spolehlivě navrhovat a využívat takto náročné detaily je nutné popsat chování materiálu z hlediska veškerých materiálových parametrů a zejména soudržnosti matrice UHPC s výztuží a zhodnotit vliv zvýšeného smykového napětí ve vztahu k možné rozměrové optimalizaci spoje.

Aktuální práce popisuje komplexní výzkum materiálových vlastností UHPC se zaměřením na jeho soudržnost s betonářskou a předpínací výztuží. V práci jsou zahrnuty dílčí experimenty týkající se popsání různých vlivů na soudržnost jako je protikorozní ochrana výztuže, extrémní teplotní namáhání nebo optimalizovaná kotevní délka výztuže. Dílčí experimenty jsou podkladem pro vyhodnocení komplexních zkoušek prefabrikovaných dílců s UHPC spojem a spřažených ocelobetonových nosníků s UHPC spojem reprezentujících mostovku ocelobetonového mostu. Práce má za úkol doplnit povědomí o možnosti využití vynikajících vlastností UHPC v těchto exponovaných detailech a poskytnout podklad pro jeho další využití jak v reálné praxi, tak pro výpočetní modely. Práce shrnuje dosavadní publikační činnost autora k danému tématu uvedenou v závěru práce.

Klíčová slova

UHPC, soudržnost, smykové napětí, předpínací výztuž, betonářská výztuž, spoj, spřažení

Abstract

UHPC (Ultra High Performance Concrete) material is currently becoming an increasingly used modern material. This fine-grained cement composite is characterized by excellent durability and significantly better strength characteristics compared to common concrete. Not only it provides innovation in using it for demanding architectural shapes structures, thin-walled structures or prestressed bridge girders, but its use can significantly optimize stressed structural details. One of these exposed structural details requiring durability and high strength are the joints of prefabricated parts of structures and couplings. In order to reliably design and use such demanding details, it is necessary to describe the behavior of the material in terms of its bond with reinforcement and evaluate the effect of the increased shear stress in relation to the optimization of the joint.

The current work describes a comprehensive research of the UHPC material properties with a focus on its bond with concrete and prestressing reinforcement. The work includes partial experiments related to the description of various factors influencing the bond such as corrosion protection of reinforcement, extreme thermal stress or optimized anchorage length of reinforcement. The individual experiments constitute a background for evaluation of complex tests of prefabricated components with UHPC connection and composite steel-concrete beams with UHPC connection representing the bridge deck of the steel-concrete bridge. The aim of this thesis is to supplement the awareness of the possibility of using the excellent properties of UHPC in these exposed details and to provide a basis for its further use. The thesis summarizes author's previous publications, that are listed at it's end.

Keywords:

UHPC, bond, shear stress, prestressing reinforcement, concrete reinforcement, joint, connection

Obsah:

1	ÚVOD.....	8
2	CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	9
3	REŠERŠNÍ ČÁST– SOUDRŽNOST VÝZTUŽE S UHPC A JEJÍ PRAKTICKÉ VYUŽITÍ	10
3.1	ULTRA – HIGH PERFORMANCE CONCRETE – VYBRANÉ VLASTNOSTI	10
3.1.1	Obecná charakterizace UHPC.....	11
3.1.2	Typické složení směsi UHPC	12
3.1.3	Mechanické parametry UHPC.....	13
3.1.4	Objemové změny	17
3.1.5	Ošetřování a teploty během hydratace	18
3.1.6	Konzistence a zpracovatelnost.....	21
3.1.7	Odolnost a trvanlivost	23
3.1.8	Shrnutí vlastností	24
3.2	SOUDRŽNOST BETONÁŘSKÉ A PŘEDPÍNACÍ VÝZTUŽE S UHPC.....	25
3.2.1	Smykové napětí v soudržnosti	25
3.2.2	Metody stanovení soudržnosti.....	34
3.2.3	Vliv teploty na smyková napětí v soudržnosti.....	46
3.2.4	Problematika koroze výztuže a povlaků.....	48
3.3	SPOJE A SPŘAŽENÍ PREFABRIKOVANÝCH KONSTRUKCÍ POMOCÍ UHPC	52
4	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST - SOUDRŽNOST A SPŘAŽENÍ UHPC S OCELÍ	63
4.1	ANALÝZA SOUDRŽNOSTI BETONÁŘSKÉ VÝZTUŽE A UHPC	64
4.1.1	Stanovení soudržnosti UHPC a betonářské výztuže různých průměrů	64
4.1.2	Optimalizace kotevní délky betonářské výztuže a UHPC.....	66
4.1.3	Soudržnost výztuže a UHPC s různou krycí vrstvou betonu.....	69
4.1.4	Soudržnost různého typu betonářské výztuže s UHPC	73
4.2	ANALÝZA SOUDRŽNOSTI PŘEDPÍNACÍ VÝZTUŽE A UHPC	77
4.2.1	Vliv stáří na soudržnost předpínací výztuže	77
4.2.2	Vliv extrémních podmínek na soudržnost předpínací výztuže	79
4.2.3	Vliv zvýšené teploty na smyková napětí v soudržnosti	83
4.2.4	Soudržnost předpínací výztuže na koncích předepjatých vazníků z UHPC	93
4.3	KOROZNÍ VLIVY NA SOUDRŽNOST VÝZTUŽE A UHPC.....	97
4.3.1	Korozní vlivy žárově povlakované výztuže mosazí na soudržnost s betonem a UHPC	97
4.3.2	Korozní vlivy žárově povlakované výztuže zinkem na soudržnost s betonem a UHPC	102
4.3.3	Vliv protikorozi ochrany na soudržnost předpínací výztuže	104

4.4	ANALÝZA FUNKCE PŘÍČNÉHO UHPC SPOJE	112
4.4.1	UHPC spoj prefabrikovaných desek	113
4.4.2	Krátkodobé zkoušky optimalizovaných spojů prefabrikovaných desek.....	115
4.4.3	Dlouhodobé zkoušky optimalizovaných spojů prefabrikovaných desek	122
4.5	ZKOUŠKY SPŘAŽENÍ OCELOVÉHO NOSNÍKU A UHPC POMOCÍ LIŠTY	126
4.5.1	Krátkodobé zkoušky spřahovací lišty	128
4.5.2	Únavové zkoušky spřahovací lišty	131
4.6	ANALÝZA SPŘAŽENÝCH OCELOBETONOVÝCH NOSNÍKŮ S UHPC SPOJEM.....	132
4.6.1	Výroba spřažených nosníků	136
4.6.2	Zkoušky spřažených nosníků	137
4.6.3	Výsledky experimentů.....	140
4.6.4	Numerická analýza	142
5	SHRnutí VÝSLEDKŮ DISERTAČNÍ PRÁCE.....	146
6	ZÁVĚR A CELKOVÉ ZHODNOCENÍ.....	150
7	REFERENCE.....	153
8	SEZNAM DOSAVADNÍCH PUBLIKACÍ DOKTORANDA	161

1 ÚVOD

Vynikající vlastnosti UHPC (Ultra-High Performance Concrete) jsou v aktuální době již obecně známy. Materiál je celosvětově stále více používán na nejrůznější aplikace. Výzkum tohoto cementokompozitního materiálu započal v ČR cca před 15 lety. Také v České republice lze UHPC nalézt jako konstrukční materiál v prvních aplikacích jak v pozemním, tak v dopravním stavitelství. Jako velmi efektivní konstrukce v mostním stavitelství se ukazují spřažené ocelobetonové mosty. Efektivita a účinnost těchto konstrukcí je zajištěna zrychlením výstavby využitím prefabrikace (deska mostovky) a moderního materiálu (spoje). Spřažení systému prefabrikátů a také spojení mezi jednotlivými deskami a nosníky se při běžném řešení mohou stát díky zatížení a povětrnostním vlivům, slabými místy konstrukce. Zkušenosti z již realizovaných konstrukcí poukazují na možnost efektivního řešení těchto spojů pomocí UHPC. Spoje UHPC představují alternativu, která může uspokojit požadavky na fyzikálně-mechanické vlastnosti, trvanlivost, rychlost výstavby a hospodárnost. Pro lepší pochopení vhodnosti materiálu je třeba kvantifikovat některé dílčí parametry, jako je spřažení a soudržnost výztuže a UHPC.

Rozsáhlý výzkum, který je předmětem této práce je zaměřen na stanovení smykového napětí mezi různými typy výztuže (předpínací, betonářská výztuž), různé směsi UHPC, různé povrchy použité výztuže (galvanizace, mosaz) a různé okrajové podmínky ve kterých se výztuž nachází či je daná zkouška prováděna. Hlavním cílem výzkumu je ukázat a kvantifikovat výrazné zvýšení smykového napětí v kontaktu ocel/ UHPC ve srovnání s běžným betonem a poukázat na environmentální výhody využití moderního materiálu.

Úvodní výsledky soudržnosti UHPC a výztuže ukazují, že použití UHPC by mělo být vynikajícím a velmi účinným řešením ve složitých detailech, jako je právě spojení prefabrikátů. Vynikající vlastnosti materiálu dovolují návrh velmi složitých konstrukcí a jejich detailů. Úvodní výsledky experimentu spoje UHPC prvků prefabrikované mostovky vedou k návrhu inovativního experimentálního modelu spojení UHPC mezi ocelovým nosníkem a prefabrikovanou betonovou deskou.

Práce je ve své rešeršní části nazvané „Soudržnost výztuže s UHPC a její praktické využití“ rozdělena do tří hlavních kapitol popisujících myšlenkovou posloupnost využití moderního materiálu pro důležité konstrukční detaily. Detailně jsou pospány tyto kapitoly:

- Ultra – high Performance Concrete – vybrané vlastnosti
- Soudržnost betonářské a předpínací výztuže s UHPC
- Spoje a spřažení prefabrikovaných konstrukcí pomocí UHPC

2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Cílem práce je komplexně popsat soudržnost oceli a UHPC, která je jedním z nejdůležitějších parametrů při návrhu konstrukčních detailů, jako jsou spoje prefabrikovaných konstrukcí či spřažení. Využití vynikajících vlastností UHPC v konstrukci vede k významné optimalizaci konstrukčních detailů, zrychlení výstavby a zvýšení trvanlivosti a životnosti celé konstrukce. Výsledky a zkušenosti dosažené během výzkumu jsou důležité pro rozšíření znalostní základny materiálu UHPC a jsou podkladem pro tvorbu doporučení, směrnic a celkového vývoje využití UHPC nejen v mostním stavitelství zejména v ČR ale i ve světě. Hlavní cíle disertační práce jsou:

- Popsání materiálu UHPC a jeho vybraných vlastností s ohledem na konkrétní aplikace zejména v mostním stavitelství. Zhodnocení dosavadních výzkumů dílčích parametrů ve spojení s referenčními stavbami na území ČR.
- Popsání hlavních mechanismů soudržnosti různých typů betonářské a předpínací výztuže s UHPC a srovnání těchto hodnot s běžným betonem. Analýza vlivu protikorozních úprav a povlaků betonářské a předpínací výztuže na soudržnost.
- Analýza vlivu extrémního namáhání (teplota, odolnost) na materiálové vlastnosti a soudržnost UHPC s předpínací výztuží. Vyhodnocení rychlosti vývoje smykového napětí v soudržnosti UHPC s předpínací výztuží v krátkých časech. Vyhodnocení zkoušek soudržnosti na přepjatých vaznicích a porovnání s normovými zkouškami.
- Analýza vlivu zvýšeného napětí v soudržnosti mezi UHPC a betonářskou výztuží a jeho využití ve spojích prefabrikovaných konstrukcí. Příprava, zkoušky a vyhodnocení 3 – bodového a 4- bodového ohybu prefabrikovaných desek s UHPC spojem s různou kotevní délkou a rozměrem spoje. Porovnání s referenčními vzorky a zhodnocení dlouhodobého ohybového zatížení na UHPC spoje prefabrikátů.
- Příprava a vyhodnocení komplexních zkoušek spřažených nosníků s monolitickou a prefabrikovanou deskou s UHPC spojem využívající optimalizovanou kotevní délku betonářské výztuže a spřažení pomocí perforované lišty. Dílčí zkoušky spřahovací perforované lišty. Porovnání jednotlivých variant s numerickou analýza MKP daných zkušebních prvků spřažených nosníků.

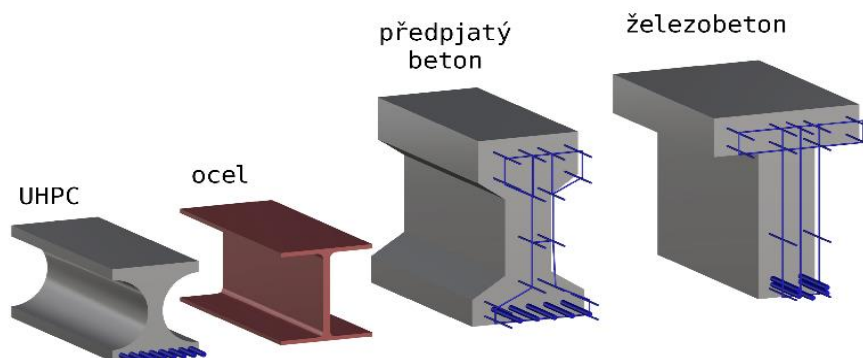
3 REŠERŠNÍ ČÁST– SOUDRŽNOST VÝZTUŽE S UHPC A JEJÍ PRAKTICKÉ VYUŽITÍ

Úvodní rešeršní část práce se věnuje základnímu popisu problematiky vybraných vlastností UHPC s praktickým přesahem do reálných aplikací, obecnému popisu soudržnosti výztuže a praktickému vlivu využití vynikajících vlastností UHPC na optimalizaci důležitých konstrukčních detailů s využitím extrémně malých kotevních délek výztuže.

3.1 ULTRA – HIGH PERFORMANCE CONCRETE – VYBRANÉ VLASTNOSTI

Ultra-vysokopevnostní beton UHPC (Ultra High Performance Concrete) či někdy také označovaný jako UHPFRC (Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete) je relativně nový perspektivní vysokohodnotný cementový kompozitní materiál. Materiál UHPC je aktuálně využíván pro široké spektrum aplikací [1,2]. Hlavní výhody materiálu jsou vysoká pevnost, rychlý náběh pevností a vynikající trvanlivost [3].

Přestože se jedná o cementový kompozit, jeho mechanické vlastnosti (pevnost v tlaku 120-180 MPa, tahu za ohybu cca 20-40 MPa), vysoká duktilita a zpracovatelnost umožňují navrhovat nově konstrukce specifických parametrů a tvarů. Některé výzkumy ukazují UHPC o pevnostech v tlaku vyšších i než 400 MPa [4]. Vzhledem k výjimečným mechanickým vlastnostem tohoto materiálu je možné navrhovat podstatně štíhlejší, a tedy ekonomičtější i ekologičtější konstrukce [5]. Menší průřezy jsou schopny díky zvýšeným mechanickým vlastnostem odolávat shodnému zatížení jako velké průřezy standardních betonových konstrukcí. Materiál UHPC tak stojí na pomezí mezi betonovými a ocelovými konstrukcemi. Oproti oceli však vykazuje výrazně vyšší odolnost vůči chloridům a jiným chemicky agresivním látkám. Na obrázku 1 je porovnání průřezů trámů navržených z různých materiálů, avšak pro stejnou únosnost. Je patrné, že profil z UHPC je velmi blízko profilu z oceli.

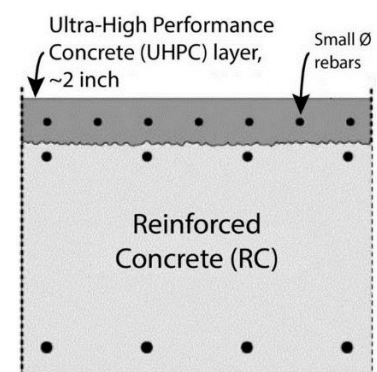


Obr. 1 Srovnání průřezů z různých materiálů se stejnou únosností [6]

3.1.1 Obecná charakterizace UHPC

Kromě unikátních mechanických vlastností je UHPC charakterizován i vysokou trvanlivostí a odolností vůči všem agresivním vlivům prostředí, která je příslibem budoucnosti bezúdržbových konstrukcí [7]. Materiál je schopný odolávat extrémním podmínkám po celou dobu návrhové životnosti konstrukce. U vybraných vlastností UHPC popisovaných v následujících odstavcích je vždy připojena reálná aplikace z České republiky, u které byly dílčí výsledky experimentálních ověření využity.

Počátky aplikací UHPC lze vysledovat v relativně nedávné minulosti, a to na přelomu milénia. Zejména jde o základní stavební prvky jako jsou trámy či desky. V posledních patnácti letech se však oblast používání tohoto materiálu rozšiřuje do všech odvětví stavebního průmyslu. Klesající cena a stoupající úroveň znalostí způsobují, že si stále více stavebních inženýrů uvědomuje jedinečné vlastnosti nabízené jedině materiálem UHPC. Od počátku nového milénia můžeme sledovat významný rozvoj uplatnění v odvětví fasádních panelů, střešních systémů a zejména mostního inženýrství. Do dnešního dne byla vybudovaná řada mostních konstrukcí s využitím unikátních vlastností materiálů UHPC. Z počátku se jednalo o výstavbu lávek kratších rozpětí (v ČR např. Čeperka, Vrapice) [8,9], nicméně dnes nejsou výjimkou stavby silničních a dálničních mostů využívající tento materiál pro delší rozpětí (Tábor, Příbor) [10,11] či další nosné konstrukční prvky. Výhody tohoto materiálu se projevily nejen v oblasti návrhů nových moderních mostních konstrukcí, ale stále častěji se ukazují i výhody UHPC v oblasti oprav, reprofilace a zesilování stávajících konstrukcí. Jednou z nejvýraznějších aplikací je oprava mostovky mostu Chillon ve Švýcarsku (Obr.2) [12].



Obr. 2 Ukázka technologie zesilování mostovky (Chillon), schéma konstrukce [12]

V České Republice se zesilování aktuálně věnuje výzkumný program TRIO MPO FV 20472 „Aplikace vysokohodnotných cementových kompozitů na rekonstrukce betonových

staveb“ v týmu společností Metrostav a.s., TBG Metrostav s.r.o, ČVUT v Praze a Kloknerova ústavu. Projekt je zaměřen na využití odolnostních parametrů UHPFRC a zkoumá možnosti využití v oblasti zesílení prvků v oblasti protlačení, ohybu a tlaku. Výsledky mohou naleznout uplatnění nejen v oblasti mostního inženýrství ale i z hlediska zesilování průmyslových a pozemních konstrukcí [13].

3.1.2 Typické složení směsi UHPC

Z hlediska složení patří UHPC do skupiny jemnozrnných kompozitních materiálů složených ze silikátového hydraulického pojiva (cementu), mikroplniva (například mletý křemen, vápenec), latentně hydraulických příměsí (mletá struska, popílek, křemičitý úlet), drobného kameniva (běžná velikost zrn do 2 mm, jsou známy receptury s max. zrnem do 8 mm), přísady (superplastifikátorů na bázi polykarboxylátů a polykarboxylát-éterů, zpomalovačů tuhnutí, retardérů, protismršťovací přísady) a vody [14]. Poměr jednotlivých pevných složek (kamenivo, cement, mikrosilika, struska, popílek) je volen tak, aby bylo dosaženo co největší hustoty v objemu a zároveň aby dosahoval optimálního granulometrického složení z hlediska zpracovatelnosti. Charakteristickým prvkem směsi je velký obsah cementu. Ten má z větší části funkci plniva a doplňuje přesnou křivku zrnitosti. Zvolením vhodného superplastifikátoru lze dosáhnout velmi nízkého vodního součinitele a tím i vysokých materiálových vlastností. Složením a návrhem optimalizované směsi UHPC se věnuje velké množství publikací. Velkým důrazem na rozšíření použití materiálu pro širší veřejnost je návrh složení z lokálních surovin a s ním spojená ekonomičnost použití [15]. Typické složení UHPC a UHPFRC pro v práci prováděných experimentů je uvedeno v následující tabulce:

Tabulka 1: Typické složení směsi UHPC, respektive UHPFRC

Složky \ Složení receptury	UHPC [%]	UHPFRC [%]
CEM II 42,5	100	100
Kamenivo I 0 – 2 mm	179	-
Kamenivo II 0 – 2 mm	-	184
Mikrosilika	14	14
Struska	12	12
Superplastifikátor	6	6
Voda	23	23
Ocelová vlákna (V_f)	0	1.5
Objemová hmotnost čerstvého betonu [kg/m^3]	2400	2335
Vodní součinitel w/b [-]	0.23	0.23

Složení směsi je zde v tabulce uvedeno poměrově k cementu, který představuje 100%. Obecně se UHPC vyznačuje vysokým objemem cementu dávkovaném v rozsahu 600-900 kg na m^3 .

3.1.3 Mechanické parametry UHPC

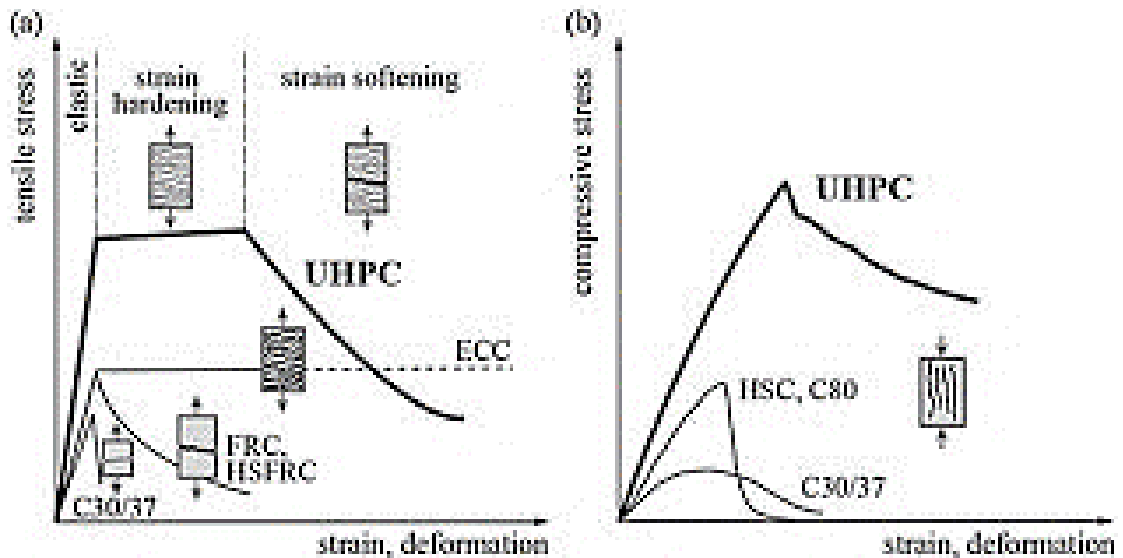
V současnosti neexistuje mezinárodně obecně uznávaná a univerzálně platná definice pojmů UHPC. Jednotlivé státy do svých normativních předpisů (NF P 18-710, 2016), (NF P 18-470, 2016) [16,17], (SIA 2052, 2016) [18] vkládají originální popis vlastností určující materiál UHPC. Tyto směrnice a doporučení mohou být pouze podkladem pro navrhované aplikace. Pro větší rozšíření možností navrhování a aplikací UHPC a UHPFRC v ČR byly dosud zpracovány pod vedením Kloknerova ústavu tři metodiky [19], [20], [21]. Aktuálně se mimo jiné Kloknerův ústav zabývá zpracováním nových metodik zahrnující zkušenosti a poznatky ze zahraničí, domácích výzkumů a realizací, aby bylo možné materiál co nejvíce přiblížit veřejnosti. U navrhovaných konstrukcí je v nynější době běžnou zvyklostí (nejen v ČR), že součástí realizace je doprovodný experimentální program obsahující zkoušky dílčích konstrukčních detailů či celé konstrukce tak aby byla ověřena funkčnost a spolehlivost konstrukce [22]. K rozšíření povědomí o využití UHPC jako vhodného konstrukčního materiálu pro běžné i speciální aplikace slouží i množství výzkumných programů jak primárních, tak aplikačních získaných mimo jiné Kloknerovým ústavem [22,23].

Obecně lze pro tento materiál vyjmenovat několik důležitých vlastností a odlišností od běžného betonu jako jsou např.:

- Vodní součinitel nižší než 0,25, typicky mezi 0,16 až 0,20;
- Jemnozrná struktura s pečlivě vybranou křivkou zrnitosti;
- Pevnost v tlaku násobně vyšší než u běžného betonu, často převyšuje 150 MPa;
- Pevnost v tahu vyšší než 7 MPa, v tahu za ohybu vyšší než 15 MPa;
- Systematické použití vláken (zejména ocelových) zajišťující duktilitu (tažnost) materiálu a pokud je to možné, vylučující použití standardní betonářské výztuže;
- Strain-hardening charakter, reziduální pevnost po vzniku trhliny
- Zvýšení obsahu pojiva vedoucí k absenci kapilární porosity a tedy extrémnímu zvýšení trvanlivosti UHPC.

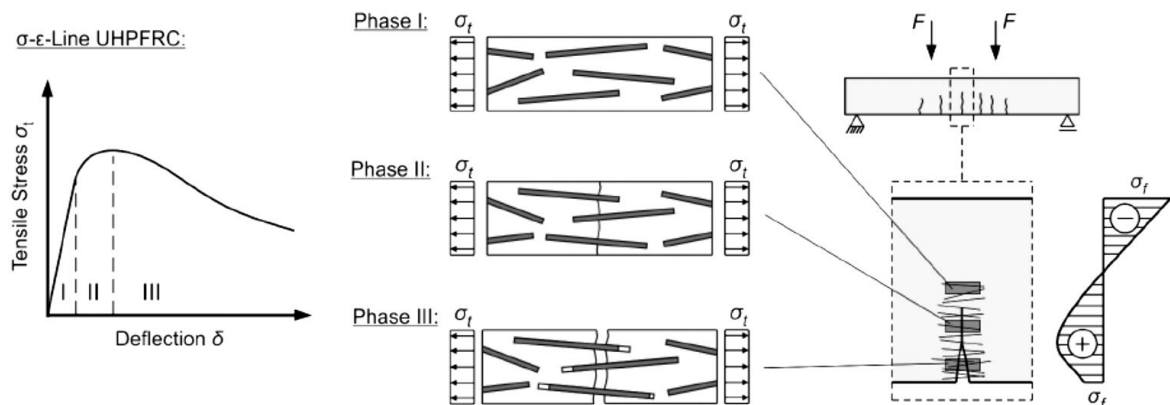
Rozdíl mezi konvenčním betonem a materiálem UHPC leží v množství cementového pojiva, velikosti kameniva a přítomnosti výztužných vláken. V porovnání se standardním betonem je matrice UHPC mnohem hutnější, čehož je dosaženo použitím přesné granulometrie pro dosažení maximální hustoty všech složek. Pro drastické snížení vodního součinitele při zachování zpracovatelnosti se používají moderní superplastifikátory na bázi polykarboxylátů. Doplněním matrice o nekonvenční rozptýlenou výztuž v jednotkách

objemových procent vzniká materiál UHPFRC, tedy vláknem vyztužený (fiber reinforced) UHPC. Tahové zpevnění po vzniků trhliny je zásadní charakteristikou materiálu UHPFRC, který lze v inženýrské praxi dobře využít eliminací běžné betonářské výztuže. Po vzniku první trhliny přebírá namáhání právě rozptýlená výztuž překlenující trhlinu [24]. Charakter chování materiálu v tlaku a tahu a jeho srovnání s běžným betonem je patrné z obr.3.



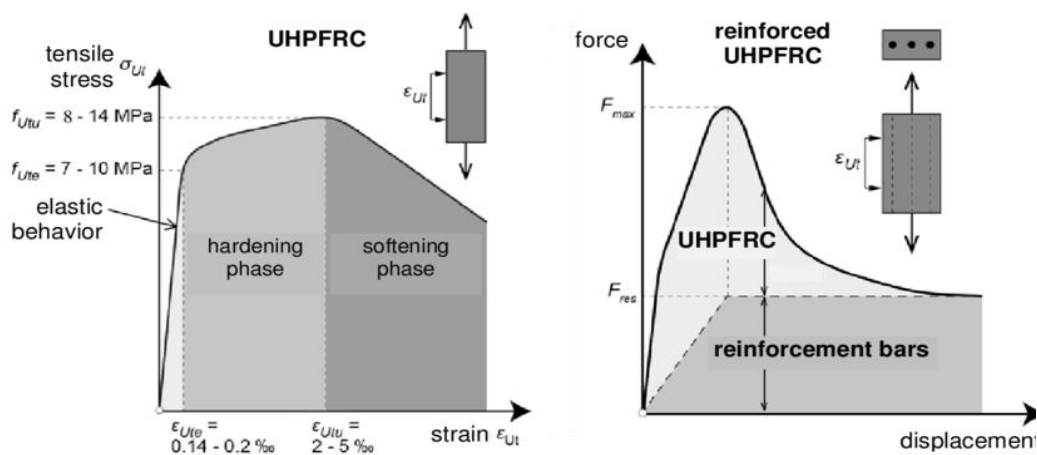
Obr. 3 Strain hardening charakter v tlaku a tahu UHPFRC versus běžný beton [25]

Obecně lze konstatovat výrazně vyšší hodnoty zejména tlakových pevností. Lepší tahové pevnosti a vlastnosti se úzce zaměřují na UHPC rozptýlenou výztuží. Ta, jak již bylo popsáno přebírá tahová napětí a zajišťuje duktilitu materiálu a reziduální pevnosti [27, 28]. Průběh tahových namáhání, respektive jeho závislost na přetvoření či průhybu jsou prezentovány na následujících obr. při zkoušce v tahu za ohybu. Vzorek z UHPFRC zatížený na ohyb prezentovaný na obr. 4 opisuje schematicky chování a rozložení napětí na prvku zkoušeného v tříbodovém ohybu [71].



Obr. 4 Aktivace rozptýlené výztuže v místě trhliny [71]

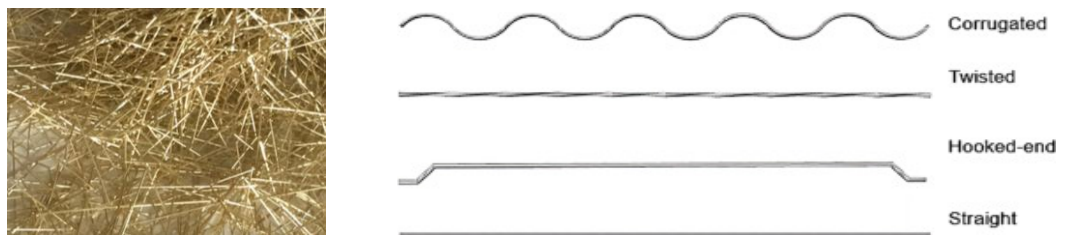
Stejně tak popisuje a velmi podobně rozděluje závislost napětí v tahu na přetvoření obr.5. V první části grafů a zatížení je vzorek do dosažení limitního napětí v tahu v elastické části. V druhé části dochází k aktivaci vláken v jemných mikrotrhlinách ve vzorku a tím i vzrůstem napětí až do překročení určitého přetvoření (zpravidla více než 0,2%). Třetí fáze je charakteristická snižování napětí (změkčováním) a začíná vytvořením diskrétní makrotrhliny při maximální únosnosti. Při rozevření trhlin nad určitou mez danou zejména rozměrem a objemem použitých vláken nedochází již k přenášení žádného tahového napětí. Pro názornost je na stejném obr. 5 vpravo uvedeno charakteristické chování UHPFRC navíc vyztuženého běžnou výztuží [28]. Lze v tomto případě hovořit o částečné superpozici průběhu napětí u železobetonu a UHPFRC použité zejména při zesilování konstrukcí [12].



Obr. 5 Strain hardening charakter v tahu UHPFRC vlevo, UHPFRC s výztuží vpravo [12]

Běžně se pro vyztužení matrice používají vlákna ocelová [29]. V určitých limitovaných případech s nižším namáháním lze využít i polymerní vlákna s odpovídající pevností v tahu a vyšším modulem pružnosti než matrice. Z běžně známých vláken tomuto odpovídají zejména vlákna PVA (polyvinylalkoholová), případně uhlíková, která se však vyznačují vysokou pořizovací cenou. Vhodnost použití jednotlivých typů vláken je závislá na tom, zda vlákna nahrazují běžnou betonářskou výztuž (použití výhradně ocelových drátků v daném objemu), mají funkci eliminace křehkého charakteru matrice (PVA, karbonová vlákna) či zvyšují odolnost proti požáru, zvyšují tixotropii či eliminují smrštění (PP vlákna) [30]. Ocelová vlákna se vyrábějí v několika tvarových provedeních, různých průměrech a délkách (Obr.6). Nejčastěji jsou používány drátky délky 6-12 mm a průměru 0,15 – 0,3. Výsledné vlastnosti UHPFRC jsou ovlivněny nejen objemem použitých vláken ale také jejich štíhlostním poměrem. Tato rozptýlená výztuž má za úkol přenesení napětí od smršťování materiálu, které je velmi významnou složkou objemových změn, ale také i tahové zpevnění

po vzniku trhliny v materiálu, jak již bylo zmíněno. Toto namáhání běžně přenáší konvenční výztuž, jejíž pozice musí být přesně navržena. V tomto případě uvažování vhodně navržené směsi dochází k rozptýlení vláken tak, že je v ideálním případě vyztužen celý průřez a celý průřez je schopen přenášet daná napětí. Rozměr vláken je tak volen s ohledem na velikost použitého kameniva či písku. Vlákno by mělo zajistit překlenutí trhliny a dostatečné zakotvení vlákna v matrici. Výhodou návrhu směsi s rozptýlenou výztuží je odolnost konstrukčního prvku vůči lokálním zatížením či zatížením s předem nejasným působišťem (například odolnost proti projektilu, nárazu vozidla či dalším).

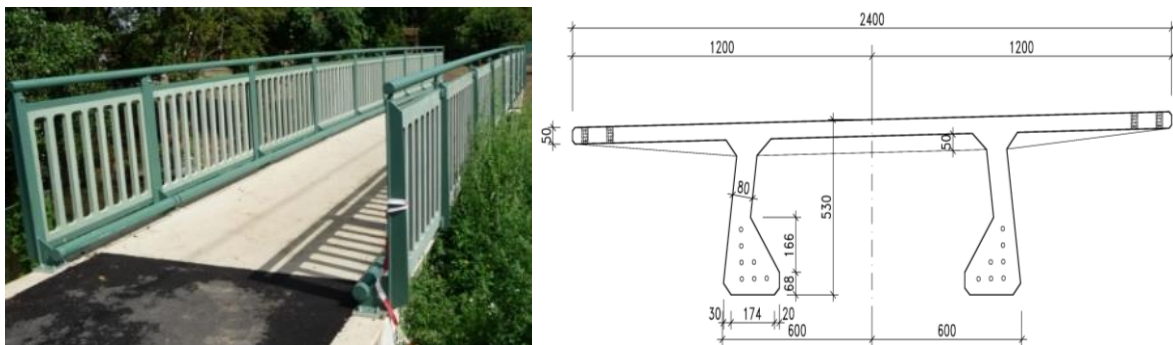


Obr. 6 Rozptýlená výztuž ve formě ocelových drátků a různé typy jejich tvarů [31]

Výsledný vzhled konstrukcí s rozptýlenou ocelovou výztuží může být (např. v případě designových prvků v některých případech vlivem patiny dané nakorodováním konců drátků vystupujících z matrice) negativní [30]. V těchto případech je přistoupeno k použití nekovových vláken jako PVA nebo kompozitních. Tyto vlákna nejsou významné z hlediska celkové únosnosti konstrukčního prvku (není s nimi uvažováno k hlediska tahového zpevnění), ale přispívají k eliminaci trhlin od smrštění a duktilitě materiálu (eliminují křehký charakter matrice). V současnosti se ukazuje jako možným kompromisem pro určitou míru tahového zpevnění, designového použití i z hlediska samotné technologie použití uhlíkových vláken. Ty se vyznačují vysokou pevností v tahu, nekorodují a vzhledem k jemnosti vláken dochází při vhodně navržené směsi k rovnoměrnému rozptýlení vláken v matrici [31]. Možnou nevýhodou použití uhlíkových vláken byla v minulosti jejich nedostupnost, respektive náročnost výroby. V současnosti jsou tyto vlákna různých délek vyráběna jako vedlejší produkt výroby prvků z kompozitů a vzhledem k narůstajícímu použití ve stavebnictví se stávají dostupnějšími. Jednou z dalších variant vyztužování tenkostěnných prvků z UHPC je použití 2d a 3d sítí textilních vláken. U těchto prvků je využito parametrů a kombinace přesné pozice uložení výztužných sítí a míry vyztužení matrice v celkovém objemu, které se svými parametry může blížit vyztužení rozptýlenou výztuží. Zároveň je nutné poznamenat, že prvky z UHPC, respektive UHPFRC, jsou navrhovány úsporně a optimalizovány do nejvyšších detailů, a tak i celkový objem jednotlivých komponentů klesá na minimum.

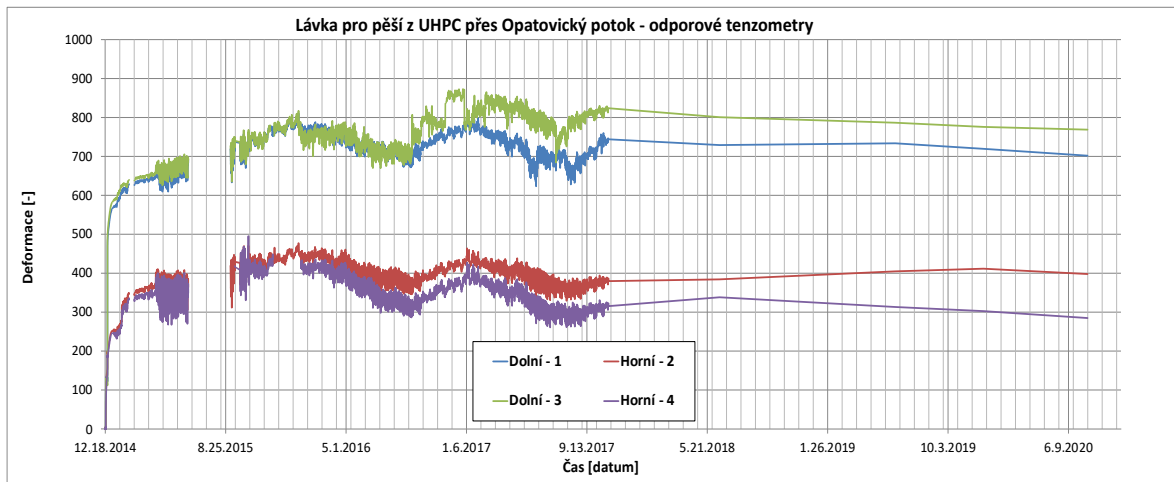
3.1.4 Objemové změny

Vzhledem k velkému množství pojivové složky je nutné uvažovat v případě návrhu s vyšším smrštěním než v případě běžných betonů. Dle provedených experimentů a francouzského předpisu AFGC [17, 18] se hodnoty celkového smrštění (autogenní+vysychání) pohybuje v rozsahu 700-1000 mikrostrain. U běžných betonů je možné dle EC2 [32] uvažovat s celkovým smrštěním na úrovni 350 – 700 mikrostrain. Z hlediska dotvarování lze oproti běžným betonům uvažovat výrazně nižší součinitel dotvarování a to v rozmezí 0,6 – 1,4 (běžné betony 2,0-3,5) [33, 34]. Tato skutečnost byla ověřena experimentálně v KÚ. Hodnoty dotvarování byly stanoveny experimentálně laboratorními zkouškami. Pro beton C50/60 byl stanoven $\phi(t, t_0 = 3 \text{ dny})$: 1.06 (28dny), 2.2 (170dny) a pro UHPFRC $\phi(t, t_0 = 4 \text{ dny})$: 0.86 (28dny), 1.4 (170dny). Ověření trendu dotvarování na reálné konstrukci z UHPFRC bylo provedeno v rámci řešení výzkumného projektu TAČR TA01010269 „Aplikovaný výzkum ultravysokohodnotného betonu (UHPC) pro prefabrikované stavby“. Do první předpjeté konstrukce z UHPFRC v ČR – lávky pro pěší v Čeperce přes Opatovický potok - vyrobené společností SKANSKA a.s ve spolupráci s firmou PONTEX a Kloknerovým ústavem byly instalovány strunové tenzometry po výšce trámu. Lávka pro pěší má rozpětí 15 m a šířku 2,4m. Nosná konstrukce je tvořena předpjetým trámem tvaru „pí“ (obr.7). Na lávce je instalováno zábradlí s výplní probarveného UHPC, které je také dlouhodobě sledováno z hlediska objemových změn, trvanlivosti a rozvoji trhlin [35].



Obr. 7 Předpjetý PI nosník přes Opatovický potok v Čeperce [36]

Jedná se o unikátní měření UHPC konstrukce probíhající již 6tým rokem. Výsledky na grafu 1 potvrzují ustálení vývoje deformací a predikovaný průběh změn namáhání v průřezu. Poskytují informace o dlouhodobém vývoji objemových změn a změnách napětí ve výztuži v reálné UHPC konstrukci v provozu [36].

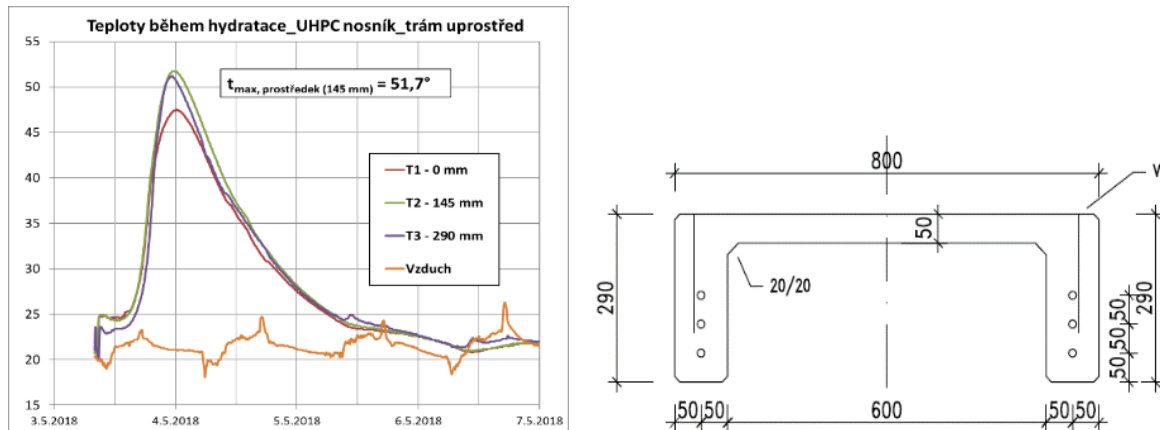


Graf 1 Průběh deformací ve spodní části trámu a v horní desce

Hodnoty finálního smrštění a dotvarování lze obecně kromě úpravy receptury redukovat vhodným ošetřováním. Často se prvky vyrobené z tohoto materiálu vystavují tepelné úpravě v raných fázích po betonáži. Jedná se o tzv. proteplování použitím vodních pár určité teploty. Tato úprava za následek dodatečnou hydrataci cementu, čímž dochází ke zvýšení pevnosti a zrychlení jejího náběhu. Touto úpravou lze dosáhnout pevností 220 MPa, ale i vyšších [37]. Tento způsob ošetřování se využívá zejména v prefabrikaci, kde je možné zajistit vhodné prostředí. Na staveništi je řešení proteplování komplikovanější ale ne nereálné. Použití proteplování je vždy spojeno s ekonomickou rozvahou vynášené energie na důkladné proteplení prvku. S rychlým nárůstem materiálových parametrů směsi je úzce spojeno i snížení dotvarování a smrštění [38]. Prakticky dojde k výraznému vytvrnutí matrice a s ním spojených chemických procesů před proběhnutím významných částí objemových změn.

3.1.5 Ošetřování a teploty během hydratace

Efekt zvýšené teploty ve smyslu vývinu teplot během hydratace cementu může být v případě realizací masivnějších konstrukcí problematickým faktorem. Matrice UHPC obsahuje velké množství cementu předně z kategorií I a II tedy portlandského či směšného portlandského cementu s vyšším vývojem tepla při jeho hydrataci [40]. Dle definice masivních konstrukcí obecně pohybující se v rozměrech tloušťky více než 0,4 m by se tento fenomén nedotýkal většiny konstrukcí z UHPC vzhledem k využití materiálu v co nejvíce úsporné variantě. S vývojem teplot během hydratace cementu je nutné počítat i u tenkostěnných konstrukcí, a to zejména při betonážích v extrémních teplotách (léto/zima). Na grafu 8 Je zobrazen průběh teplot během hydratace cementu v tenkostěnném nosníku.



Obr. 8 Vývoj teplot během hydratace cementu u tenkostěnného nosníku

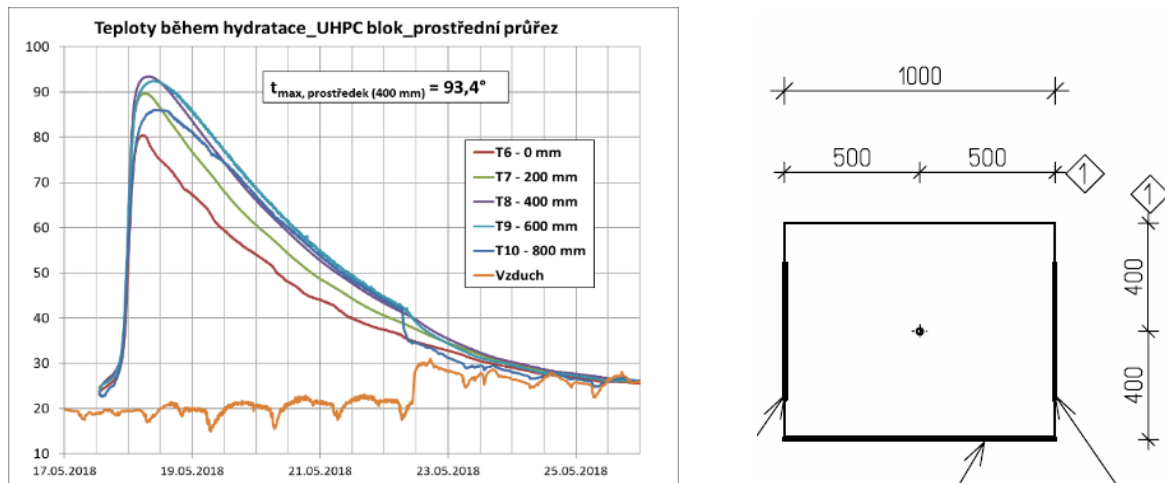
Teplota a zejména teplotní rozdíl vůči okolí je velmi vysoký a v případě vhodného ošetřování (vhodný čas odbědnění, materiál bednění, ošetřování vlašnou vodou) lze zejména u takto tenkostěnné konstrukce předejít vzniku trhlin [41]. Jako reálnou aplikaci předepnuté lávky krátkého rozpětí je možné představit lávku pro pěší v Čelákovících. Jedná se o předepjatou UHPC konstrukci výšky pouze 250 mm. Rozpětí konstrukce je 8,5 m, jedná se o prefabrikát vyrobený v prefavýrobně a na místo byla konstrukce transportována v jednom kuse. Výroba proběhla v roce 2020 společností KŠ PREFA jako jedna z prvních aplikací systému LMR (lávky malých rozpětí) vzniklého jako jednoho z výstupů projektu TAČR TH02020373 „Zvýšení životnosti a urychlení výstavby infrastrukturních dopravních staveb s využitím moderního vysokohodnotného materiálu UHPC“ (Obr.9) [42].



Obr. 9 Lávka malého rozpětí v Čelákovících [42]

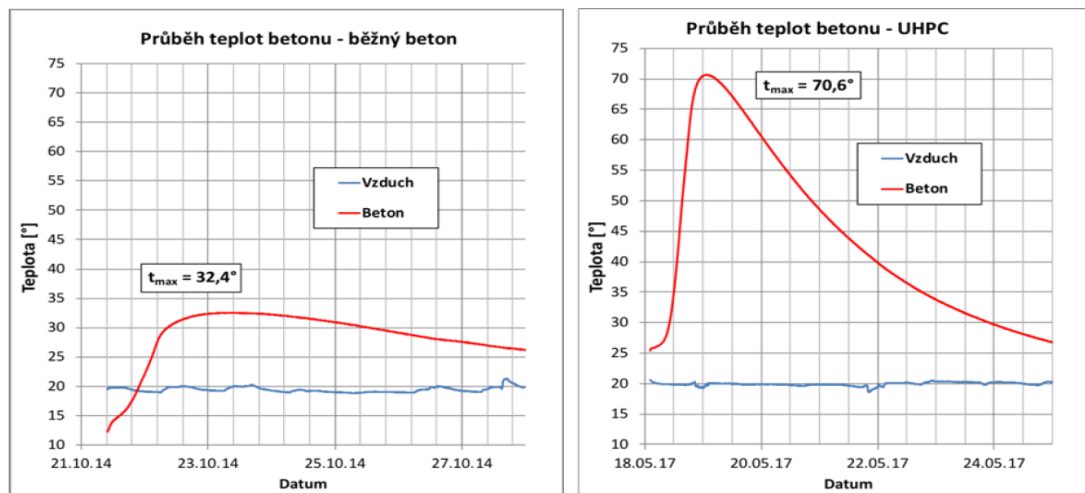
Pro srovnání, jaké teplot lze očekávat při betonáži masivnějších prvků z UHPC bez dílčích úprav (chlazení) je uveden následující graf na obr.10. Graf zobrazuje průběh teplot v masivním bloku představující koncový příčník segmentového mostu. Teploty během

hydratace převyšují hodnoty 90 stupňů. Vzhledem k rychlým náběhům materiálových vlastností UHPC i na takto zatíženém vzorku nebyly patrné žádné poruchy (mikrotrhliny) typické pro obdobné konstrukční části z běžných betonů.



Obr. 10 Vývoj teplot během hydratace cementu u masivního prvku

Pro srovnání rozdílnosti vývoje teplot během hydratace na stejném vzorku izolované krychle o rozměru 300 mm vyrobené z běžného betonu a UHPC je uveden graf na obr.11:



Obr. 11 Srovnání průběhů teplot během hydratace běžného betonu a UHPC

Uvedené skutečnosti jsou důležité při návrhu celého technologického postupu betonáže a zejména ošetřování tak aby bylo zajištěno co možná nejrovnoměrnější rozložení teplot po prvku a plynulost při přirozeném či řízeném „vychladnutí“ prvku. Výzkum v oblasti vývinu teplot během hydratace masivních prvků z UHPC byl využit při návrhu a výstavbě segmentového komorového mostu přes Lubinu v příboře (Obr.12) [43,44]. Jedná o dodatečně předepnutou lávku zhotovenou z 5ti prefabrikovaných komorových segmentů vylehčených polystyrenem. Celkové rozpětí lávky je 36 metrů a výška nosné konstrukce je

pouhých 800 mm. Segmenty byly betonovány v obrácené pozici tak, aby byl zajištěn co nejlepší povrch z bednění na pochozím povrchu lávky.



Obr. 12 Lávka přes Lubinu v Příboře [44]

3.1.6 Konzistence a zpracovatelnost

Poslední, ale jistě důležitou vlastností je samozhutnitelnost materiálu UHPC. Ta je na jednu stranu velice výhodná, jelikož při betonáži prvků není nutné zajistit vibrační pomůcky, ale na druhou stranu vede ke snížení možnosti použití materiálu na povrchy ve spádu vyšším než několik jednotek procent, případně vrstvení tohoto materiálu v rychlém časovém sledu. Pro složitější konstrukce a využití pozitivních vlastností materiálu ve spojení s tixotropií (schopností držet tvar) je nutné směs optimalizovat použitím vláken (uhlíková, PP) a také zvolit případně vhodný urychlovač tuhnutí, který zamezí roztékání směsi. Samozhutnitelnost a vysoká konzistence umožňuje betonáže velmi složitých tvarů a konstrukcí u kterých je dodatečné hutnění technicky nemožné. Jednou z takových unikátních konstrukcí je lávka pro pěší ve Vrapicích (Obr.14) [45]. Jedná se o tenkostěnnou konstrukci výškově i půdorysně zakřivené lávky o rozpětí 10 m. Tloušťka zábradlí byla 35 mm, spodní deska tloušťky 45 mm. Lávka byla navržena kompletně bez běžné výztuže – pouze s výztužením rozptýlenou výztuží (ocelové drátky). Konzistence je zkoušena kombinací metod pro stanovení konzistence SCC betonů (zkouška rozlitím, modifikovaná zkouška rozlití obráceným Abhramsovým kuželem) a malt (Haggermannův kužel) [46]. Metoda je zvolena v návaznosti na objem betonovaných konstrukcí a návaznost na laboratorní zkoušky.



Obr. 13 Tenkostěnná lávka a její výroba. Vlevo prototyp lávky, vpravo část bednění [47]

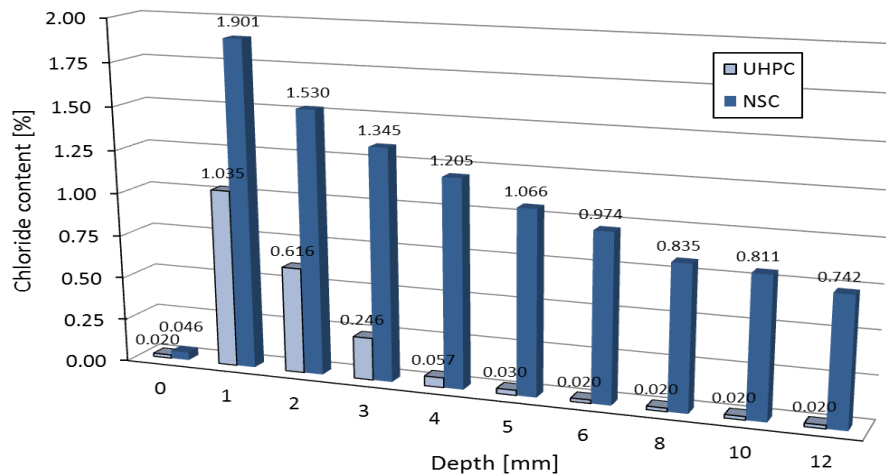
Jedním z hlavních problémů pro výrobu tvarově složité lávky byla právě technologie betonáže. Zejména díky dvojitému zakřivení a velmi tenkým stěnám lávky bylo rozhodnuto o odlití lávky „vzhůru nohama“. Vzhledem k relativně složité a pro cementové hmoty zcela neobvyklé tenkostěnné konstrukci lávky bylo rozhodnuto prověřit možnosti výroby ověřovací betonáží menšího vzorku. Kontrolní betonáž byla provedena na výseku lávky v délce 1,5 m. Hlavním cílem výzkumu bylo mimo jiné i ověření samotného procesu odlévání, výsledný stav povrchu prvku, ověření správné konzistence čerstvého UHPFRC směsi a schopnost formy odolávat tlakům čerstvé směsi betonu. Pro urychlení procesů náběhů pevností byla lávka po betonáži proteplována. Velmi důležitým prvkem byl návrh a zhotovení složitého bednění, které bylo sestaveno ze 4 kusů a následně vybetonováno v jednom taktu (obr. 13 vpravo). [47]



Obr. 14 Tenkostěnná lávka ve Vrapicích [47]

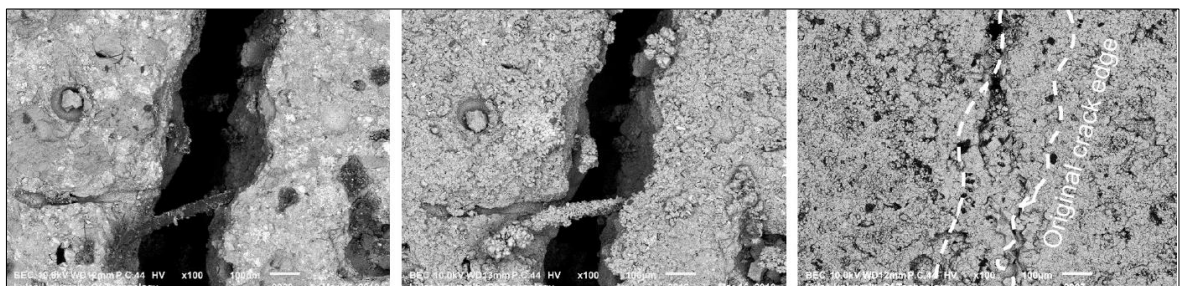
3.1.7 Odolnost a trvanlivost

Vzhledem k velmi malé permeabilitě samotné matrice UHPC dochází u výsledných konstrukcí k minimálnímu průniku vzdušného CO₂ a vody skrz strukturu materiálu a tedy i k velmi výraznému zpomalení degradačních procesů matrice materiálu [48]. Tento trend je obdobný v případě průniku chloridových iontů do struktury materiálu. Srovnání UHPC a běžného betonu je zobrazeno na následujícím grafu 2.



Graf 2 Srovnání průniku chloridových iontů v UHPC a běžném betonu [48]

Zvýšení odolnosti povrchových vrstev je dán homogenitou materiálu, vyšší objemovou hmotností a nízkou porozitou. V případě vzniku mikrotrhlin dochází v materiálu i díky vysokému obsahu nezhydratovaného cementu vlivem nízkého vodního součinitele k jeho dodatečné hydrataci (obr.15) [49]. Tato vlastnost je dlouhodobým procesem přispívajícím k vynikající trvanlivosti materiálu. Proces je iniciován vysokou vzdušnou vlhkostí a kapilárními účinky matrice. Samohojící vlastnost může být typická pro betony s krystalickými přísadami. U UHPC dochází vzhledem k rozptýlené výztuži k vzniku většího množství mikro a makrotrhlin oproti běžnému betonu. Samohojení je tak realizováno ve větším množství trhlin menších rozměrů [50].



Obr. 15 Proces samohojení trhliny v UHPC [49]

3.1.8 Shrnutí vlastností

Při rozhodování o možnosti aplikace a návrhu konstrukce do popředí kromě pevností a trvanlivosti vstupuje i charakter čerstvé směsi a to konzistence, jemnozrnnost či samonivelační a samozhutnitelný charakter. V některých případech tedy není rozhodujícím faktorem pro použití UHPC velmi vysoká finální pevnost, ale zejména jeho odolnost a schopnost materiálu vyplnit složité formy a výsledná trvanlivost. Je možné vytvářet složité tvary, reliéfy a obtisky forem a splnit tak nároky architektonické návrhy. Tyto vlastnosti se uplatňují u pohledových prvků, jako jsou například fasádní panely, zábradlí nebo lícni prefabrikáty [51]. V dalších případech lze využít rychlý nárůst pevností a tím velmi výrazně urychlit výstavbu či umožnit velmi rychlé uvedení stavby do provozu [52]. Tato zmiňovaná vlastnost je často využívána například v u spojů prefabrikovaných dílců zejména v mostním stavitelství. Vysoké počáteční pevnosti jsou úspěšně využívány pro spřažení mostních prefabrikátů s nosíky (betonové, ocelové či dřevěné). U těchto spřažených konstrukcí je maximálně využito vlastností všech použitých materiálů a v případě aplikace UHPC je využito také vynikajících vlastností v soudržnosti, což umožňuje optimalizaci rozměrů jak spřahovacích prvků, tak i rozměrů betonovaných částí. Nároky na zrychlení výstavby lze úspěšně splnit použitím subtilních desek ztraceného bednění. Tyto aplikace patří do kategorie in-situ betonáží, ve kterých je směs míchána přímo na stavbě nebo dovážena pomocí autodomíchávačů. Do stejné kategorie můžeme zařadit zesilování konstrukcí pomocí vrstvy UHPC. Tyto aplikace využívají právě trvanlivosti a odolnosti materiálu, který tvoří následně obálku zesilované konstrukce nebo se přímo podílí na statickém zesílení (zesilování desek na protlačení, vysoce namáhaných detailů, obálky tenkých sloupů apod.).

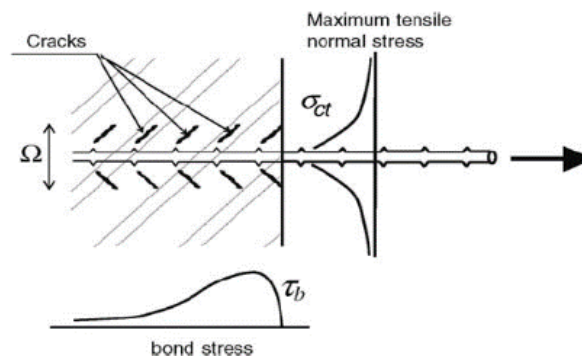
Z hlediska speciálních aplikací lze na UHPC/UHPFRC pohlížet jako na vhodný materiál splňující nejpřísnější materiálně-fyzikální parametry ale s velkou variabilitou z hlediska konzistence, míry vyztužení či jiných vlastností, které lze optimalizovat na danou konkrétní konstrukci či detail.

3.2 SOUDRŽNOST BETONÁŘSKÉ A PŘEDPÍNACÍ VÝZTUŽE S UHPC

Důležitým faktorem při návrhu a realizaci inovativních konstrukcí je kromě běžně vstupních parametrů materiálu jako je pevnost v tlaku, modul pružnosti či pevnost v tahu stanovení méně sledovaných parametrů jako je například přídržnost betonu, reziduální pevnosti nebo v případě spojování konstrukcí soudržnost výztuže. V dostupných dokumentech je tento parametr obecně popsán pro případy běžných realizací. V případě využití pro speciální případy jako je sprážení či spojení prefabrikovaných prvků pomocí betonu, respektive UHPC je nutné tento parametr experimentálně ověřit [53].

3.2.1 Smykové napětí v soudržnosti

Soudržnost mezi betonem a ocelovou výztuží je jedním z nejzákladnějších parametrů u železobetonových konstrukcí, neboť ovlivňuje zejména kotevní délku výztuže a tím i v určitých případech návrh konstrukce. Kotevní délka musí být stanovena tak, aby tahová síla ve výztuži byla prostřednictvím soudržnosti spolehlivě přenesena do okolního betonu. Pro tento účel je nutné definovat hodnotu smykového napětí v soudržnosti oceli a betonu.



Obr. 16 Nerovnoměrný průběh smykového napětí po délce prutu [54]

Norma EN 1992-1-1 [32] popisuje požadavek na soudržnost tak že aby nedošlo k porušení v soudržnosti, musí být zajištěna dostatečná mezní pevnost betonu v soudržnosti. Uvádí zároveň vztah pro návrhovou hodnotu mezního napětí v soudržnosti f_{bd} pro žebírkovou výztuž:

$$f_{bd} = 2,25 \eta_1 \eta_2 f_{ctd} \quad (1)$$

Hodnota f_{ctd} představuje návrhovou hodnotu betonu v tahu. Zároveň norma zmiňuje, že v důsledku nárůstu křehkosti betonů vyšších pevností má být pevnost $f_{ctk,0,05}$ omezena na hodnotu udanou pro beton C60/75, pokud se neověří, že průměrná pevnost v soudržnosti vzroste nad tuto mez. V případě uvažování UHPC jako materiálu převyšující pevnostní třídu C110/130 (aktuálně minimálně platné zatřídění většiny použitých směsí v ČR) je nutné tyto

hodnoty experimentálně ověřit a porovnat je s betonem běžných pevností. Výrazně vyšší hodnoty průměrného napětí v soudržnosti UHPC.

Koeficient η_1 reprezentuje součinitel závislý na kvalitě podmínek v soudržnosti a poloze prutu během betonáže a koeficient η_2 představuje součinitel závislý na průměru prutu. Do dalšího výpočtu vstupuje toto mezní napětí v soudržnosti při výpočtu základní kotevní délky:

$$l_{b,rqd} = (0/4) (\sigma_{sd}/f_{bd}) \quad (2)$$

Hodnota σ_{sd} představuje návrhové napětí v prutu v místě, od kterého se měří kotevní délka. Toto napětí z výztuže je do betonu přenášeno nerovnoměrným smykovým napětím. Tvar křivky tohoto napětí patrný z obr. 16. Jeho hodnota narůstá směrem od povrchu betonu, kde v jistém momentu dosahuje svého maxima a po délce prutu klesá. V předchozím vztahu je však využito předpokladu, že f_{bd} je podél prutu konstantní. V případě UHPC je rozložení napětí po délce prutu koncentrováno v přechodové oblasti prutu. Napětí je přenášeno na kratší vzdálenosti vlivem násobně lepším parametrům matrice oproti běžnému betonu.

Smykové napětí $T_{c,i}$ může být charakterizováno koeficientem i_f . Koeficienty soudržnosti (i_f) berou v úvahu jednotlivé příspěvky od fyzikálních sil— i_{fad} (koeficient adheze), i_{ff} (koeficient tření), $i_{f\sigma}$ (koeficient závislý na materiálových vlastnostech betonu). Horní indexy A (A^b a A^r) indikují hlavní plochy fyzikálního působení sil, b —plocha výztuže, r —žebra výztuže (profil výztuže).

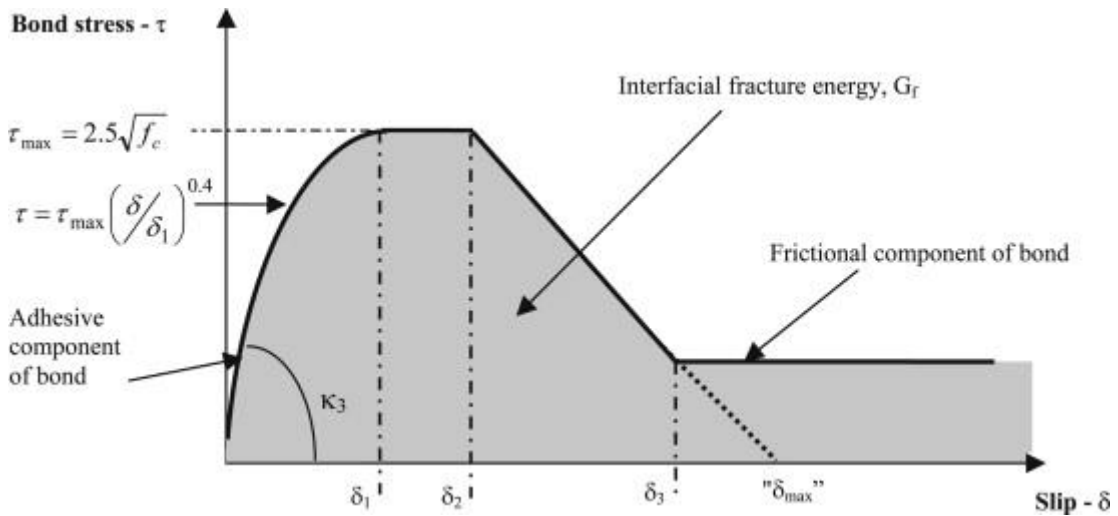
$$T_{c,i} \approx i_{fad}^{A^b, A^r} + i_{ff}^{A^b} + i_{f\sigma}^{A^r} \quad (3)$$

$$i_{f\sigma}^{A^r} \gg i_{fad}^{A^b, A^r} + i_{ff}^{A^b} \quad (4)$$

Koeficient $i_{f\sigma}^{A^r}$ bere v úvahu pevnost betonu v tlaku krycí vrstvy. V případě profilované výztuže (žebírková výztuž, výztuž s vtiskem, předpínací lana) má faktor profilace vyšší význam na celkové napětí v soudržnosti ($i_{fad}^{A^b, A^r}$ — koeficient adheze jehož součástí je adheze pojivové složky betonu; $i_{ff}^{A^b}$ — koeficient tření [55]).

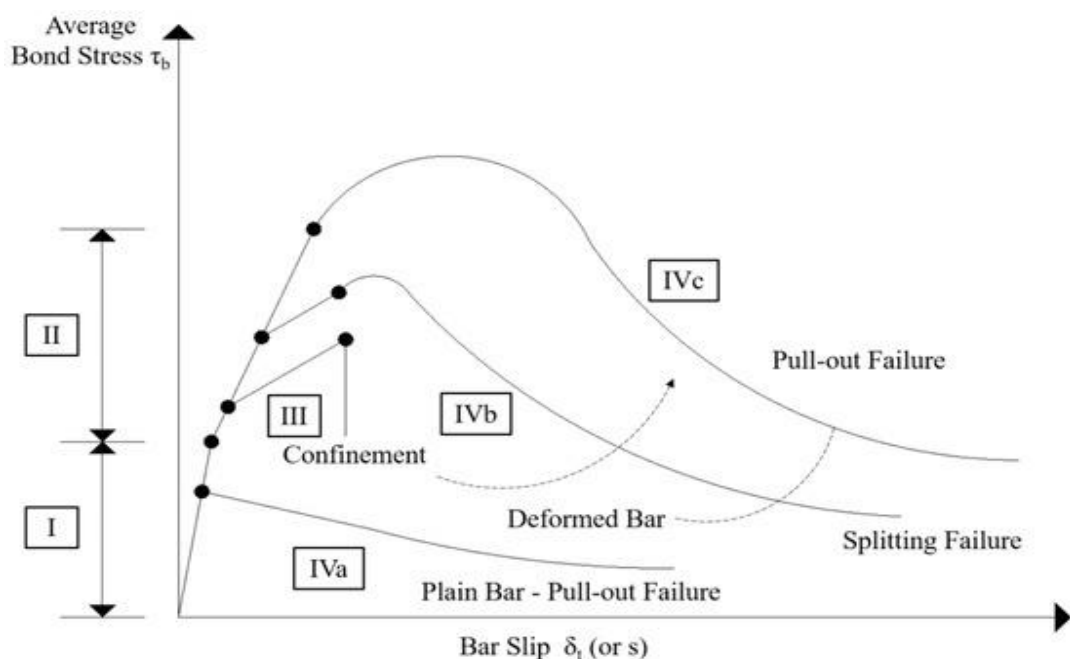
Soudržnost různých typů výztuží byla v minulosti detailně zkoumána a popsána, přičemž většina výzkumů obecně rozdělila přenos napětí z výztuže do betonu do těchto popsaných tří oblastí. Tyto odlišné oblasti namáhání jsou přizpůsobeny lokálnímu vztahu napětí v soudržnosti-pokluz navrženému v Model Code 90 (CEB 1992) [56], který je graficky znázorněn na obr. 17 a platí pro „dobré podmínky soudržnosti“. Oblast pod prezentovanu

křivkou je lomová energie G_f , kterou lze charakterizovat a predikovat způsob porušení vzorku.



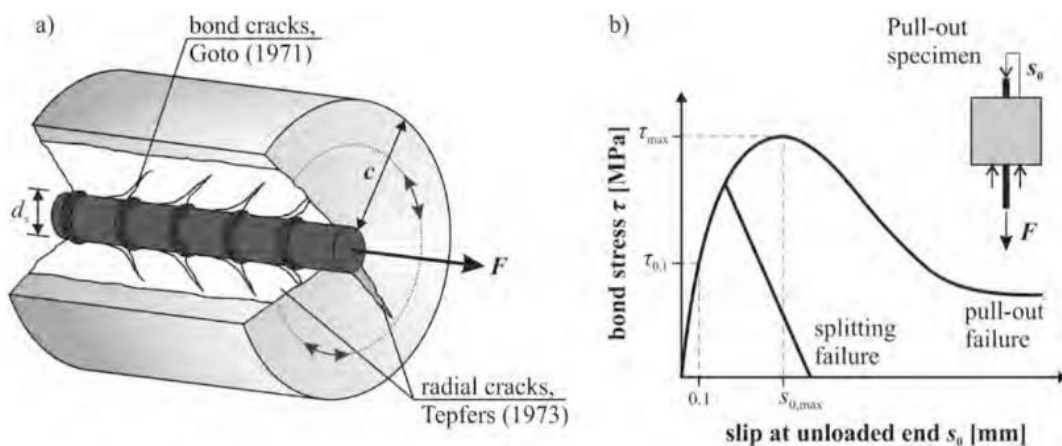
Obr. 17 Model závislosti smykového napětí v soudržnosti na pokluzu [57]

Charakteristický průběh smykového napětí na pokluzu výztuže při pull out testu je zobrazen na obr.18 [58]. V úvodní části grafu (Fáze I) je patrný lineárně elastický vztah – deformace betonu a oceli je stejná. Soudržnost je způsobena chemickou adhezí až do dosažení maximálního napětí v soudržnosti u jednoduchých výztuží. Po překročení adhezivní síly dojde k pokluznutí výztuže a pouze tření na rozhraní výztuž-beton je dále schopné přenášet smyková napětí ve stupni IVa (hladká výztuž).



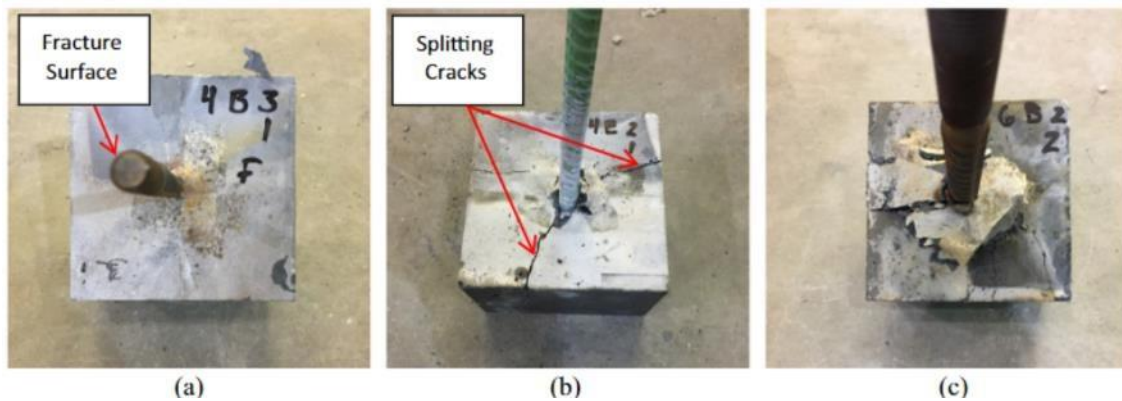
Obr. 18 Charakteristický průběh smykového napětí v soudržnosti na pokluzu výztuže [58]

Maximálního napětí není v tomto bodě dosaženo v případě žebříkové výztuže. Žebra koncentrují lokální ložiska napětí působícímu proti tahové síle a blokují ocel v betonu ve fázi II; výztuž zůstává nadále soudržná. Soudržnost ve fázi III je následně ovlivněna okrajovými podmínkami a vlastnostmi betonu. Stěpné síly mohou způsobit radiální trhliny přes celou krycí vrstvu betonu, což vede k postupně až k rozlomení vzorku (fáze IVb). Pokud je okolní vazba betonu silná (lepší materiálové parametry) dojde k postupnému vytažení výztuže vlivem tvorby příčných trhlin a s podélnými trhlinami mezi žebry (fáze IVc). Mezi oběma extrémami je možný kompromis v případě že radiální (podélné) trhliny nejsou schopny proniknout skrz celý betonový vzorek (krycí vrstvou výztuže)[59]. Jednotlivé průběhy závislosti soudržnosti na pokluzu závisí právě na okrajových podmínkách materiálových vlastností betonu, rozměru zkoušeného vzorku a typem zkoušené výztuže.



Obr. 19 Průběh a rozložení smykového napětí, porušení vnitřní struktury [59, 60]

Z hlediska zaměření výzkumu na vzájemné srovnání a vyčíslení hodnot smykového napětí v soudržnosti bylo se jako nejpřímochařejší zkouška ukazuje pull-out test. V případě zjednodušení zkoušek soudržnosti na pull-out (bude popsáno v kapitole 3.2.2) je možné rozlišovat tři druhy porušení, a to přetržení výztuže, rozlomení vzorku (podélné trhliny rovnoběžné s výztuží) a vytažení výztuže (Obr.20) [61]. Případně může dojít ke kombinaci jednotlivých porušení a k vytržení smykového kuželu (příčná trhliny kolmo na výztuž). Při návrhu konstrukce či optimalizovaného detailu je nutné reflektovat výsledky ze zkoušek a v případě nevhodného porušení vhodně upravit kotevní délku výztuže, rozložení výztuže, krytí výztuže nebo samotný rozměr konstrukčního detailu.

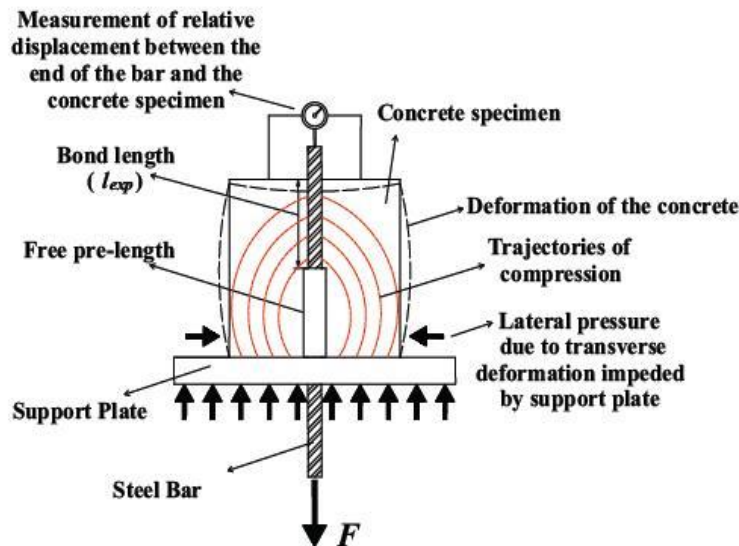


Obr. 20 Druhy porušení vzorku při zkoušce pull out testu [55]

V případě přetržení výztuže je zaručena dostatečná kotevní délka společně s krytím zkoušené výztuže. Krytí výztuže je důležité z hlediska spolehlivého přenosu příčných sil. Zároveň dostatečné krytí výztuže zajišťuje odolnost a trvanlivost konstrukce proti průniku chloridových iontů a celkově chrání výztuž. Koroze výztuže a s ní spojené expanzní vlivy mohou mít fatální vliv na narušení jak samotné soudržnosti vlivem vytvořených korozních produktů ale také narušení struktury okolního betonu. Konstrukce musí splňovat nároky na krytí výztuže betonem dle ČSN EN 1992-1-1 [32] podle daného stupně prostředí. V případě francouzských směrnic lze velmi výrazně tyto hodnoty požadovaného krytí snížit. Řádově se jedná o snížení pro jednotlivé stupně prostředí XC1-XD3 o redukci pro UHPC v řádu 10-30 mm. Tato redukce vychází z již komentovaných výborných vlastností UHPC z hlediska trvanlivosti, homogenity a malé permeability. Tento trend v oblasti krytí však neplatí v případě předpínací výztuže, u které je naopak francouzská směrnice [17,18] přísnější a z doporučených krytí rovných 1,5násobku průměru předpínací výztuže doporučuje uvažovat 2násobek. Zkušební metody jsou navrženy ale tak aby bylo zajištěno dostatečné krytí ve všech zkoušených variantách. Pro zkoušky tohoto parametru je tedy nutné zkoušky experimentálně upravit.

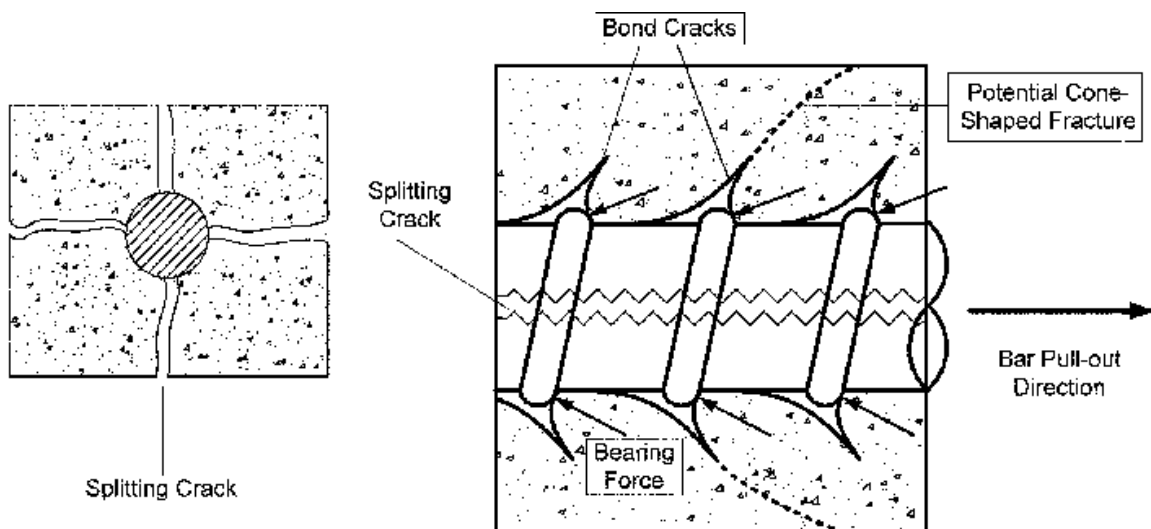
Matrice v případě dostatečné kotevní délky výztuže a dostatečné krycí vrstvy betonu přenáší spolehlivě tahová namáhání a nedochází k jejímu porušení. V případě rozlomení vzorku může být kotevní délka dostačující, ale vlivem příčného namáhání a rozložení napětí ve vzorku dojde k překročení mezních namáhání matrice. V posledním případě vytržení kuželu dochází k přenosu tahových namáhání na menší kotevní délce, než je matrice betonu schopná přenést. Vlivem příčných namáhání dojde k vytržení kuželu společně s výztuží. V případě návrhu spolehlivé kotevní délky výztuže musí být dosaženo vhodné rovnováhy mezi tahovým napětím a způsobem porušení vzorku. Nejčastějším druhem

zkoušky soudržnosti je stanovení soudržnosti právě vytažovací zkouškou – pullout testem. Výběr vybraných zkušebních postupů je uveden v následující kapitole. Na následujícím schématu na obr. 21 je patrné rozložení namáhání při aplikaci tahové síly [62].



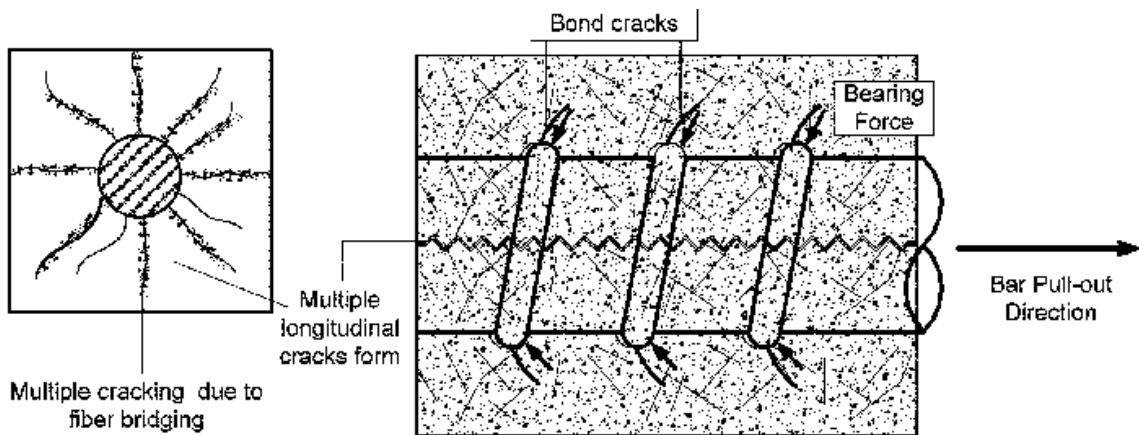
Obr. 21 Rozložení napětí při pull out testu [62]

Primárně lze specifikovat hlavní rozdíl mezi charakterem vnitřních procesů probíhajících při vytažování žebírkového prutu z běžného betonu a UHPC v charakteru porušení. Při působení tahové síly dochází při iniciaci pokluzu k vytvoření mikrotrhlin v okolí žebírek [63]. Toto příčné namáhání a rozvoj mikrotrhlinek mohou vést v případě běžného betonu k vytvoření hlavních podélných trhlin a k rozlomení vzorku vlivem jejich propagace. V některých případech může dojít k vzniku lokální trhliny a vylomení kuželu betonu. Charakter porušení je patrný z obr. 22.



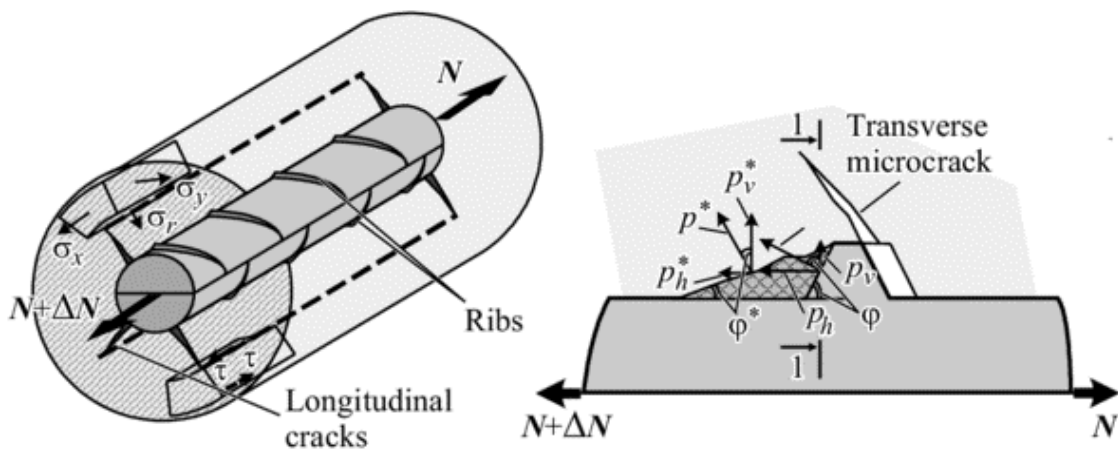
Obr. 22 Charakter porušení okolí tažené výztuže v běžném betonu [63]

V případě UHPC vyztuženého vlákny vznikají po iniciaci prvotního pokluzu mikrotrhliny kolem žebér později vzhledem k lepším materiálovým vlastnostem. Zároveň však dochází k závislosti na hustotě vyztužení k překlenutí trhlin vláknou a k tahovému zpevnění stejně jako v případě lomových zkoušek a chování materiálů v tahu. Výsledkem je vznik většího množství menších podélných trhlin (Obr.23). Pokud dojde k překročení mezního napětí výztuže v tahu dojde k jejímu přetržení, pokud naopak dojde k vyčerpání kapacity lomových parametrů matrice UHPC může dojít k propagaci hlavních trhlin a k rozlomení vzorku či vytržení kuželu. Tento efekt nastává ale výrazně při vyšších silách a při koncentrovaných napětí v případě krátkých kotevních délek.



Obr. 23 Charakter porušení okolí tažené výztuže v UHPC [63]

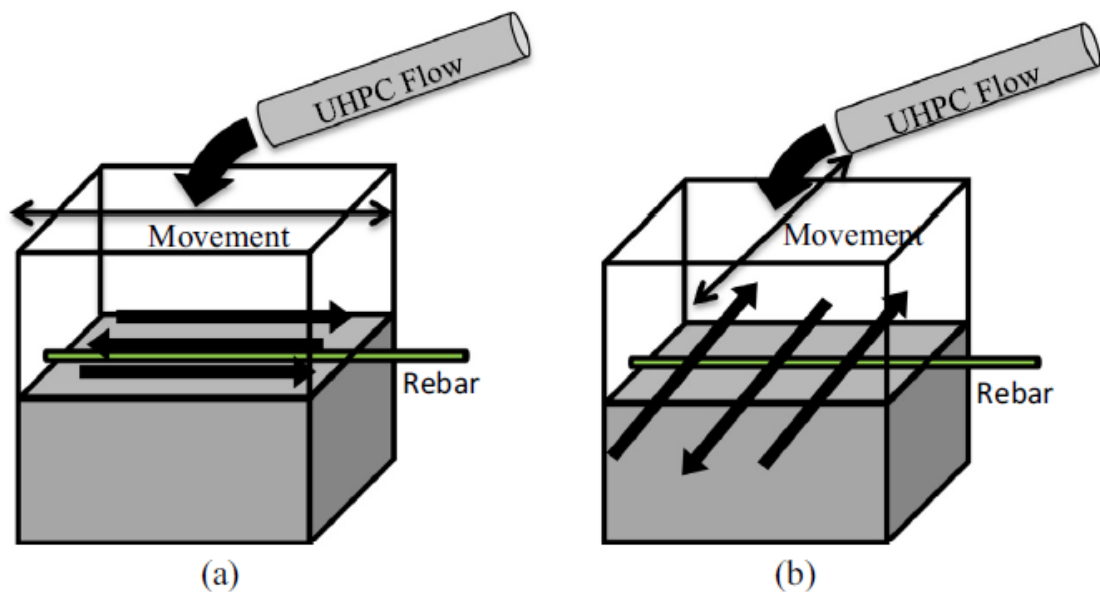
Charakteristické rozdělení působících složek vnitřních sil od adheze, tření a tlačné plochy betonu při vytahování žebříkové výztuže je znázorněno na následujících schématických obrázcích společně s charakteristickým vznikem trhlin (Obr.24) [64].



Obr. 24 Rozložení sil a napětí na žebřeru výztužného prutu při pull-out testu [64]

Vodorovná složka p_h působí jako smyková síla, která zamezuje pokluzu výztuže. Se zvýšeným zatížením se v důsledku poškození betonu před žebry mění úhel φ . Změnou úhlu dochází k ke zvýšení radiální složky, napětí σ_s (snižuje vodorovnou složku p_h a zvyšuje svislou složku p_v). Svislá složka p_v je excentrická (trhací) síla která v okolním betonu vytváří prstenec tahových napětí σ_r . Při překročení pevnosti betonu v tahu tato napětí iniciují vývoj podélných (štěpných) mikrotrhlin. Pokud okolní beton není schopen přenést tato napětí a zabránit může dojít k poškození v soudržnosti a rozvoji podélných trhlin [64].

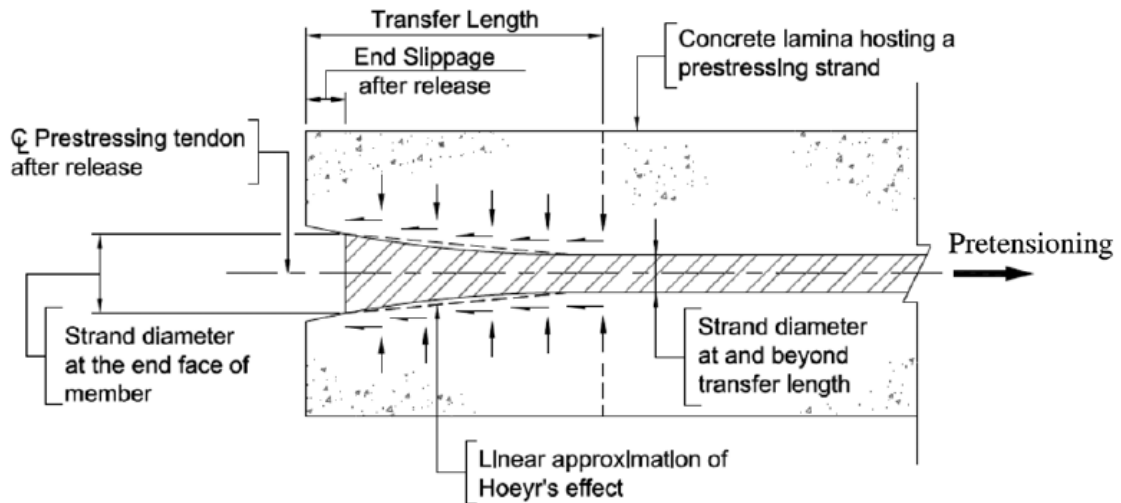
Důležitým faktorem, který je oproti běžnému betonu velmi citlivý nejen v případě ohybových pevností je způsob a směr ukládání UHPC (Obr. 25). Vzhledem k použití ve většině případů samozhutnitelných směsí s vysokou konzistencí je nutné uvažovat s prouděním směsi jako viskozní hmoty usměrňující zároveň vlákna ve směru toku. Použitím různých typů výztuže se efekt usměrnění a případného sedání vláken mění. V případě efektu na smykové napětí v soudržnosti se může efekt projevit právě v případě rozvoje mikrotrhliny v okolí žebírek. Výsledné hodnoty napětí v soudržnosti a charakter porušení bude závislý na množství vláken orientovaných kolmo na vznikající trhliny. Tento efekt směru betonáže se snižuje se zvětšujícím se objemem rozptýlené výztuže ve směsi.



Obr. 25 Usměrnění rozptýlené výztuže s ohledem na ukládání směsi [55]

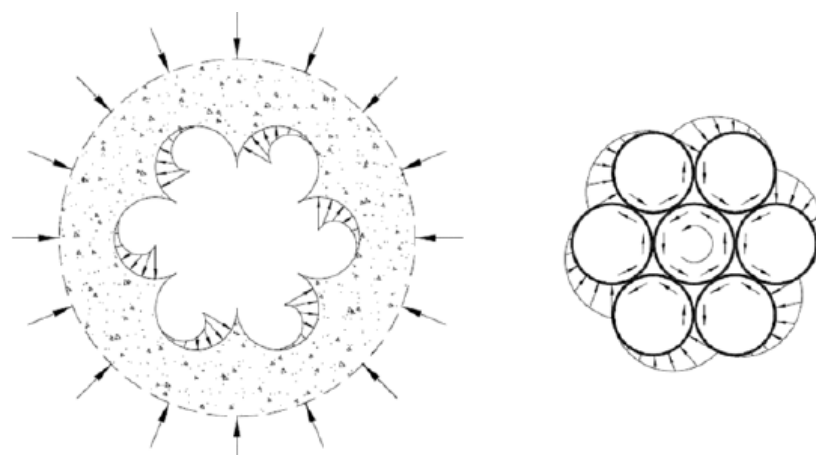
Při realizaci experimentů je nutné dbát na finální polohu výztuže a směr ukládání UHPC. Směr vláken může ovlivnit charakter porušení, a to zejména při malých krycích vrstvách či krátkých kotevních délkách kde dochází k extrémnímu namáhání.

U zkoušek soudržnosti předpínací výztuže, respektive předpínacího lana je nutné brát v úvahu dva stavy při kterých může být výztuž zkoušena. Stav nepředepnuté výztuže a stav při vneseném předpětí. Vnesení předpětí do prvku s sebou přináší zejména objemové změny po délce lana a to hlavně v místě uvolněného konce (Obr.26).



Obr. 26 Efekt předpětí v místě konce předpínací výztuže v betonu [65]

U předem předpjatých konstrukcí jsou předpínací lana před litím betonu napnutá. Jakmile beton dosáhne dostatečné pevnosti (počáteční pevnosti v tlaku), lana jsou uvolněna a napětí je vneseno do betonu. Proces přenosu zatížení mezi předpínacím lanem a konkrétním betonem je založen na následujících mechanismech: adhezi na rozhraní mezi dráty a betonem, Hoyerovým (klínovým) efektem [66] a mechanickému zaklesnutí mezi dráty a betonem. Adheze mezi předpínacím lanem a matricí betonu je výsledkem chemické a fyzikální vazby vyvinuté na rozhraní obou médií a je primárně řízena smykovou pevností slabšího materiálu (cementová matrice) [67]. Tato vazba je velmi ovlivněna povrchovým stavem drátů. Mechanické zaklesnutí a charakter působících sil je patrný z obr.27.



Obr. 27 Schema působících sil v kontaktní oblasti předpínacích lan [65]

3.2.2 Metody stanovení soudržnosti

Hydnoty smykových napětí v soudržnosti mezi betonem a ocelí se lze stanovit pomocí několika norem a předpisů. Ty se liší především podstatou samotných zkoušek a tvary zkušebních těles. Velká pozornost musí být věnována správné interpretaci výsledků u jednotlivých zkoušek. Zde jsou uvedeny stručné charakteristiky těchto norem, předpisů a modifikovaných testů z literatury:

- ČSN 73 1328 Stanovení soudržnosti oceli s betonem
- RILEM RC5 Bond Test for Reinforcing Steel. 1. Beam test
- RILEM RC6 Bond Test for Reinforcing Steel. 2. Pull out test
- Modifikované metody pull out testů z literatury
- ČSN 73 1333 – Zkoušení soudržnosti předpínací výztuže s betonem
- ASTM A1081/A1081M. Standard test method for evaluating bond of sevenwire steel prestressing strand

ČSN 73 1328 Stanovení soudržnosti oceli s betonem

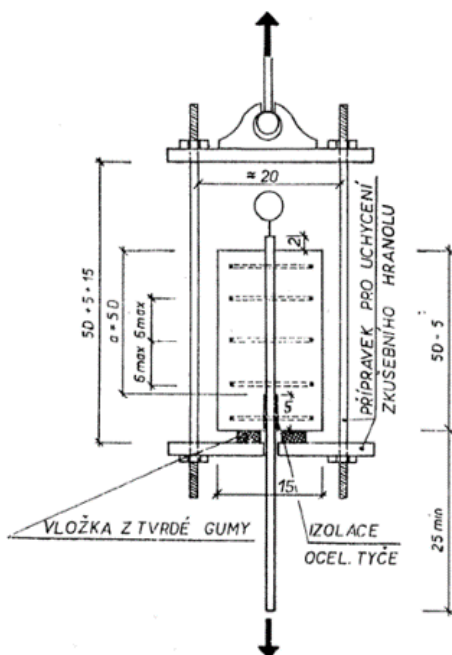
První část ČSN 73 1328 [68] předepisuje pro stanovení soudržnosti použití těles ve tvaru hranolu čtvercového průřezu o straně 150 mm a výšce $5D + 50$ mm s osově zabetonovaným prutem (D – průměr ocelového prutu). Výztuž je s betonem soudržná v délce $5D$ - do výšky 50 mm od základny hranolu je výztuž izolována tak, aby beton k oceli nepřilnul (viz obr. 2). Zkušební těleso je ve stáří 28 dnů umístěno do zkušebního přípravku, ve kterém je zabetonovaná výztuž za její delší konec vytahována čelistmi zkušebního stroje. Mez soudržnosti betonu a ocelové výztuže je ve smyslu této normy dána velikostí tahové síly dosažené při posunu horního konce ocelového prutu o 0,001 až 0,002 mm [68]. Hodnota soudržnosti je dána hodnotou průměrného smykového napětí.

Druhá část této normy popisuje zkoušku na trámcích, respektive stanovení soudržnosti vodorovně zabetonované výztuže pomocí zkoušky v čtyřbodovém ohybu. Norma předepisuje použití trámů o příčném rozměru 150x250 mm a délky stanovené podle potřebné kotevní délky prutu a . Výztuž je od betonu separována v místech podpor, kde by mohlo docházet k jejímu stlačení a uprostřed, tak aby zde bylo možné měřit její deformaci (obr. 28). Při zkoušce je měřen průhyb uprostřed rozpětí, deformace spodního prutu v jeho obnažené části, posun vyčnívajících konců spodního prutu a síla při výraznějším posunu výztuže (zpravidla 0,002 mm).

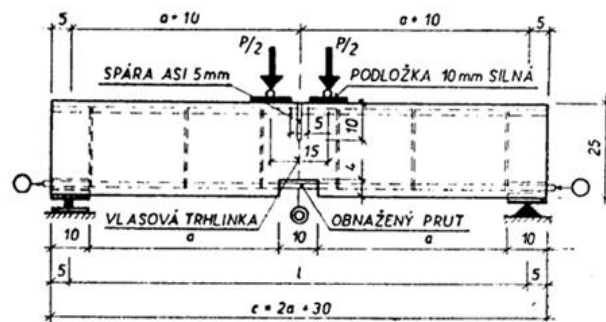
RILEM RC5 Bond Test for Reinforcing Steel. 1. Beam test

Předpis RILEM RC5 [69] předepisuje stanovení smykového napětí mezi betonem a ocelovou výztuží na trémčích postupem obdobným jako druhá část ČSN 73 1328 – čtyřbodovým ohybem trémce. Oproti české normě tento předpis uvádí dva druhy zkušebních trémců (typ A, B) respektive jejich rozměrů v závislosti na použitém průměru zkoušené výztuže.

V detailu se jedná o dva samostatné betonové prvky vyztužené běžnou výztuží, které jsou uprostřed spojeny pouze ocelovým kloubem umístěným u horního okraje. Zkoušená probíhající výztuž se nachází u spodního okraje a je v každé polovině trémce soudržná s betonem v délce $10\varnothing$.

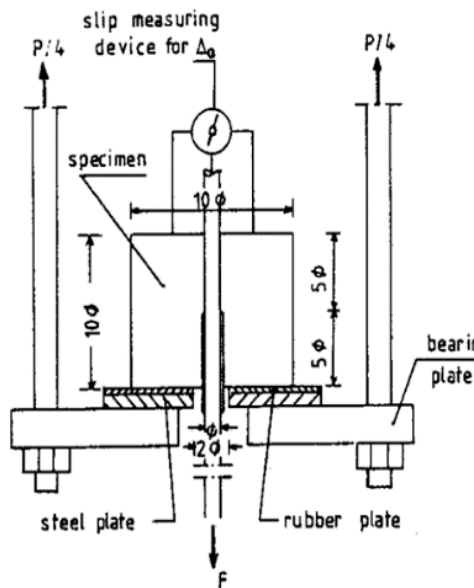


Obr. 28 Schéma pull-out testu dle ČSN 71-1328, část první [68]

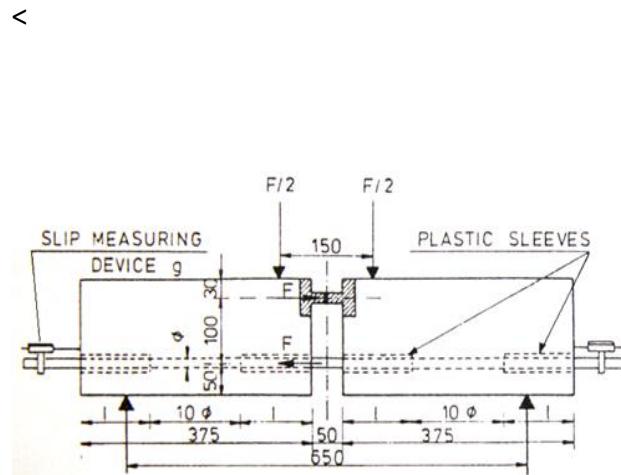


Obr. 29 Schéma zkušebního trémce dle ČSN 71-1328, část druhá [68]

Nad podporami a uprostřed celého trémce je výztuž separována plastovými kanálky. Zatížení silou F je rozloženo do dvou bodů ve středu rozpětí vzdálených od sebe 150 mm (typ A) nebo 200 mm (typ B). Během zkoušky je měřen posun obou konců výztuže na krajích trémce (obr. 31).



Obr. 30 Schéma pull-out testu dle RILEM RC6 [70]



Obr. 31 Schéma zkušebního trámce (typ A) dle RILEM RC5 [69]

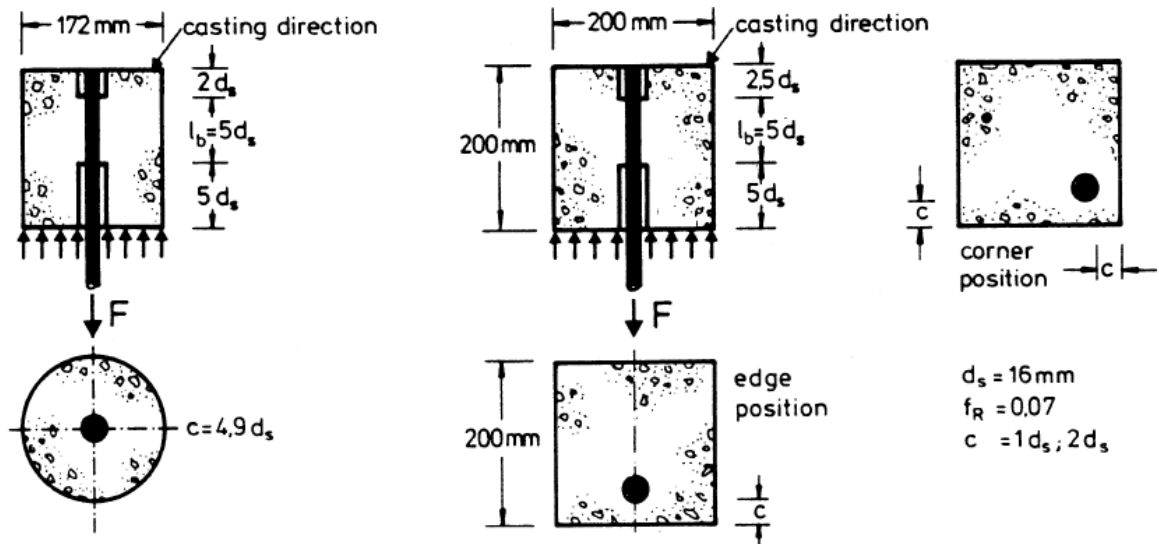
RILEM RC6 Bond Test for Reinforcing Steel. 2. Pull-out test

Další kapitolou předpisu RILEM – konkrétně kapitoly RC6 [70] je stanovení smykového napětí v soudržnosti vytahováním ocelového prutu z krychle o hraně minimálně 200 mm. Obdobný postup popisuje již v úvodu zmíněná ČSN 73 1328. V závislosti na průměru zkoušené výztuže jsou jako v předchozím případě modifikovány rozměry zkušební tělesa (mimo jiné rozhodující faktor - kotevní délka dané výztuže). Základní schéma zkušební přípravku se zkušebním vzorkem je zobrazeno na obr. 30.

Výztuž prochází středem krychle, ve které je instalován plastový kanálek tak, aby byla kotevní délka výztuže právě $5x\varnothing$. Zkušební zařízení při zkoušce vytahuje výztuž za její delší konec silou F z krychle umístěné ve zkušebním přípravku na ocelové destičce a gumové podložce, která umožňuje vyrovnání nerovností mezi ocelí a povrchem betonu. Během zkoušky je měřena tahová síla a posun horního nezátíženého konce výztuže.

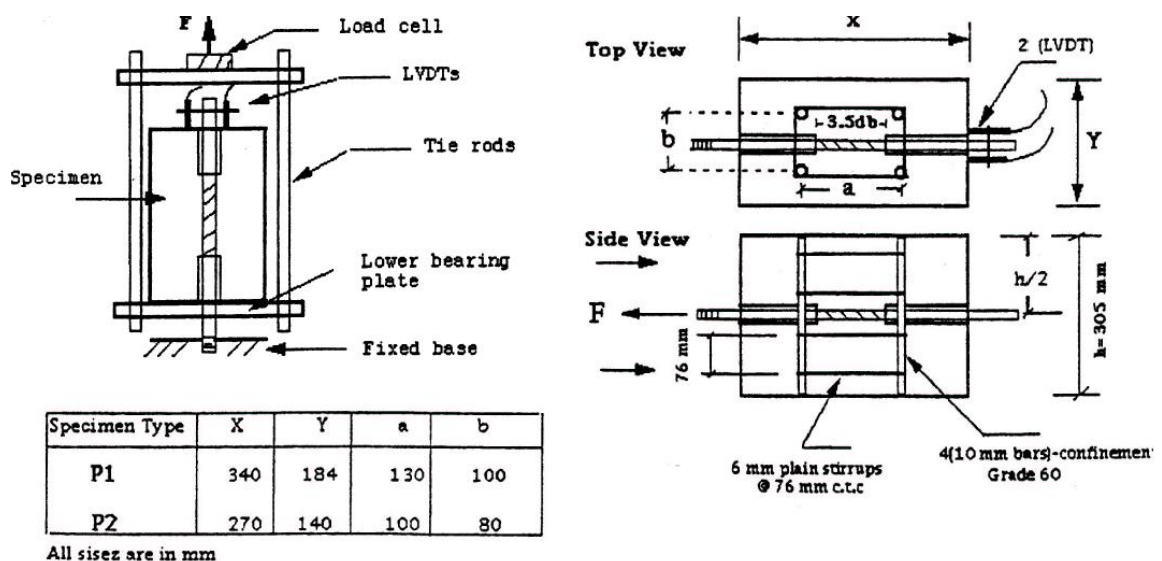
Modifikované pull out zkoušky soudržnosti z literatury

Vliv pozice a tvaru zkušebního tělesa na výslednou soudržnost společně s vlivem přidání vláken bylo předmětem výzkumu [72]. Výtuž je při zkoušce soudržná pouze uvnitř vzorku, důležitý je daný směr uložení betonu s vlákny. Vzorky a uspořádání zkoušky (Obr 32) vychází z doporučení RILEM RC6.



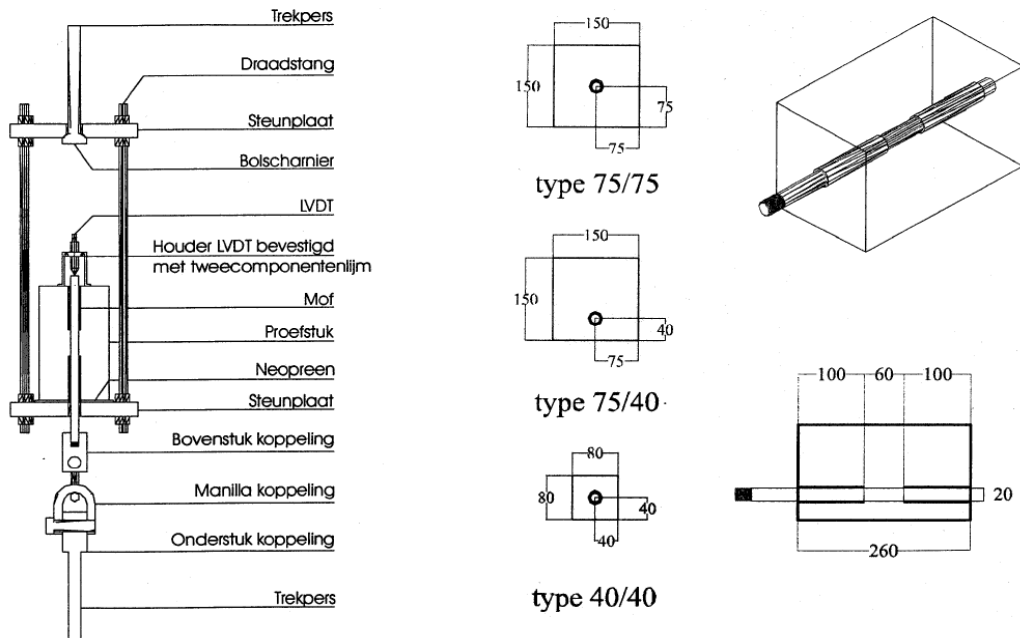
Obr. 32 Schema vzorků a rozložení zkoušky dle [72]

Experimentální výzkum [73] průběhu smykového napětí v soudržnosti žebírkové výtuže ve vlákny vyztuženém betonu popisuje upravený pull out test. Na vzorcích betonu se zabetonovanou výtuží průměru 20 a 25 mm a s kotevní délkou rovnou 3,5násobku průměru byly prováděny statické testy a dále byl zkoumán i vliv cyklického zatěžování. Schema vzorků a uspořádání zkoušky je zobrazeno na obr.33.



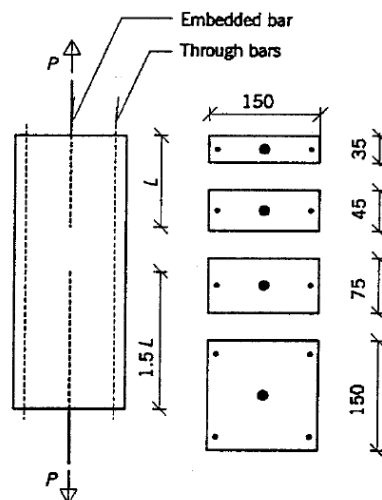
Obr. 33 Schema vzorků a rozložení zkoušky dle [73]

Experimentální výzkum [74] se zaměřil na stanovení vlivu obsah vláken a tloušťku betonové krycí vrstvy na soudržnost žebříkové výztuže a na charakter porušení. Obrázek 34 ukazuje typy zkušebních vzorků. Vzorky jsou oproti RILEM RC6 zmenšeny a byla zkoušena výztuž průměru 20 mm s kotevní délkou rovnou 3násobku průměru.



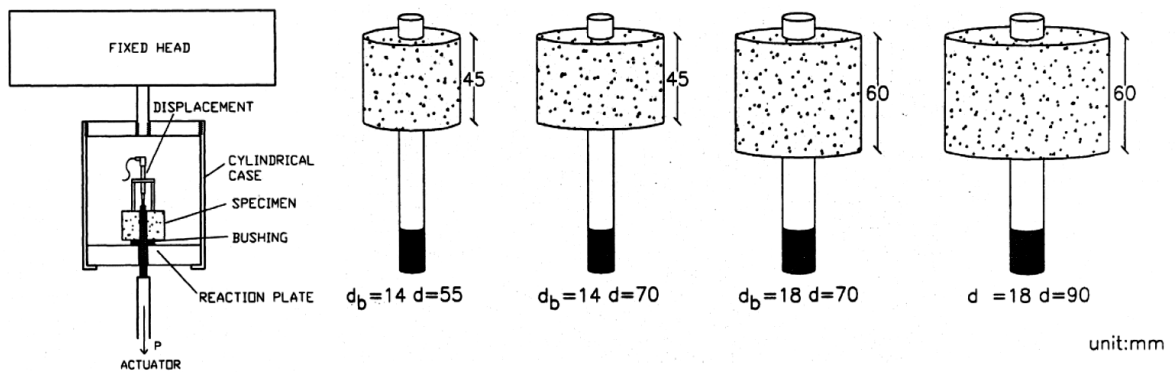
Obr. 34 Schema vzorků a rozložení zkoušky dle [74]

Cílem dalšího výzkumu [76] bylo popsání soudržnosti žebříkové a předpínací výztuže ve vysokopevnostním betonu s důrazem na účinek přidání ocelových vláken. Obrázek 35 ukazuje schema vzorku použitého v této studii, který je upravou dánského standartu DS2082 [76]. Výsledky experimentu poukazují na významné snížení kotevní délky z 60 průměrů výztuže na 20 průměrů.



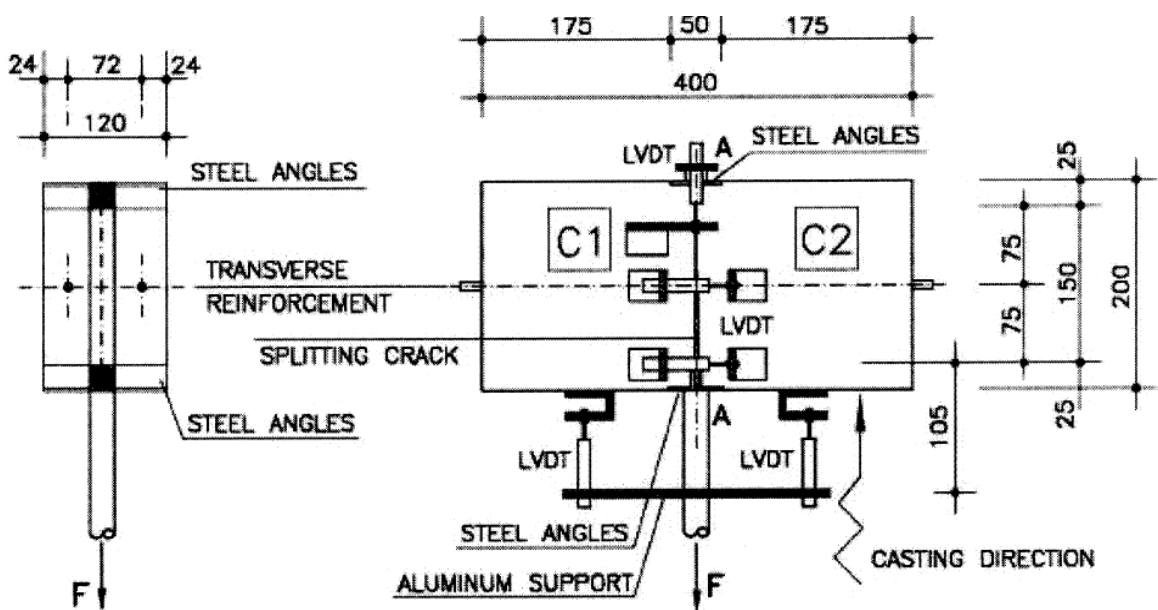
Obr. 35 Schema vzorků a rozložení zkoušky dle [76]

Ve výzkumu [77] byly pull out testy zaměřeny pouze na charakter porušení a stanovení maximálního smykového napětí v soudržnosti žebříkové výztuže s vysokohodnotným betonem. Kotevní délka ve válcových tělesech byla zvolena jako 3násobek průměru výztuže. Výztuže byly kompletně obetonovány. Zkoušky jsou zobrazeny na obrázku 36.



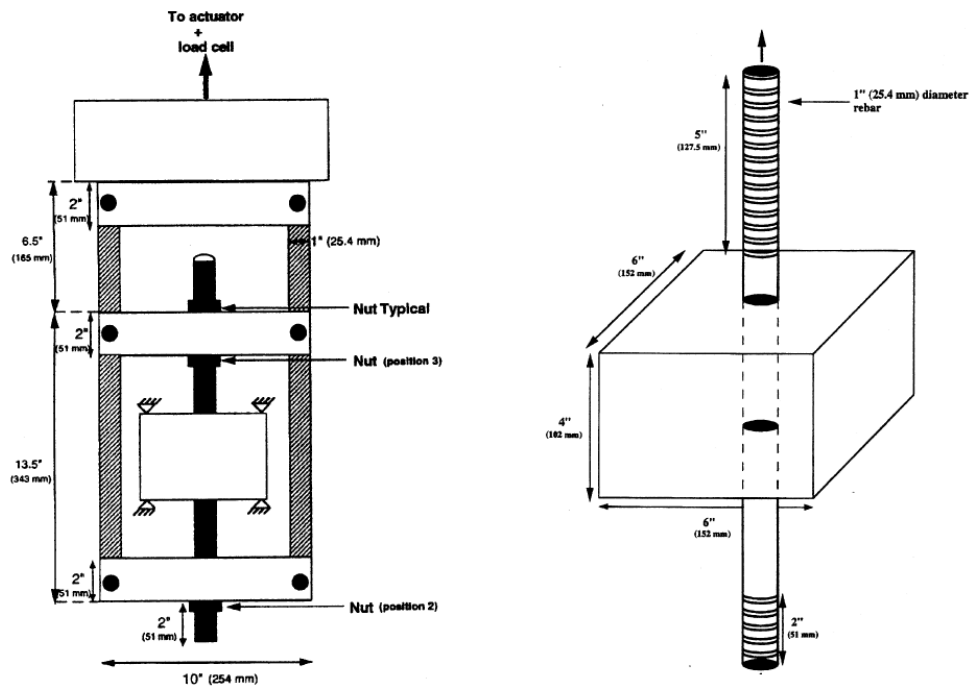
Obr. 36 Schema vzorků a rozložení zkoušky dle [77]

Ve výzkumu popsaném v [78] jsou popsány zkoušky žebříkových výztuží s krátkou kotevní délkou v oblasti třmínků. V testech je věnována zvláštní pozornost vlivu příčné výztuže jak na chování v soudržnosti, tak i na rozvoji podélných trhlin. Na obr.37 je zobrazeno schema zkoušky a zkušební vzorku. Do vzorků byly instalovány ocelové úhelníky do obou konců výztuže tak, aby se lokalizovala podélná trhlina. Dřívější výzkum [79] ukázal, že vzorky s předem vytvořenými trhlinami jsou obecně charakterizovány nižší soudržností ve srovnání s těmi bez předem vytvořených trhlin, kde není narušen účinek okolního betonu.



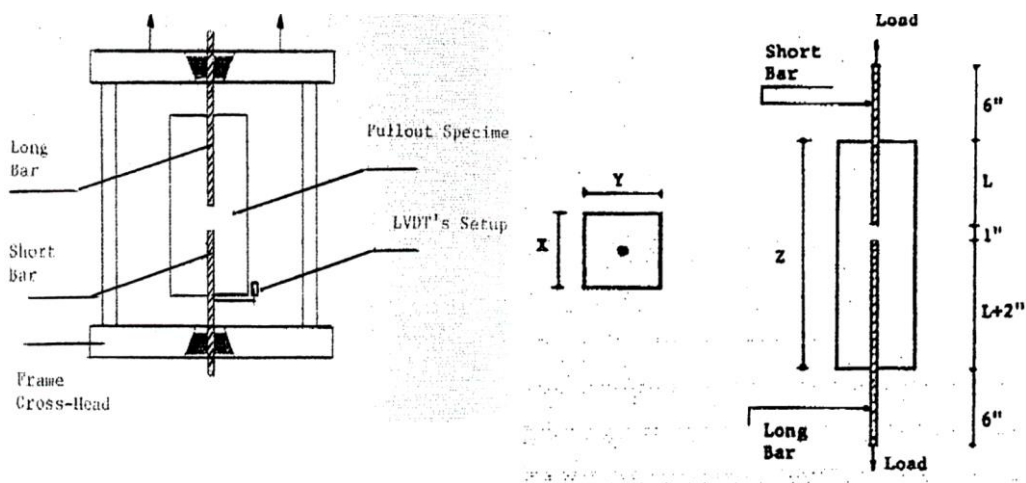
Obr. 37 Schema vzorků a rozložení zkoušky dle [79]

Účelem experimentální studie uvedené v [80] byl výzkum soudržnosti výztuže v betonu při různých typech zatížení, tj. monotónním, jednosměrném cyklickém a obráceném cyklickém zatížení. Obrázek 38 popisuje schema zkoušky a geometrii vzorku.



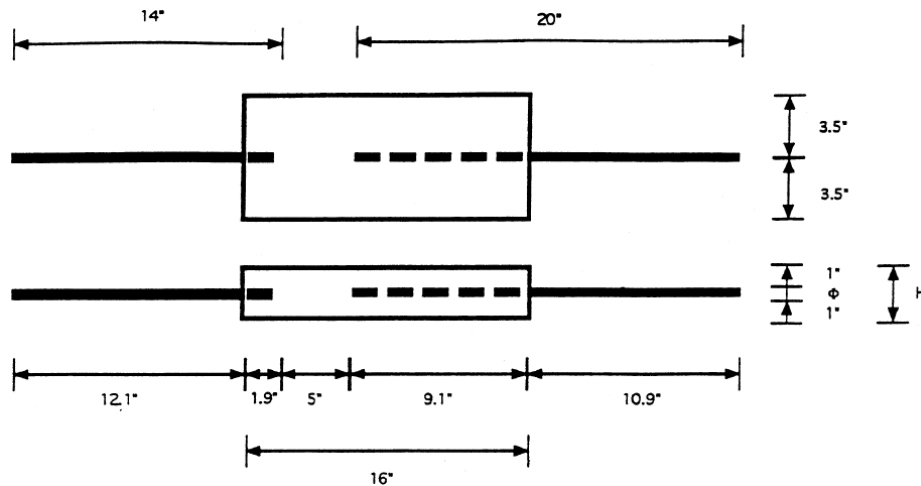
Obr. 38 Schema vzorků a rozložení zkoušky dle [80]

Experimentální studie prezentovaná v [81] a [82] byla navržena k vyhodnocení soudržnosti a chování betonu s rozptýlenou ocelovou výztuží. Zkoušky byly prováděny na upraveném vzorku pro pull out, ve kterém byl beton namáhán v tahem. Účelem takové konfigurace bylo simulovat chování výztuže v napínací zóně nosníků. Zkoumané modely zatížení zahrnovaly monotónní, napůl cyklické a reverzní cyklické vytažení. Obrázek 39 ukazuje geometrii vzorku a schema zkoušky.



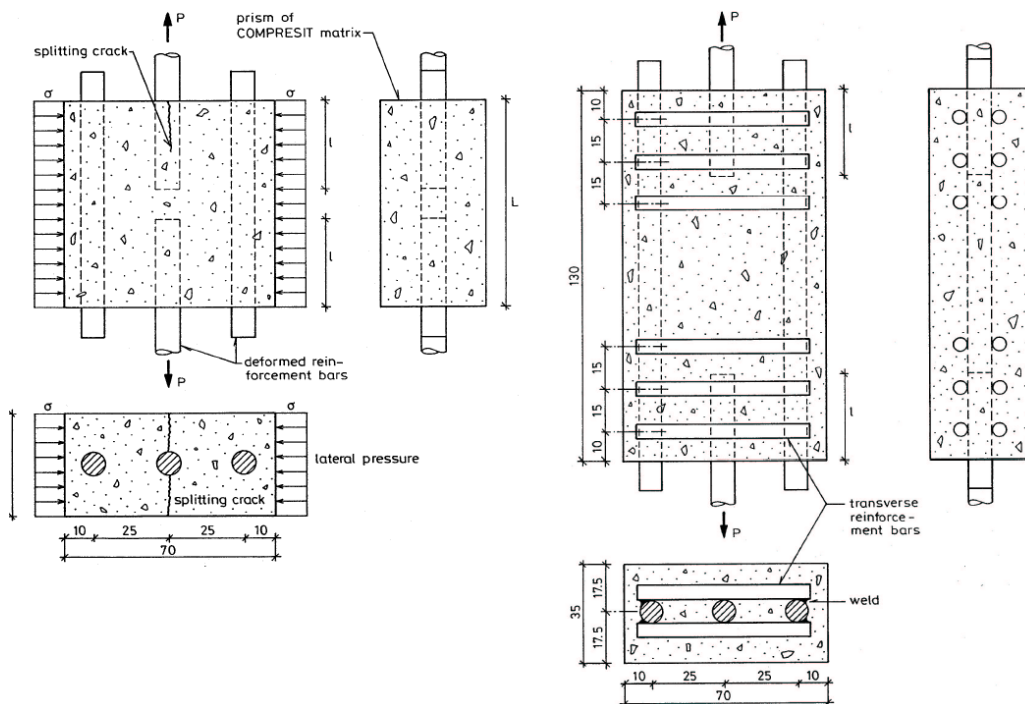
Obr. 39 Schema vzorků a rozložení zkoušky dle [81,82]

Cílem tohoto výzkumu popsaného v [83] bylo určit účinek změny v pevnosti v tahu a houževnatosti materiálu při odezvě pull out testu žebříkové výztuže. Pro experimenty byly vybrány 4 druhy materiálu: prostý beton, dva typy SFRC a vysokohodnotný SFRC (HPSFRC), představující křehký, pseudo-křehký a pseudo-tvárný materiál chování. Schema na obr.40.



Obr. 40 Schema vzorků a rozložení zkoušky dle [83]

Zkoušky popsané v [84] a [85] se zabývají soudržností výztuže s kompozitem vysokých pevností. Účelem zkoušek bylo zjistit kapacitu ukotvení žebříkových prutů vložených do matice s přihlédnutím k vlivu rozložení výztuže, příčné výztuže a bočního stlačení. Obrázek 41 ukazuje schematické rozložení pull out vzorků použitých v této studii.

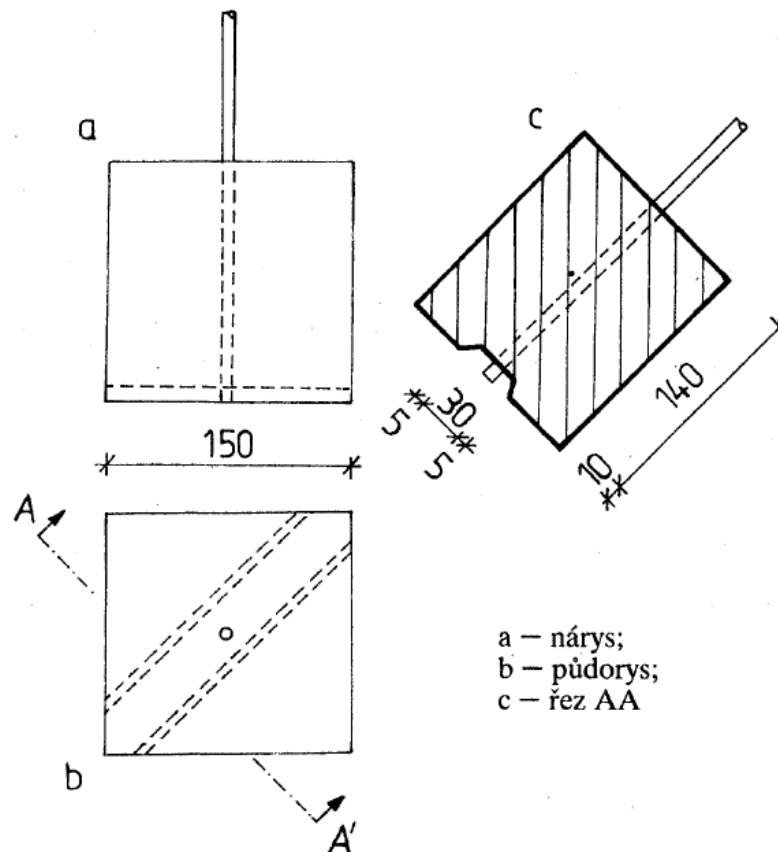


Obr. 41 Schema vzorků a rozložení zkoušky dle [84]

ČSN 73 1333 – Zkoušení soudržnosti předpínací výztuže s betonem

Následující část se věnuje popisu metodik zkoušení soudržnosti předpínací výztuže s betonem. Program je zaměřena na ověření vlivu materiálových vlastností na soudržnost betonu a předpínací výztuže, která je svým tvarem a charakterem odlišná od betonářské výztuže.

Stanovením soudržnosti předpínací výztuže s betonem se zabývá norma ČSN 73 1333 – Zkoušení soudržnosti předpínací výztuže s betonem [86]. Ta jako zkušební vzorky předepisuje krychle o hraně 150 mm s osově zabetonovanou výztuží (obr.42). Tato výztuž je pomocí dřevěného klínku u dna formy vystředěna a upevněna tak, že výsledná kotevní délka výztuže činí 140 mm (obr.43). Zkouška neuvažuje předpětí výztuže, jedná se o zkoušku vhodnou pro srovnávací zkoušky jak materiálů, tak například povrchových úprav výztuže.



Obr. 42 Schéma uspořádání zkoušky pull out testu dle ČSN 73 1333 [86]

Příprava a betonáž zkušebních těles probíhala v souladu s normou ČSN 73 1333. Norma umožňuje pro experimentální účely použití libovolné třídy betonu a předepisuje pouze přípravu zkušebních vzorků dle schématu viz obr. 42. V případě provedených experimentů bylo k přípravě zkušebních těles využito běžného betonu NSC a UHPC. Vzhledem k

samozhutitelným vlastnostem konkrétních směsí UHPC, byla směs ukládána bez následného hutnění. Zkušební vzorky z NSC byly hutněny ocelovou tyčí. Ihned po odformování byly vzorky zabaleny do PE folie a uloženy v laboratorním prostředí (+20°C) tak aby byla jejich vlhkost neklesala.



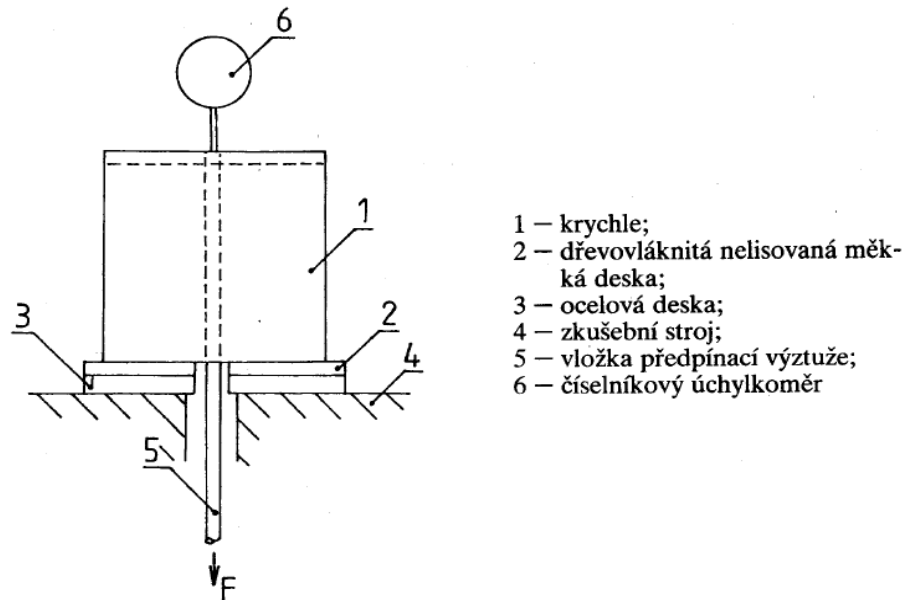
Obr. 43 Schéma výroby zkušební vzorku



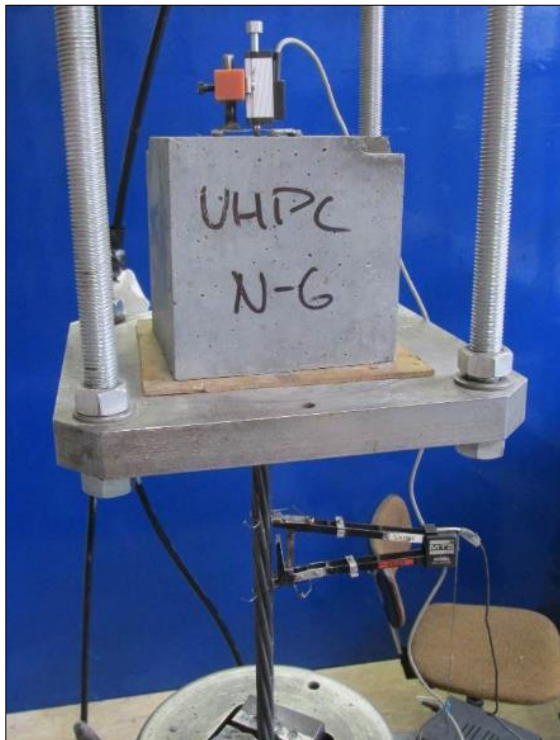
Obr. 44 Připravená forma s výztuží

Při zkoušce je vzorek se zabetonovanou výztuží vložen do ocelového zkušební přípravku, který se pomocí kloubového závěsu upevní do horní části zkušební lisu. Výztuž je při zkoušce vytahována čelistmi zkušební stroje a je měřena tahová síla ve výztuži a posun horního nezatíženého konce výztuže. Delší konec zkoušené výztuže je při zkoušce vytahován čelistmi zkušební stroje. Zkouška byla řízena posunem válce s čelistmi a byla přerušena po dosažení hodnoty pokluzu horního konce výztuže cca 10 mm. Rychlost zatěžování byla zvolena 0,02 mm/s. Při zkoušce byl měřen posun tažené části výztuže, protažení výztuže a posun horního nezatíženého konce výztuže vzhledem k betonu (pokluz výztuže). Protažení výztuže bylo měřeno extenzometrem umístěným cca v polovině spodní části tažené výztuže a posun horního nezatíženého konce výztuže byl měřen potenciometrickým snímačem dráhy. Tento snímač byl umístěn na horní hraně krychle, viz obr. 47.

Výsledkem zkoušky je vyhodnocení jednak průběhu závislosti posunu nezatíženého konce zkoušené výztuže, jednak odvození maximálního napětí v soudržnosti výztuže s betonem a stanovení soudržnosti výztuže dle [86]. Naměřená síla je přepočítávána na průměrné smykové napětí v soudržnosti na celou kotevní délku.



Obr. 45 Schéma uspořádání zkoušky pull out testu dle ČSN 73 1333 [86]



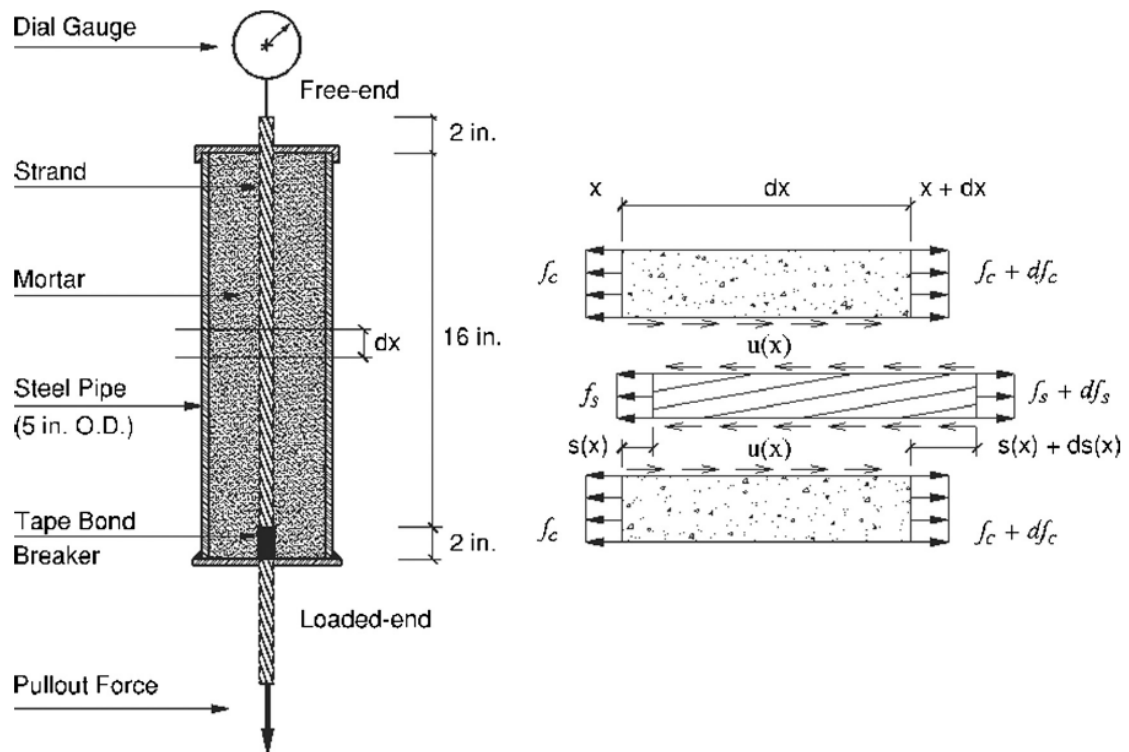
Obr. 46 Uspořádání zkoušky



Obr. 47 Potenciometrický snímač

ASTM A1081/A1081M. Standard test method for evaluating bond of sevenwire steel prestressing strand

Tato zkušební metoda popisuje postupy pro stanovení soudržnosti předpínacího ocelového lana ze sedmi drátů [87]. Soudržnost určená touto zkušební metodou je uvedena jako tahová síla potřebná k protažení lana vytvrzenou maltou ve válcovém ocelovém pouzdře. Výsledkem zkoušky je tahová síla měřená na zatěžovaném konci lana, která odpovídá pokluzu 0,1 palce (2,5 mm) na volném konci lana. Schema zkoušky je na obr.48.



Obr. 48 Schéma uspořádání zkoušky pull out testu dle ASTM A1081 [87]

Z jednoho lana kontinuální délky je vybráno šest vzorků předpínacího sedmidrátového lana s jmenovitými průměry 12,7 mm nebo 15,24 mm. Každý ze šesti vzorků vláken je jednotlivě odlit do ocelového pláště válce se speciální cementovou maltou. Lano je obnaženo na obou koncích válce s označeným zatěžovaným koncem a volným koncem. Jakmile malta dosáhne stanovené pevnosti v tlaku, je válec se zabetonovaným ocelovým lanem vložen do stroje na zkoušení tahem. Určený zatěžovaný konec ocelového lana je uchopen čelistmi stroje a zatěžován tahovou silou proti válci stanovenou rychlostí posuvu. Tahová síla na zatíženém konci lana je měřena společně s odpovídajícím posunem volného konce. pohybu 0,1 palce [2,5 mm] na volném konci pramene. Výsledky každého vzorového testu ze sady šesti jsou uvedeny jednotlivě a jako průměrná hodnota soudržnosti [88].

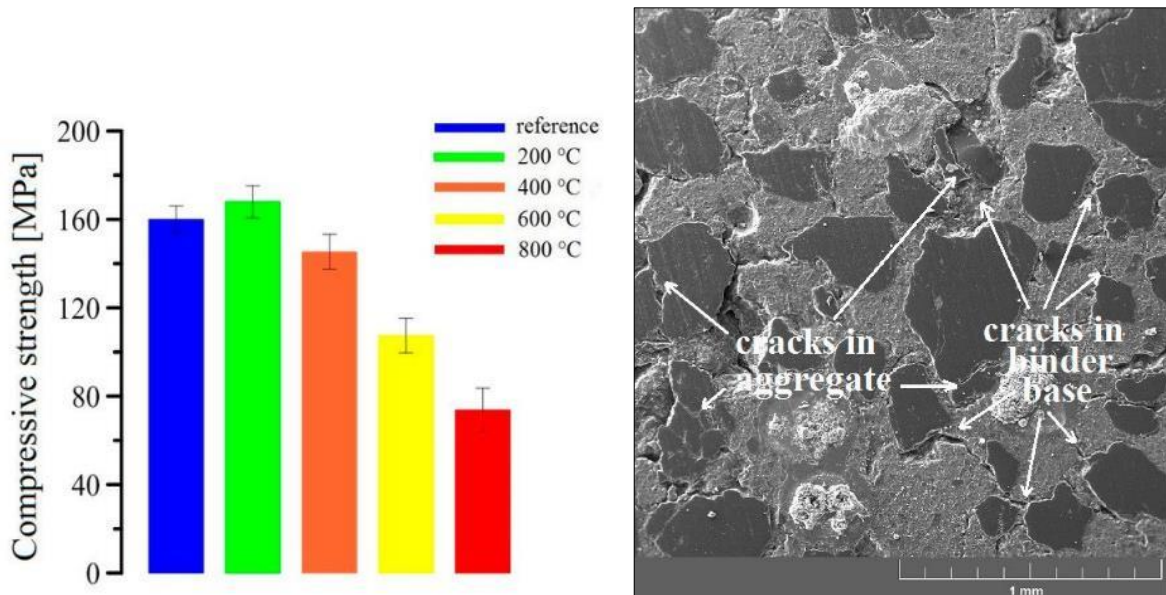
3.2.3 Vliv teploty na smyková napětí v soudržnosti

Teplota prostředí je důležitým faktorem, jenž ovlivňuje chování stavebních konstrukcí, a neméně důležité je její působení na pevnost UHPC a jeho soudržnost s ocelovou výztuží. Teplota prostředí a její účinky na konstrukce by proto měly být zohledňovány při návrhu železobetonových konstrukcí vystavených právě působení vysokých či nízkých teplot nejen z důvodu možného budoucího kolapsu konstrukce, ale také z důvodu zamezení vzniku nevratných poškození či poruch [89].

Příznivé parametry materiálu jako nízká permeabilita, nasákavost a celkově velmi vysoká homogenita jemnozrné směsi však mohou v některých situacích představovat vážné riziko. U betonových konstrukcí je toto riziko způsobeno vystavením konstrukce účinkům zvýšených teplot např. při požáru. Opačný případ nastává při vystavení konstrukce namáhání způsobeným cyklováním mraz/tepl. Při působení teplotních extrémů dochází v betonu k extrémnímu namáhání, které zejména u přirozeně vlhkého betonu vede až k explozivnímu odprýskávání (vysoké teploty) a poškození povrchových vrstev. V případě mrazu může docházet k narušení vnitřní mikrostruktury matrice [90].

Prvním z vlivů způsobujících destrukční projevy je teplotně-mechanický proces, při kterém je teplo způsobené extrémní teplotou přenášeno mezi jednotlivými komponenty matrice. Vzhledem k rozdílným teplotním roztažnostem pojivové složky a kameniva dochází k nerovnoměrné deformaci částí a k lokálnímu působení tahových sil v betonu. Tyto síly mohou mít za následek popraskání betonu [91]. Degradace je patrná na obr.49.

Dalším významnějším vlivem na poškození betonu vystaveného vysokým teplotám je teplotně-vlhkostní proces, při kterém dochází k přeměně vázané vody v betonu na páru. Struktura matrice UHPC vzhledem ke své nízké pórovitosti neposkytuje dostatek prostoru pro expanzi vodních par a extrémní tlak těchto vodních par tak má za následek zvýšení tahových napětí, odprýskávání a poškození materiálu (obr.50). Pro zvýšení odolnosti struktury UHPC proti vysokým teplotám je nutná aplikace vhodného typu a množství vláken. Výsledky výzkumného projektu GAČR 15-05791S „Analýza fyzikálních a chemických procesů při vysokoteplotním zatížení“ vysokohodnotných cementových kompozitů s hybridní vláknovou výztuží poukazují na optimální množství PVA a PP vláken vhodných pro vytvoření pórů pro expanzi vodních par.



Obr. 49 Degradace mech. fyzikálních parametrů a matrice v závislosti na teplotě [94]

Redukci trhlin a zlepšení materiálových parametrů lze docílit přidáním vhodného množství rozptýlené výztuže (ocel, sklo, kompozit). Aplikace různých druhů rozptýlené výztuže do betonu je v dnešní době již běžnou záležitostí, díky které lze docílit snížení smrštění a eliminaci případných trhlin. Pro různé aplikace se však druh a rozměr vláken liší. Smyslem kombinace vláken různých typů a vlastností lze zlepšit nejen mechanické vlastnosti ale i změnit strukturu matrice pro lepší odolnost betonu při působení vysokých teplot. Tato kapitola je doplněním předchozího výzkumného programu popisujícího mechanicko fyzikální vlastnosti HPC a UHPC vystaveného vysokým teplotám [92,93]. Extremní namáhání matrice se ukazuje jako velmi důležitý faktor ovlivňující nejen materiálové vlastnosti ale i trvanlivostní a odolnostní vlastnosti, které jsou u UHPC předností a je nutné je vhodně kvantifikovat.



Obr. 50 Vzorky UHPFRC vystavené vysokým teplotám

3.2.4 Problematika koroze výztuže a povlaků

V této části experimentů je hodnocen vliv tloušťky povlaku žárově stříkané formy mosazi na soudržnost hladkých prutů výztuže s betonem. V rámci experimentu byla hodnocena korozní stabilita povlaku s ohledem na úvodní korozní poškození vlivem alkalického pórového roztoku čerstvého betonu. Předmětem výzkumu bylo stanovení soudržnosti takto povlakované výztuže s betonem obvyklých mechanických vlastností (NSC) a s ultra-vysokohodnotným betonem (UHPC). Dále byla mikroskopicky zkoumána koroze povlaku výztuže a byl popsán její charakter a vliv na výslednou soudržnost. Z výsledků vyplývá, že korozní odolnost takto povlakované výztuže a její soudržnost souvisí s úvodní alkalitou čerstvého betonu obou druhů a dodatečnou alkalitou UHPC. Výsledky jsou diskutovány s ohledem na trend použití rozptýlené ocelové výztuže povlakované mosazí ve vysokohodnotných kompozitech.

Korozní vlivy žárově povlakované výztuže mosazí na soudržnost s betonem a UHPC

Koroze výztuže v betonu je stále nejzásadnějším korozním problémem současnosti, který limituje životnost železobetonových staveb. Obvyklá výztuž z uhlíkové oceli koroduje v čerstvém a tvrdnoucím betonu v pasivním stavu přijatelnou korozní rychlostí. Tato skutečnost je vyvolána především dostatečnou zásobou Ca(OH)_2 , který vzniká především hydratačními reakcemi silikátů, a udržuje pH pórového roztoku betonu nad hodnotou 12,6 (na zvyšování pH se podílí i malý obsah K_2O a Na_2O obsažených přímo v cementech). Takto vysoké pH zajišťuje korozi konvenční oceli právě v pasivním stavu [95].

Urychlení koroze výztuže betonu může být způsobeno celkem dvěma mechanismy nebo jejich kombinací. Přechod koroze oceli v betonu z pasivního do aktivního spojený se zvýšením korozní rychlosti je vyvolán karbonatací. Karbonatací rozumíme pozvolné snižování alkality pórového roztoku reakcí Ca(OH)_2 s plynným CO_2 (nebo jiných kyselých plynů např. SO_2 a NO_x) za vzniku uhličitanu vápenatého (či jiných solí). Zvýšení korozní rychlosti bez ohledu na přechod koroze výztuže z pasivního do aktivního stavu může vyvolat kontaminace betonu chloridovými anionty (např. z posypových solí, z mořské vody). Objemné korozní produkty oceli způsobují pnutí a odpadávání krycí vrstvy betonu a usnadňují dále korozní poškození výztuže [96].

Způsoby řešení tohoto korozního problému jsou mnohé, vzájemně se liší účinností a finanční náročností. Některé techniky velmi často nedosahují efektivní účinnosti (korozní inhibitory), jiné nelze použít univerzálně (katodická ochrana) a některé jsou často z finančního pohledu nepřijatelné (výztuže z korozivzdorných ocelí, výztuže z uhlíkových vláken případně z některých dalších nekovových materiálů).

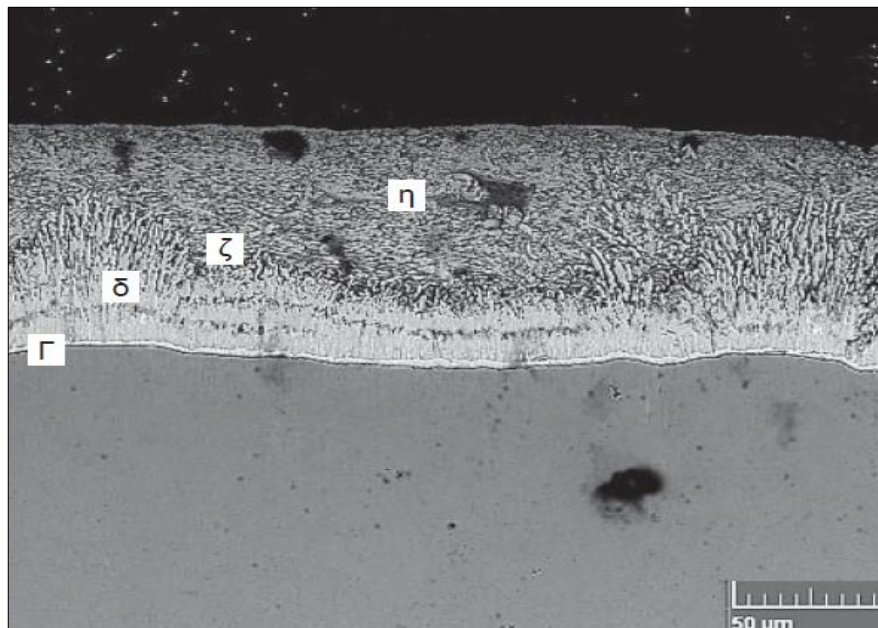
Z těchto pohledů mají slušný potenciál k přímé aplikaci povlaky na konvenční ocel. Vytvořené povlaky jsou univerzální ochranou za obvykle přijatelné finanční podmínky s prokazatelnou účinností. Ovšem i v tomto směru platí určitá omezení. Všechny povlaky pouze prodlužují dobu do aktivace podkladové oceli nebo dobu do lokalizace napadení povrchu oceli chloridovými anionty (Cl⁻).

Z ekonomického hlediska byly z pohledu aplikace do betonu testovány především dvě varianty povlaků – povlaky na organické bázi (především epoxidy) a povlaky vzniklé žárovým zinkováním. Bezdefektní organické povlaky nereagují s cementovým tmelem a zaručují skutečné prodloužení doby počátku korozního poškození podkladové oceli. U tohoto typu povlakované výztuže byla prokázána snížená soudržnost s betonem obvyklých mechanických vlastností. Sporadické je použití žárově zinkované výztuže v betonu. V silně alkalickém prostředí (pH ~ 13,0) koroduje zinek v aktivním stavu za vývoje vodíku, který může rovněž narušit soudržnost výztuže s betonem. Vzniklé krystalické korozní produkty zinku ($\text{Ca}[\text{Zn}(\text{OH})_3]_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) mohou také negativně ovlivňovat soudržnost takto povlakované výztuže s betonem [97].

V této části experimentálního výzkumu byla pozornost věnována soudržnosti výztuže opatřené povlakem mosazi nanesené konvenčním metalizačním způsobem. Byla studována soudržnost takto povlakované výztuže s betonem a následně i degradaci povlaku. Cílem práce bylo porovnání efektivity tohoto povlaku s důrazem na soudržnost v konvenčním betonu (NSC) a betonu UHPC. Výzkum v této oblasti je motivován v dnešní době častým použitím galvanicky mosazených ocelových drátků jako rozptýlené výztuže v cementokopozitních materiálech UHPC z hlediska zvýšení jejich protikorozní odolnosti.

Korozní vlivy žárově povlakované výztuže zinkem na soudržnost s betonem a UHPC

Dalším způsobem ochrany běžné betonářské oceli je její žárové zinkování. Vhodnost povlaků žárového zinku do prostředí čerstvého a tvrdnoucího betonu je ale diskutabilní. Někteří odborníci tvrdí, že povlaky žárového zinku jsou díky svým výhodám oproti uhlíkové oceli v užití do betonu opodstatněné [98,99]. Z dalších výzkumů lze vyčíst, že odolnost žárového povlaku v alkalickém prostředí pórového roztoku betonu může být omezená a navíc s jeho použitím hrozí reálné riziko ztráty soudržnosti mezi výztuží a betonem. Mezi výhody zinku (oproti uhlíkové oceli) patří především jeho vyšší odolnost vůči působení chloridů (2-4×), galvanický účinek v případě porušení celistvosti povlaku a vznik méně objemných korozních produktů, neomezujících svým růstem stabilitu krycí vrstvy betonu. Další významnou výhodou je odolnost zinkované výztuže vůči karbonataci betonu (přibližně do pH 7). Mezi diskutabilní výhody povlaku patří schopnost jeho korozních produktů snadno difundovat od výztuže do cementového tmelu a v rozsahu pH 12,6-13,3 se pasivovat odolnou a kompaktní vrstvou snižující korozní rychlost. Na korozní chování zinkované výztuže v alkalickém prostředí má významný vliv struktura povlaku žárového zinku. Žárové zinkování patří mezi ponorové povlakovací techniky, kdy se na povrchu nelegované oceli ponořením do lázně roztaveného zinku (teplota přibližně 460 °C) vylučuje slitinový difúzní povlak Fe-Zn. Obsah železa ve slitinovém povlaku klesá směrem k vnějšímu povrchu. Typické složení fází povlaku je patrné z obr.51. [100]

**Obr. 51** Rozložení fází povlaku zinku [100]

V dostupné literatuře popisující korozní chování žárově zinkované výztuže v betonu bylo ukázáno, že povlak koroduje v tomto prostředí v aktivním stavu za vývoje plynného vodíku, který je produktem redukce vody. Transport vodíku od výztuže je komplikován tuhoucím cementovým tmelem. Bubliny vodíky jsou v něm zadržovány, což vede k nárůstu pórovitosti cementového tmelu na fázovém rozhraní výztuž/beton. Bylo prokázáno, že později dochází k přechodu zinku do pasivního stavu. Tato skutečnost již ale nemá na pórovitost ztuhlého cementového tmelu vliv. Protože se předpokládá, že soudržnost obou materiálů je dána adhezními vlastnostmi cementového kamene, lze očekávat, že zvýšení pórovitosti cementového kamene povede ke snížení styčné plochy mezi cementovým kamenem a výztuží. Snížení styčné plochy mezi oběma materiály může vést ke ztrátě jejich soudržnosti. Tato skutečnost byly v práci zkoumána z hlediska porovnání soudržností povlakované výztuže z UHPC a s běžným betonem.

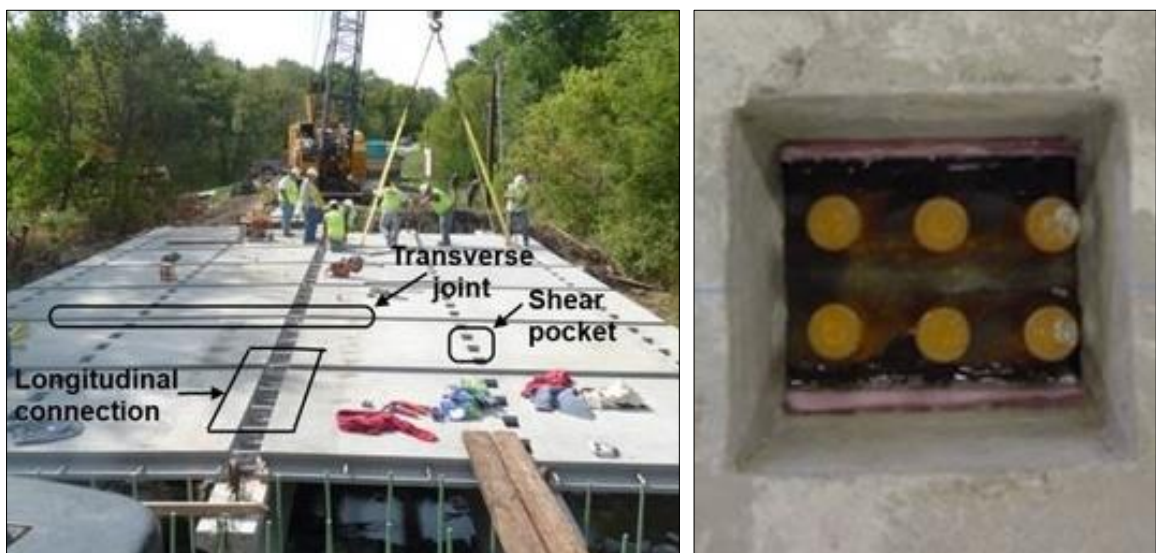
Vliv protikorozní ochrany na soudržnost předpínací výztuže

V rámci popisu významných vlivů na soudržnost byl také zkoumán vliv protikorozní ochrany ocelové předpínací výztuže na její soudržnost s UHPC. Pro názorné srovnání byl také byl popsán rozdíl mezi soudržnosti UHPC a betonem C45/55. U předpínaných konstrukcí se obvykle se předpokládá, že předpínací výztuž má určitou soudržnost s injektážní maltou a následně s betonem konstrukce. Z těchto předpokladů se vychází při stanovení napětí v předpínací výztuži v provozních stavech i v mezních stavech únosnosti. Běžně není povrch předpínací výztuže (předpínacích lan) nijak upravován [101]. Po instalaci předpínacích lan do kabelových kanálků se konstrukce předepe a do dvou týdnů by se kanálky měly zainjektovat, aby během doby po instalaci do doby injektáže nedošlo ke korozi lan. V případě zimních období může nastat situace, že konstrukce promrzne a není možné kanálky včas zainjektovat. Proto se v zimním období opatřují předpínací lana ochranným nátěrem, který zajistí ochranu předpínací výztuže před korozi po dobu v řádu měsíců. V takovém případě není nutné s injektáží pospíchat, lze počkat, až teploty vystoupají nad minimální požadované teploty a konstrukce se ohřeje a pak injektáž provést. Ochranné nátěry však snižují soudržnost předpínací výztuže s betonem, resp. s injektážní maltou. Přestože se ochranné nátěry používají již řadu let a nikdy nebyly zjištěny žádné problémy, není zcela jasné, jaký dopad má snížení soudržnosti na působení konstrukcí v mezních stavech. V případě výzkumu nového materiálu a jeho možností lze předpokládat v extrémních případech protikorozní opatření předem předpjatých konstrukcí [102].

3.3 SPOJE A SPŘAŽENÍ PREFABRIKOVANÝCH KONSTRUKCÍ POMOCÍ UHPC

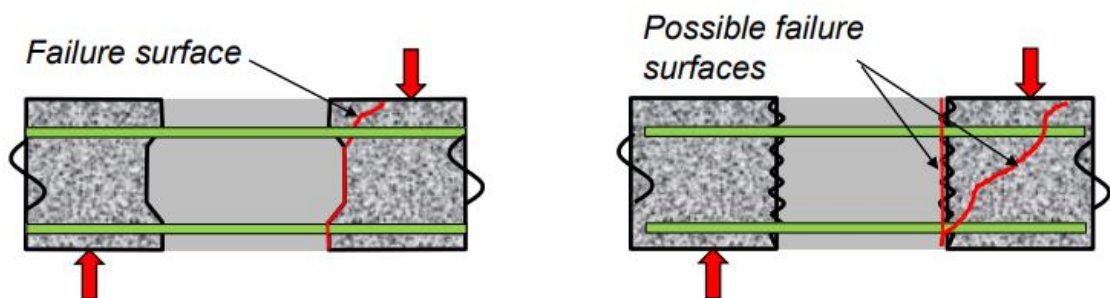
Výrazné snížení kotevní délky výztuže potřebné ke spolehlivému přenesení napětí z výztuže do betonu má za následek velmi výraznou úsporu v případě rozměrů spojů prefabrikovaných dílců využívajících UHPC jako spojovacího materiálu. Efektivita UHPC spojů je dána zmenšením insitu betonovaného množství materiálu, rychlost výstavby a vysoká trvanlivost detailů [103].

Jako nejčastější způsob využití těchto spojů mohou být uvedeny spoje prefabrikovaných desek spřaženého mostu. Spoje prefabrikované desky spřaženého mostu mají různá uspořádání, tvary a rozměry. Podélné spoje bývají většinou umístěny nad podporujícími nosníky, případně se může jednat o spoje mimo nosníky (spoje T nosníků apod.). V těchto spojkách figuruje primárně namáhání ohybem. Tento ohybový moment musí být spolehlivě přenesen zejména v místě spoje. V případě že se jedná o podélný spoj nad nosníkem musí být součástí spoje i spřažení. Ve spoji jsou pak současně umístěny i kromě výztuže spřahovací prvky. Z realizací ve světě se ukazuje že není nutné, aby nad každým nosníkem byl spoj dvou desek – prefabrikovaná deska může být kontinuální, širší, než je vzdálenost nosníků. Spřahovací prvky pak mohou a musí být umístěny jen lokálně. V prefabrikovaných deskách jsou při výrobě ponechány otvory (kapsy), které se po montáži mostovky zabetonují pomocí UHPC [105]. V těchto kapsách jsou pak koncentrovány spřahovací prostředky navržené tak, aby nahradily kontinuální spřažení (obr. 52).



Obr. 52 Popis druhu spojů na konstrukci (vlevo) a smyková kapsa s trny (vpravo) [105]

Příčné spoje probíhají kolmo na směr nosníků, jsou namáhány excentrickým tlakem, popř. tahem dle jejich umístění v podélném směru mostu. Při návrhu spojů se vychází z principu, že spoj musí zajistit kvalitní přenos tahových, tlakových a smykových sil. Ve spoji je stykována výztuž ze sousedních prvků. Její ukotvení (kotevní délka výztuže) ve spoji musí být dimenzováno tak, aby očekávané síly byly spolehlivě přeneseny a to při jednorázovém i opakovaném zatížení s přihlédnutím k tomu, že část zatížení působí dlouhodobě. Podélné a příčné spoje musí zajistit bezproblémový kontinuuální přenos sil a momentů. Správné nadimenzování spoje z hlediska výztuže není jediným faktorem způsobující případnou poruchu spoje.



Obr. 53 Typy úpravy prefabrikovaných dílců ve spoji a možné typy poruch [107]

V případě vytvoření nevhodného smykového ozubu, špatnému ošetření povrchu stykovaných ploch prefabrikátů či nedostatečné krycí vrstvě betonu prefabrikátů může docházet u běžného betonu k odlomení viz obr.53.

Spolehlivý přenos sil úzce souvisí se soudržností výztuže a UHPC, která byla popisována v předcházejícím odstavci. Na základě experimentů popsanych v zahraničních dokumentech (zejména USA) [103] lze zatím konzervativně doporučit s ohledem na uvažované způsoby namáhání délku přesahů výztuže vystupující z prefabrikovaných dílců cca 10 průměrů prutu. Výzkumy a jejich doporučení vycházejí z testování řady UHPC materiálů, převážně produktu Ductal. Obecné charakteristiky materiálu lze vstáhnout i na jiné produkty, jak již bylo zmíněno v úvodní části této práce, tak variabilita UHPC může být a je velmi vysoká. Rozptyl výchozích hodnot až už materiálových vlastností tak i technologických parametrů je velký. Dokud nedojde ke sjednocení návrhových, technologických a výrobních parametrů je nutné některé z parametrů experimentálně ověřovat [106].

Jedním z těchto parametrů je řešená kotevní délka výztuže ve spoji a její vzájemné vzdálenosti a případně zakončení. Z dosavadních výzkumů se ukazuje, že lze ve spoji navrhnout výztuž pouze s přesahem bez ohybů a hlav jako v případě spřahovacích trnů.

Napětí je přenášeno pouze soudržností (při uvážení všech složek). V případě nedostatečné kotevní délky při ohybu může docházet k vylomení namáhané části spoje či tvorbě trhlin respektující polohu konce výztuží. Charakter porušení je patrný z následujících obr.54 a 55.

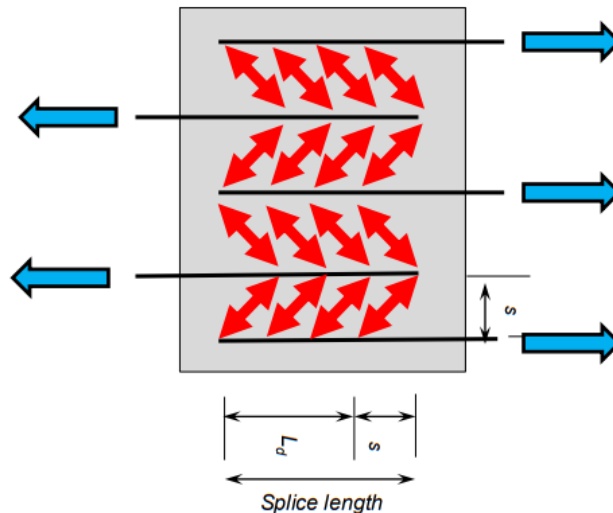


Obr. 54 Typické poškození horního povrchu v případě nedostatečné kotevní délky [107]



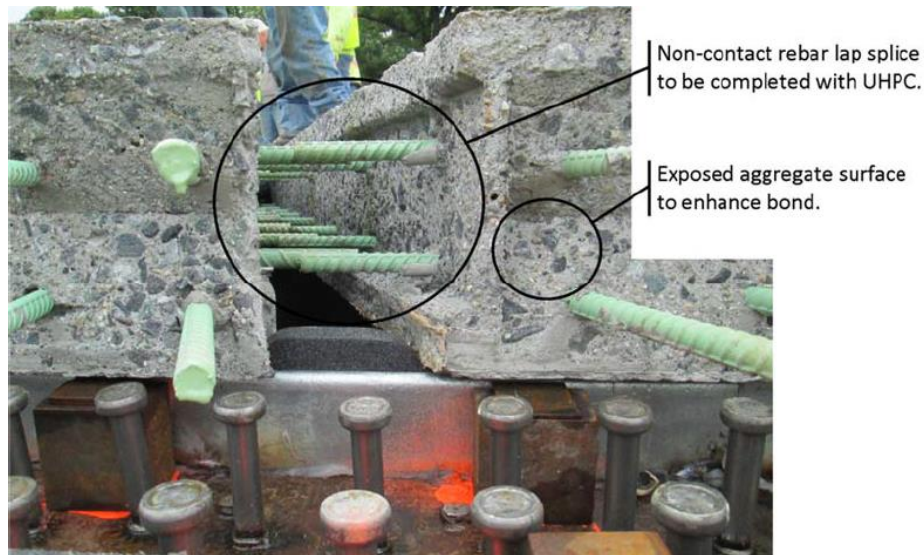
Obr. 55 Typické poškození horního povrchu v případě nedostatečné kotevní délky [107]

Vhodné navržení kotevní délky výztuže ve spoji závisí mimo jiné i na rozložení výztuží ve spoji a jejich vzájemných vzdálenostech (Obr.56). Tato vzdálenost se musí zohlednit při návrhu prefabrikovaných dílců a v nutných případech je nutné v místě spoje doplnění dodatečné výztuže tak, aby byly splněny předpoklady pro dokonalý přenos sil. Při nevhodně zvolené rozteči mezi výztužemi nemusí být zaručen kontinuální přenos zatížení. Různými typy zkoušek spojů se bohatě zabýval Graybeal v rámci řešení metodik pro navrhování a aplikaci UHPC spojů v USA. Metodika shrnuje uvažované materiálové parametry, použité druhy výztuží a je pomůckou při návrhu typických spojů. Z dokumentu lze čerpat zkušenosti a návaznosti v základní rovině – pro specifikaci a návrh konkrétní situace je nutné doověření vlastností experimentálně.



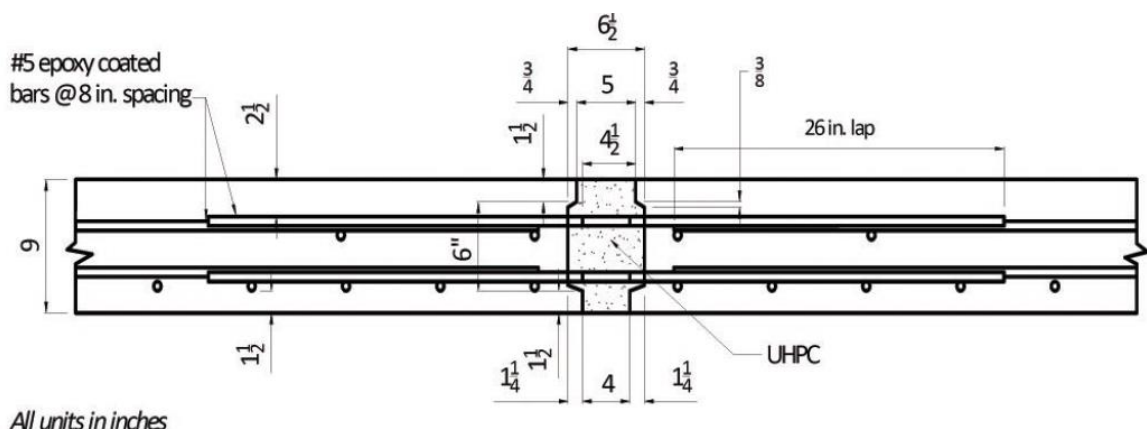
Obr. 56 Optimální rozložení výztuže s upřesněním kotevní délky

Pro spolehlivé spolupůsobení betonu prefabrikovaných částí a spoje z UHPC je důležitá i soudržnost obou betonů. Všeobecně je soudržnost povrchů běžný beton/UHPC nebo UHPC/UHPC v případě pracovních spár vzhledem k jemnozrnnosti matrice UHPC dobrá. Nízký vodní součinitel způsobuje dodatečnou adhezi materiálu – UHPC natahuje vodu z okolního betonu. U spojů je ale dbáno na co nejkvalitnější provedení a zvýšení soudržnosti tak, aby nedocházelo k vzniku trhlin na rozhraní betonů a následnému průniku vlhkosti a chloridů k výztuži. I z tohoto hlediska prevence a trvanlivosti je například v USA výhradně používána výztuž s povlakem. Zvýšení soudržnosti betonu se dá zajistit například otryskáním kontaktních ploch prefabrikátů tak, aby na jejich povrchu vystupovala čistá zrna kameniva neznečištěná cementovým tmelem. Další již zmiňovanou variantou je použití zpomalovače tuhnutí na bednění a vymytí čelních ploch prefabrikátů od cementového mléka (obr. 57). V případě použití povlakované výztuže se jedná o často jediný způsob. Dodatečné otryskání lze použít v případě nepovlakovaných výztuží, kdy nemůže dojít k poškození protikorozní ochrany výztuže. Na obr. 57 je ukázán spoj s povlakovanou výztuží, která je v USA pro dané spoje podmínkou a vysokou krycí vrstvou horní výztuže. Uváděné konkrétní případy spojů jsou navrhovány na mosty s přímo pojížděnou betonovou mostovkou bez vozovky a izolace. Dodatečným frézováním vrchní vrstvy mostovky dojde zabroušení případných vystupujících drátků.



Obr. 57 Spoj prefabrikovaných desek, otryskání povrchu styčných ploch [103]

Spoje se mohou vyskytovat v několika variantách. Základní rozdělení spojů lze definovat z hlediska namáhání a funkce spoje. Příčné spoje prefabrikátů musí přenášet ohybová namáhání a smyk. Podélné spoje mimo nosníky jsou v tomto případě namáhání obdobné. U spojů nad nosníky je nutné ve spoji realizovat i spřažení. To může být kontinuální, lokální ve spřahovacích kapsách a nebo kombinací těchto variant. Charakteristikou těchto spojů je velká hustota at už výztuží tak i spřahovacích prvků. Spoje jsou optimalizované tak aby množství UHPC bylo omezeno na nutné minimum. Jeho samozhutnitelné vlastnosti a vysoká konzistence umožňují zaplnění velmi složitých detailů a dokonalé vyplnění prostoru. Příklad základního příčného spoje dvou prefabrikátů je možné nalézt na mostě I-81 v Syracuse, USA. Spoj je schematicky znázorněn na obr.58.

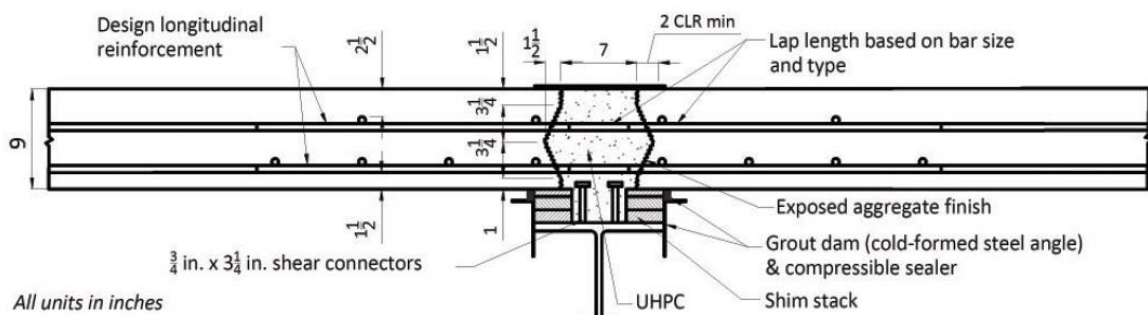


Obr. 58 Detail otevřeného spřažení [103]



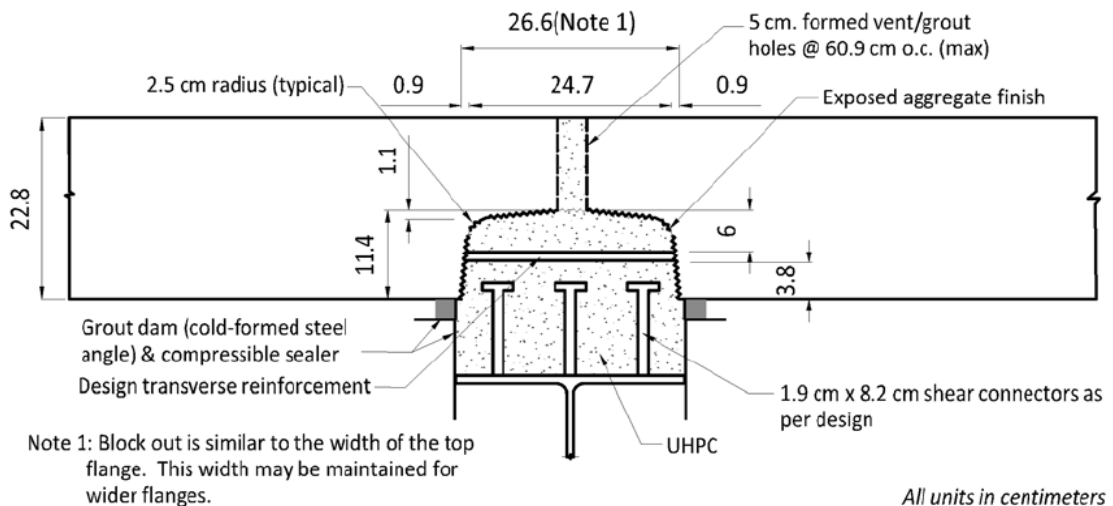
Obr. 59 Detail otevřeného spřažení [104]

V spojích nad nosníky jsou umístěny spřahovací elementy. V USA a Kanadě jsou běžně užívány ocelové trny, které jsou standardem i u spřažených konstrukcí s monolitickými deskami u nás. Na první pohled je zřejmé, že jde o řešení, které vychází z tradice a není modifikováno s ohledem na kvalitativně vyšší vlastnosti UHPC. Spřahovací trny jsou optimálně navrženy tak, aby jejich únosnost v betonu i únosnost připojení k ocelovému nosníku, byly přibližně stejné. Pokud takový trn je zabetonován do UHPC silně vzroste únosnost jeho zakotvení v betonu, zatímco únosnost připojení k oceli zůstane stejná. Pro aplikaci v UHPC by proto bylo vhodné navrhovat trny, které by byly kratší, ale aby se navýšila únosnost připojení k ocelovému nosníku, měl by být jejich průměr větší. Takové trny nejsou, alespoň u nás, běžně k dispozici. Pro optimalizaci spřažení lze proto jako alternativní řešení doporučit spřahovací lišty, které se vyrábějí individuálně a lze je proto nadimenzovat dle konkrétních parametrů konstrukce a pevnosti použitých materiálů. Typický řez podélným spojem s optimalizovaným rozměrem spřahovacích trnů je patrný na obr.59 a 60 Spoj byl využit mimo jiné také na konstrukci mostu I-81 v Syracuse, USA. Za povšimnutí stojí výškové uspořádání právě spřahovacích prostředků, které nezasahují výškově do výztuže mostovky. Tímto je zajištěno dokonalého probetonování vysoce vyztuženého detailu a spolehlivého přenesení namáhání.



Obr. 60 Detail otevřeného spřažení [103]

Konstrukční uspořádání spojů nad nosníkem se spřahovacími trny uvádí přímo směrnice USA např. dle obr. 61. Obrázek 62 ukazuje obdobný případ, kdy prefabrikovaná deska není nad nosníkem dělena a je kontinuální. Má plnicí otvor pro betonáž spoje a příčná výztuž probíhá souvisle přes spoj. Vyšší poloha prefabrikované desky umožňuje zamezit kolizi spodní výztuže desky a spřahovacích trnů. Prefabrikované desky jsou položeny přes pružnou těsnicí podložku na ocelové úhelníky, které zároveň tvoří bednění spoje nad ocelovým nosníkem. Uspořádání je patrné též z obr. 1, kde je možné vidět ocelové úhelníky.

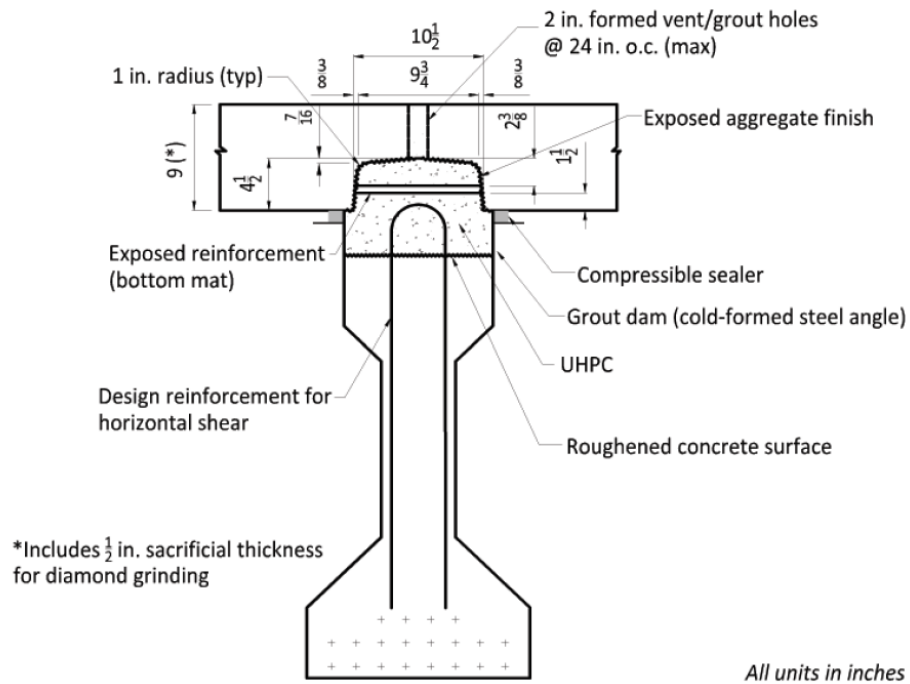


Obr. 61 Příklad spoje s trny dle směrnice USA [103]



Obr. 62 Detail skrytého spřažení [104]

Spřažení lze možné realizovat i mezi například předpřaženými vazníky. Spřahovacím prvkem je poté zpravidla výztuž vycházející z nosníku a výškově je oddělena od pvýztuže prafabrikátů jako v předchozím případě. Takovýto typ spřažení je patrný na obr.63.



Obr. 63 Spřažení předpjatého betonového vazníku s prefabrikovanou mostovkou [103]

Betonáž spojů je vidět na obr. 64. Používá se samozhutnitelný UHPC, který se obvykle míchá na stavbě z prefabrikované směsi dodané v suchém stavu na stavbu, kde se pouze smíchá s vodou a superplastifikátory. Při aplikaci na přímo pojížděnou mostovku je spoj či spřahovací kapsa o cca 1-2 cm přebetonována (obr.64 vlevo) a následně zabroušena tak, aby se dosáhlo rovného povrchu pojížděné plochy a aby byla odstraněná horní vrstva UHPC obsahující bubliny a póry [109]. Ve většině aplikací není směs dodatečně vibrována, a i z tohoto důvodu dochází k postupnému pronikání vzruchu skrz matici před zatuhnutím.



Obr. 64 Betonáž spojů s UHPC vlevo, čerpání UHPC pumpou vpravo [109,110]

Tato horní vrstva může mít při nezabroušení negativní vliv na nerovnosti ve vozovce a hrozí vyčnívání drátků. Při samotné realizaci spojů je nutné řešit i problémy vzniklé například s kontinuitou betonáže, navazováním pracovních spár, betonáží nakloněných úseků či protékáním spojů. Problém netěsnosti bednění ve spoji či spřažení je zobrazen na obr.65 je patrné, že vysoká tekutost materiálu a jemnozrnost v tomto případě způsobila postupný úbytek materiálu ve spoji a spřahovacích kapsách.



Obr. 65 Detail spoje a spřahovací kapsy při netěsnosti bednění [110]

UHPC je charakteristické tím, že pokud je směs v pohybu lze s ní relativně dlouho pracovat. Proto u menších mostů se spoji lze pomocí kontinuální betonáže zaplnit všechny spoje a zajistit tak homogenitu materiálu. Pokud nelze všechny spoje zalít v jednom taktu je nutné vytvořit pracovní spáru. Ta je v případě, pokud to lze, doporučována řešit pozvolným náběhem vrstvy a následným dobetonováním nové vrstvy na stávající tak aby nevznikla příčná spára. Materiál svoji perfektní přilnavostí a soudržností zajistí spojení těchto vrstev.

Betonáž spojů ve spádu je řešena postupným zakrýváním zabetonovaných částí. Ukládání je tak zpravidla řešeno od nejnižšího bodu po nejvyšší. Pro zajištění stálého hydrostatického tlaku jsou průběžně na plnicích otvorech umístěny nádoby s materiálem tak aby bylo zajištěno tlaku a byl signalizován problém s netěsností či protékáním bednění.

Kontinuita betonáže je řešena zpravidla mobilními míchacími centry v místě stavby. Suchá pytlovaná směs se střídavě míchá a dopravuje pomocí mobilních podavačů přímo na místo určení. Množství materiálu je maximálně optimalizováno a navrženo, aby byl proces na staveništi co nejvíce časově efektivní. Pro usnadnění transportu byla směs na některých větších stavbách upravena tak aby byla čerpatelná. První čerpání UHPC bylo použito při stavbě mostu Pulaski Skyway v USA (Obr. 64 vpravo).

Jako příklad nejvýznamnějšího projektu s využitím UHPC spojů je zde uveden právě Pulaski Skyway (obr.66). Tento 3,5 mil dlouhý most je kritickou součástí dopravní silniční infrastruktury v severním New Jersey. V roce 2012 u něj započal projekt kompletní výměny mostovky. Hlavním problémem této stavby byla nemožnost kompletního uzavření provozu na mostě kvůli velmi silnému provozu. Dalším požadavkem bylo zajištění trvanlivosti a omezení větších oprav a zásahů po dobu následujících 75 let. Aby bylo možné splnit přísná kritéria byla stávající mostovka nahrazena prefabrikovanými betonovými deskami spojenými s UHPC. Tento systém umožnil minimalizaci času potřebného k vytvoření mostovky a maximalizoval její kvalitu. Volba UHPC pro jako spojovacího materiálu prefabrikovaných desek učinilo ze spoje nejsilnější a nejodolnější část mostovky.



Obr. 66 Pulaski bridge [112]

UHPC je na mostě použito ve třech typických místech. Prvním jsou úzké příčné spoje prefabrikátů mostovky. Spoje u běžných mostovkových panelů jsou široké 200 mm. Spoje mezi speciálními vylehčenými panely mají šířku 250 mm. Druhým místem bylo spřažení mostovky s ocelovým roštěm pomocí diskretních spřahovacích kapes. Třetím umístěním UHPC je podélné spojení mezi jižní a severní mostovkou pod střední bariérou. Dvě nové poloviny mostovky byly spojeny plnou deskou z UHPC 0,9 m širokou. Typické spoje a stavební proces je patrný z obrázků 67 a 68.



Obr. 67 Pulaski bridge – spoje připravené na dobetonování [111]



Obr. 68 Pulaski bridge – příklad prefabrikované mostovky s UHPC spoji [112]

Výměna mostovky Pulaski Skyway je dosud největším využitím UHPC na jediném projektu v Severní Americe, na kterém bylo využito více než 3800 kubických metrů UHPC. Přes několik drobných překážek vyplývajících z původního způsobu přepravy čerstvě namíchaného materiálu byl UHPC úspěšně použit za celoročních podmínek k připojení téměř jednoho milionu čtverečních stop prefabrikovaných panelů mostovky. V projektu se očekává se, že UHPC bude v příštích 75 letech významně přispívat k minimalizaci nebo dokonce k eliminaci jakékoli potřeby údržby mostovky.

V ČR není zatím využito UHPC pro spřažení ani spoje v žádné realizované mostní konstrukci.

4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST - SOUDRŽNOST A SPŘAŽENÍ UHPC S OCELÍ

Disertační práce je řešena primárně jako experimentální analýza problému doplněná dílčími teoretickými rozbory a komentáři. Experimentální část této práce je rozdělena do několika kapitol popisující obecné poznatky ze zkoušek soudržnosti výztuže a UHPC, srovnání naměřených hodnot se soudržností běžného betonu s výztuží, jednotlivými faktory ovlivňující soudržnost jako je teplotní namáhání, protikorozi ochrany a další. Výzkum v oblasti soudržnosti vede k experimentálnímu ověření chování optimalizovaných příčných spojů prefabrikátů reprezentující mostovku ocelobetonového mostu. Závěr práce je věnován ověření chování podélného spoje spřaženého ocelobetonového mostu s využitím ověřené inovativní spřahovací lišty. Uvedené experimenty poskytují ucelený pohled na využití vynikajících vlastností UHPC v soudržnosti a spřažení s ocelí a rozšiřují dosavadní znalosti v této oblasti použití.

- **Analýza soudržnosti betonářské výztuže a UHPC**
- **Analýza soudržnosti předpínací výztuže a UHPC**
- **Korozi vlivy na soudržnost výztuže a UHPC**
- **Analýza funkce příčného UHPC spoje**
- **Analýza spřažení nosníku pomocí UHPC a spřahovací lišty**
- **Spřažené ocelobetonové nosníky s podélným UHPC spojem**

V experimentech byly použity dva typy směsí UHPC a to směs TBG Metrostav a směs vyvinutá v KÚ. Směs KÚ byla popsána v tab.1. Do směsi byla přidávána ve všech případech rozptýlená ocelová výztuž 1,5% (KU) a 2% objemu (TBG). U jednotlivých částí experimentů jsou uvedeny detailnější charakterizace materiálu jak UHPC tak případně běžných betonů, ale pro obecné shrnutí je možné popsat materiál takto:

- Pevnost v tlaku na krychlích 100 mm: **144-154 MPa (KU), 148 -161 MPa (TBG)**
- Pevnost v tlaku na válcích 150/300 mm: **137-145 MPa (KU), 145-153 MPa (TBG)**
- Pevnost v tlaku na zlom. trám, 40x40x160 mm: **155-160 MPa (KU), 154-167 MPa (TBG)**
- Pevnost v tahu za ohybu na trám. 40x40x160 mm: **23-28 MPa (KU), 24-31 MPa (TBG)**
- Modul pružnosti na válcích 150x300 mm: **48-50 GPa (KU), 42-45 GPa (TBG)**
- Objemová hmotnost: **2450-2480 kg/m³ (KU), 2480-2530 kg/m³ (TBG)**

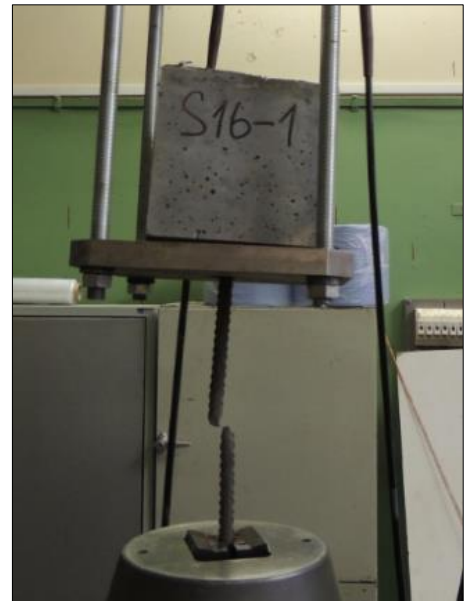
4.1 ANALÝZA SOUDRŽNOSTI BETONÁŘSKÉ VÝZTUŽE A UHPC

4.1.1 Stanovení soudržnosti UHPC a betonářské výztuže různých průměrů

V úvodních částech experimentálního programu byla zkoumána soudržnost UHPC a betonářské výztuže různých průměrů, konkrétně výztuže $\varnothing 12$ mm, $\varnothing 16$ mm a $\varnothing 20$ mm. Vzhledem k faktu, že UHPC je materiál, který není zatím popsán v žádné národní normě či doporučení, podle kterého by se soudržnost zkoušela, bylo nutné důkladně zvážit a vybrat vhodnou metodu pro provedení zkoušky. Pro tento účel byl vybrán pull-out test respektující předpis RILEM RC6 – kotevní délka výztuže byla rovna 5x průměr zkoušené výztuže. Motivací experimentu bylo zároveň postihnout rozdíl mezi smykovým napětím v soudržnosti UHPC a běžného betonu při zachování stejného uspořádání zkoušky. V rámci experimentu byly vyrobeny a odzkoušeny vzorky z UHPC s různým průměrem betonářské výztuže a následně byly provedeny stejné zkoušky na vzorcích z betonu třídy C30/37. Výsledky jsou prezentovány v přehledném grafu 3.

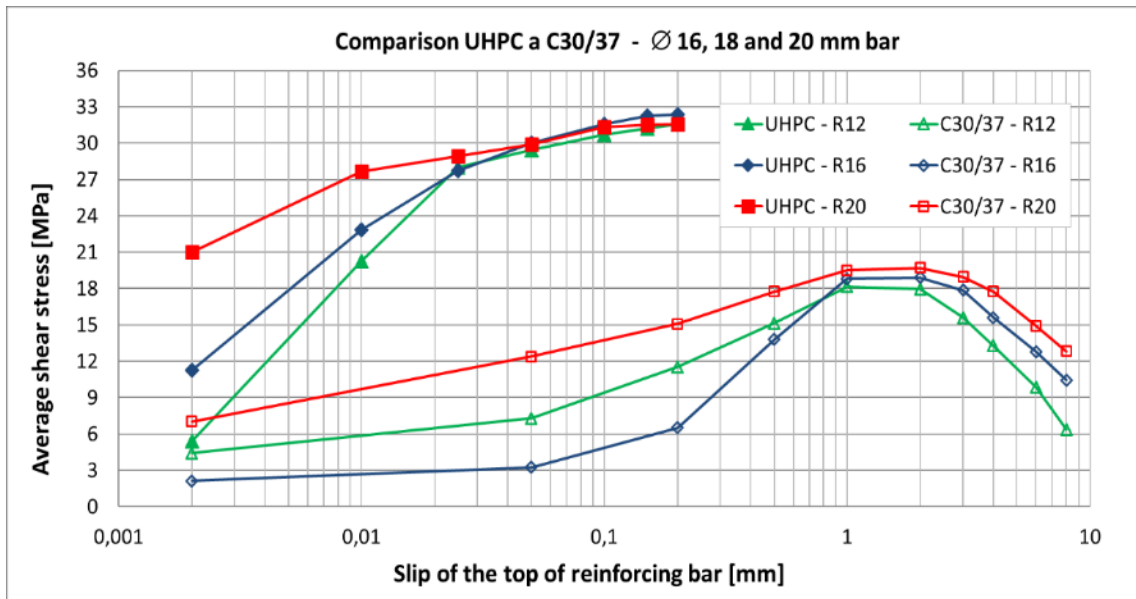


Obr. 69 Formy s výztuží před betonáží



Obr. 70 Přetržení výztuže

Zásadní rozdíl byl v charakteru porušení vzorku. U vzorků z UHPC došlo u všech průměrů výztuže k porušení právě ve výztuži dosažením meze pevnosti oceli (obr. 70). Oproti tomu ze vzorků z betonu C30/37 byla výztuž vytažena. Poznatkem z experimentálních zkoušek byl výsledek naddimenzované kotevní délky v případě uvažování UHPC.



Graf 3 Graf průměrného smykového napětí - UHPC a beton C30/37 (kotevní délka $5\varnothing$)

V případě běžného betonu C30/37 bylo dosaženo prakticky shodné smykové napětí v soudržnosti u jednotlivě zkoušených průměrů a ověřeno, že v případě porušení vzorku porušením výztuže je napětí shodné a nezávislé na průměru výztuže. V případě betonu C30/37 se hodnoty maximálního napětí v soudržnosti pohybují v rozmezí 18-19 MPa. U všech vzorků z běžného betonu byl pozorován charakter porušení v soudržnosti a vytržení horního kuželu betonu.

$$\tau_m = \frac{P_m}{a \times o} = \frac{f_y \times A}{5 \times \pi \times D^2} = \frac{f_y \times \pi \times D^2}{4 \times 5 \times \pi \times D^2} = \frac{f_y}{20}$$

číslo rovnice

kde **P_m** je síla při vytahování

a je kotevní délka výztuže

o je obvod výztuže

f_y je mez kluzu výztuže

D je průměr výztuže

4.1.2 Optimalizace kotevní délky betonářské výztuže a UHPC

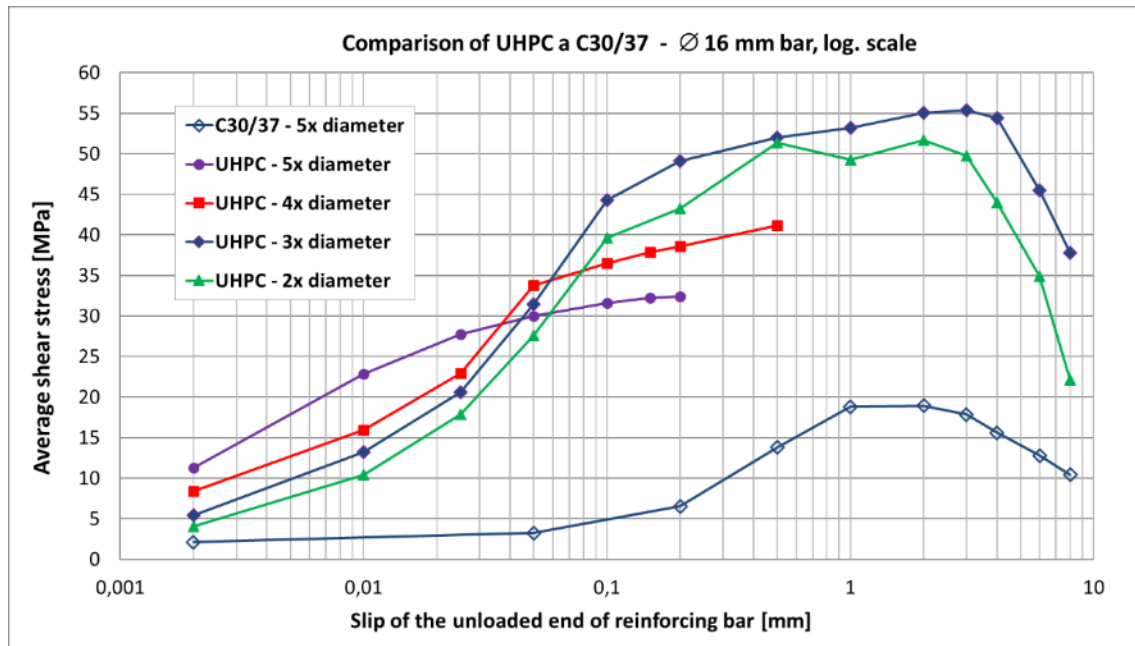
Účelem následujícího experimentu bylo zjistit a porovnat hodnoty průměrného smykového napětí mezi UHPC a betonářskou výztuží $\varnothing 16\text{mm}$ o různé kotevní délce. V předcházejícím experimentu nedošlo při kotevní délce výztuže rovné $5\varnothing$ výztuže k jejímu vytažení – porušení v soudržnosti. Došlo k porušení výztuže překročením meze tahu a pevnosti. Z tohoto důvodu byla v druhé části experimentu kotevní délka zmenšena postupně na $4\varnothing$, $3\varnothing$ a $2\varnothing$ výztuže. Cílem zkoušek bylo zjistit, při jaké kotevní délce výztuže dojde k rovnováze mezi smykovým napětím v soudržnosti a mezí kluzu/pevnosti oceli. Cílem experimentu bylo také vyhodnocení charakteru porušení vzorku.

Součástí zkoušky bylo i porovnání vlivu směru betonáže – ukládání UHPC vzhledem k možné segregaci a usměrnění rozptýlené výztuže. Vzorky byly betonovány tak, že výztuž byla umístěna ve formě vodorovně (obr.71) oproti předchozím zkouškám kde výztuž procházela formou svisle (obr.69).

Přehled průměrných hodnot smykových napětí u vzorků z UHPC a jejich vzájemné srovnání s předchozí částí experimentu názorně zobrazuje následující graf 4.



Obr. 71 Formy s připravenou výztuží



Graf 4 Graf závislosti průměrných smykových napětí na posunu horního konce výztuže

Dílčí závěr

V rámci experimentů byly porovnány soudržnosti betonářské výztuže s dvěma rozdílnými materiály: UHPC a betonem C30/37. Při zkoušce vytrháváním výztuže z krychle UHPC o hraně 200 mm (pull-out test) došlo při kotevní délce rovné $5\varnothing$ a $4\varnothing$ k dosažení meze pevnosti oceli bez výrazného pokluzu horního konce výztuže. U vzorků s kotevní délkou $3\varnothing$ došlo k dosažení meze kluzu oceli a k následnému vytažení výztuže – porušení v soudržnosti. Výztuž soudržná v délce $2\varnothing$ nedosáhla hodnot mezních napětí ve výztuži na mezi kluzu a byla z krychle vytažena – tahová síla v oceli byla příčinou překročení hodnoty smykového napětí v soudržnosti. U betonu C30/37 dojde při zakotvení na délku $5\varnothing$ vždy k vytažení výztuže z betonu.

Největší hodnoty průměrného smykového napětí v soudržnosti byly zjištěny u vzorků UHPC s výztuží soudržnou v délce $3\varnothing$. Při této hodnotě bylo dosaženo největšího poměru mezi tahovou silou, která se blížila mezi pevnosti oceli a obetonované ploše betonářské výztuže. Pro srovnání s výzkumy v zahraničí lze aplikovat následující graf obsahující hodnoty rozložení závislosti průměrů redukovaného smykového napětí na kotevní délce u různých průměrů výztuže:

V případě provedených experimentů lze uvažovat hodnoty pro kotevní délku 2 a 3 průměrů:

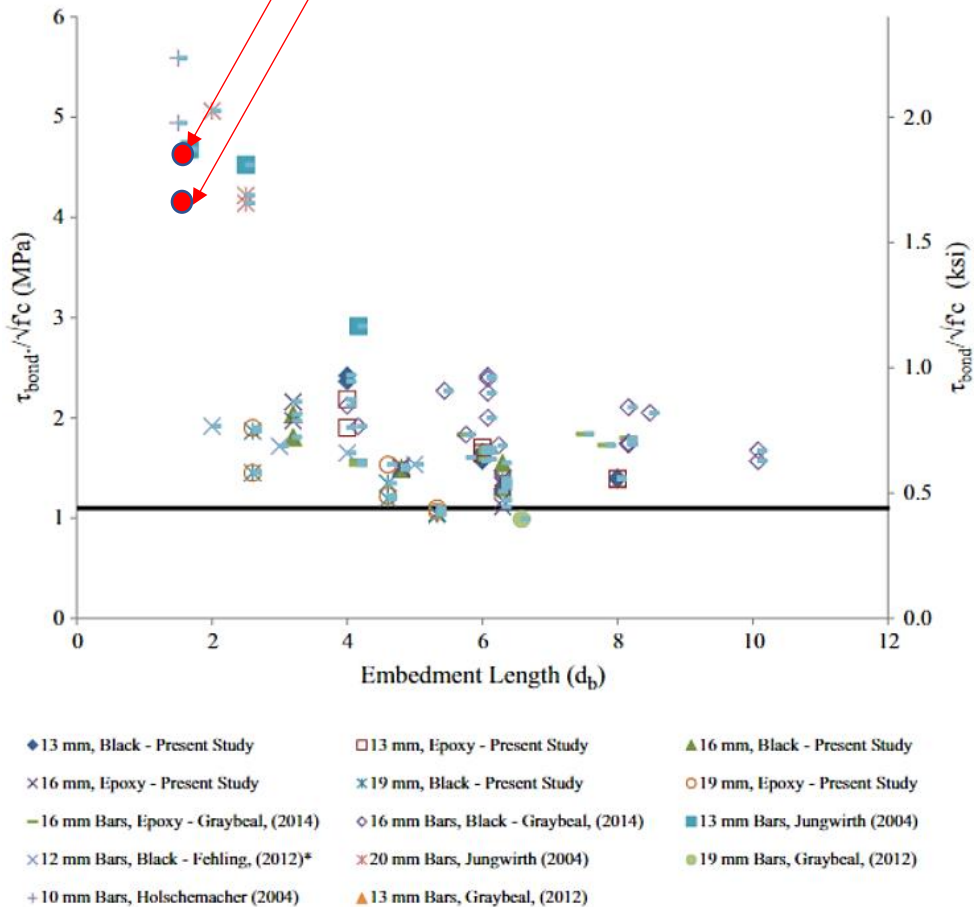
Pevnost UHPC v tlaku: **161 MPa**

$\tau_{\max,3d} = 55,5 \text{ Mpa (3x } d_b)$;

normovaná smyková pevnost: **4,3 MPa**

$\tau_{\max,2d} = 51,6 \text{ Mpa (2x } d_b)$;

normovaná smyková pevnost: **4,1 MPa**



Graf 5 Graf závislosti normovaných smykových napětí na pevnost v tlaku na kotevní délce [55]

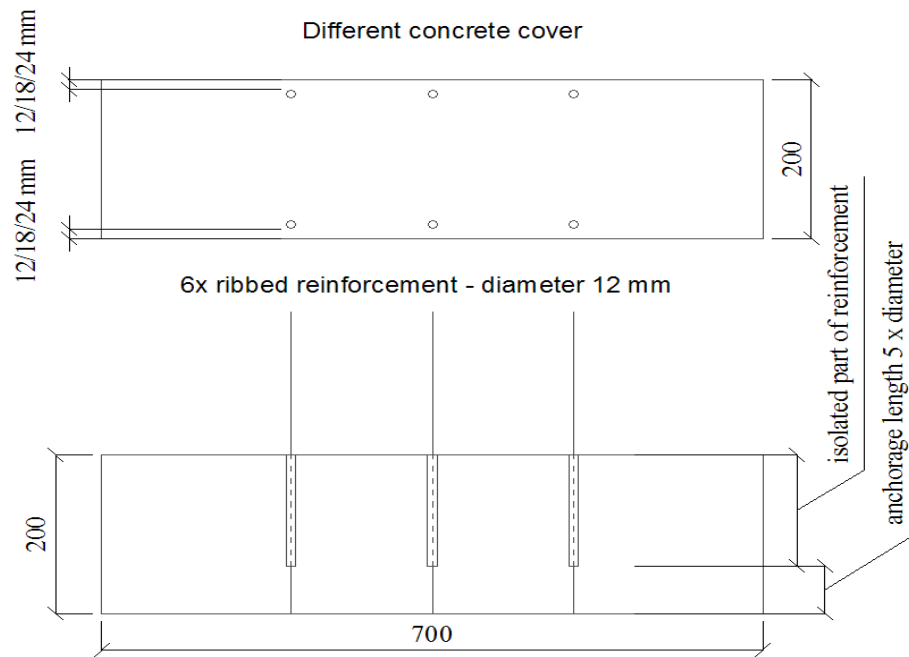
Vyhodnocením redukovaného smykového napětí v závislosti na kotevní délce lze konstatovat, že použitím UHPC bylo velmi výrazně zvýšeno maximální průměrné napětí v soudržnosti oproti běžnému betonu C30/37 (viz graf 4). Naměřené hodnoty normované smykové pevnosti na tlakovou pevnost odpovídají dosavadním stanoveným hodnotám ze zahraniční literatury. Celý experiment vede k závěru, že při použití UHPC postačí výrazně kratší kotevní délky výztuže než při použití běžného betonu, respektive k přenosu zatížení je možné uvažovat vyšší smykové napětí UHPC.

4.1.3 Soudržnost výztuže a UHPC s různou krycí vrstvou betonu

Dalším zkoumaným faktorem je stanovení soudržnosti při malé krycí vrstvě betonu, respektive UHPC. V případě optimalizovaných a extrémně namáhaných spojů či konstrukčních detailů z UHPC může při přenosu tahových namáhání vlivem příčných sil docházet k porušení okolního betonu. Při navrhování konstrukcí a detailů z UHPC není vždy možné zajistit krytí dle zásad železobetonu. Příkladem je například zesilování konstrukcí pomocí UHPC. Zesilovaná vrstva má zpravidla tloušťku 30-60 mm a v případě vyztužení přibetonovávané vrstvy běžnou výztuží již nelze zásady ve většině případů spolehlivě dodržet. Část experimentu má za úkol popsat hranici extrémně malé krycí vrstvy betonu při které dojde k porušení detailu. Vzhledem k rozměru zkušební vzorku byla vybrána výztuž průměru 12 mm.

Pro vyhodnocení chování spoje a vlivu krytí na konečné hodnoty průměrného smykového napětí soudržnosti byly připraveny 3 typy vzorků. Pro všechny zkoušky byla, jak již bylo zmíněno použita žebrovaná výztužná tyč s průměrem 12 mm. 6 kusů výztužných prutů bylo vloženo do velkého trámce o rozměrech 150 mm x 150 mm x 700 mm (obr. 72).

Prvních 6 prutů bylo vloženo do UHPC s krytím 24 mm (2x průměr), druhým 18 mm (1,5 x průměr) a třetím s krytím pouze 12 mm (1x průměr). Tyto zkoušky rozdílného krytí byly předběžnými zkouškami, takže byl zkoumán pouze jeden typ délky kotvení - 5x průměru použité výztuže. Tato kotevní délka byla v předchozích experimentech prokázána jako dostatečná. Zbytek výztuží byl izolován od okolního betonu plastovými trubkami. Jedna polovina vložené výztuže na jedné straně hranolu byla 500 mm dlouhá a druhá polovina 600 mm dlouhá kvůli rozměrům zatěžovacích zařízení a zkušební metodě (po vyzkoušení delších výztuží byly tyto výztuže odříznuty tak aby se čelistmi dalo dostat k další řadě výztuže. Schéma vzorků a fotografie připravených vzorků je znázorněno na obr. 72 a 73.



Obr. 72 Schéma vzorku s rozložením zabetonovaných prutů výztuží



Obr. 73 Připravené vzorky

Vzorky byly odlévány UHPC se samozhutnitelným charakterem. Nebylo provedeno žádné další zhutňování. Použité UHPC bylo vyvinuto, připraveno a přepraveno společností TBG Metrostav. Materiálové vlastnosti matrice UHPC byly získány z mnoha dalších testů. Pevnost v tlaku byla 131 MPa (měřeno na válcích).

Po demontáži byly vzorky uloženy v laboratorních prostorách (pod PE fólií s relativní vlhkostí asi 60 %). Před testem (po 28 dnech) byla plastová izolace kolem ocelové tyče odříznuta a vzorek byl připraven pod zatěžovacím zařízením. Pro každou zkoušku byl vzorek přemístěn do speciální polohy a upevněn k čelistem stroje pomocí 4 závitových tyčí (obr. 74 a 75). Jeden potenciometrický snímač byl nainstalován na spodní stranu hranolu UHPC k měření relativnímu prokluzu betonu a oceli. Během všech zkoušek byla sledována závislost mezi relativním pokluzem nezatíženého konce výztuže a betonu na aplikované tahové síle.



Obr. 74 Vytažení střední výztuže



Obr. 75 Vytažení vnější výztuže

Všechny testy byly zastaveny po dosažení přibližně 59-61 kN (mez kluzu/pevnosti ocelové výztuže). Pro tyto zkoušky byla tato síla dostatečná. Poslední zkouška výztuže s krytím 12 mm (1x průměr tyče) byla zastavena po porušení oceli (prasknutí ocelové tyče). Během všech zkoušek nebylo pozorováno žádné porušení spoje, relativní prokluz mezi ocelí a betonem nebo praskliny tenké krycí vrstvy betonu. Poslední test prokázal, že i malá krycí vrstva betonu (1xprůměr) je dostatečná pro spolehlivý přenos tahové síly z vložené výztuže do okolního UHPC.

Další 3 výztuže zabudované v každém hranolu UHPC byly ponechány v povětrnostních podmínkách na dvoře KÚ a zkoušeny cca po 1 roce uložení. Vzhledem k hutnosti, trvanlivosti a malé pórovitosti nebyly na vzorku betonu pozorovány žádné projevy koroze či degradace. Pouze výztuž exponovaná povětrnostním podmínkám byla zasažena povrchovou korozí. Zkoušky potvrdily že ani po roce exponování vzorku povětrnostním vlivům nedošlo ke snížení soudržnosti či porušení vzorku. Zkouška byla ukončena přetržením výztuže.



Obr. 76 Měření pokluzu na spodní části vzorku

Stejný charakter porušení (přetržení výztuže) byl zjištěn u všech zkoušených vzorků. Pro ověření, že nedošlo k pokluzu výztuže byla tato hodnota ověřována posunem potenciometrickým snímačem zespodu vzorku viz obr.76. Během zkoušky nebylo pozorováno žádné další porušení vzorku (žádné ohybové trhliny) což poukazuje na správné předpokládané uspořádání zkoušky.

4.1.4 Soudržnost různého typu betonářské výztuže s UHPC

V dosavadních experimentech uvedených v předchozích kapitolách byla řešena soudržnost betonářské výztuže se žebírky, která je běžně používaná. Jak bylo také uvedeno v úvodu smykové napětí v soudržnosti je tvořeno z několika složek, přičemž právě povrch (žebírka, vtisky) mají na výslednou hodnotu soudržnosti významný vliv. Z tohoto důvodu bylo v další části výzkumu přistoupeno k jednoduchým zkouškám vytahování prutů s různým povrchem z UHPC a také pro srovnání z betonu C30/37. Pro zkoušky byly zvoleny tři běžně používané druhy výztuží a to:

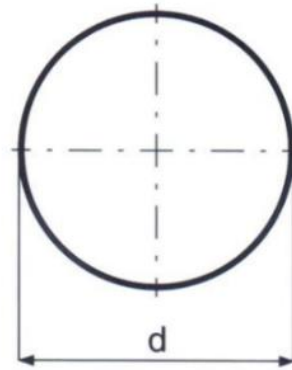
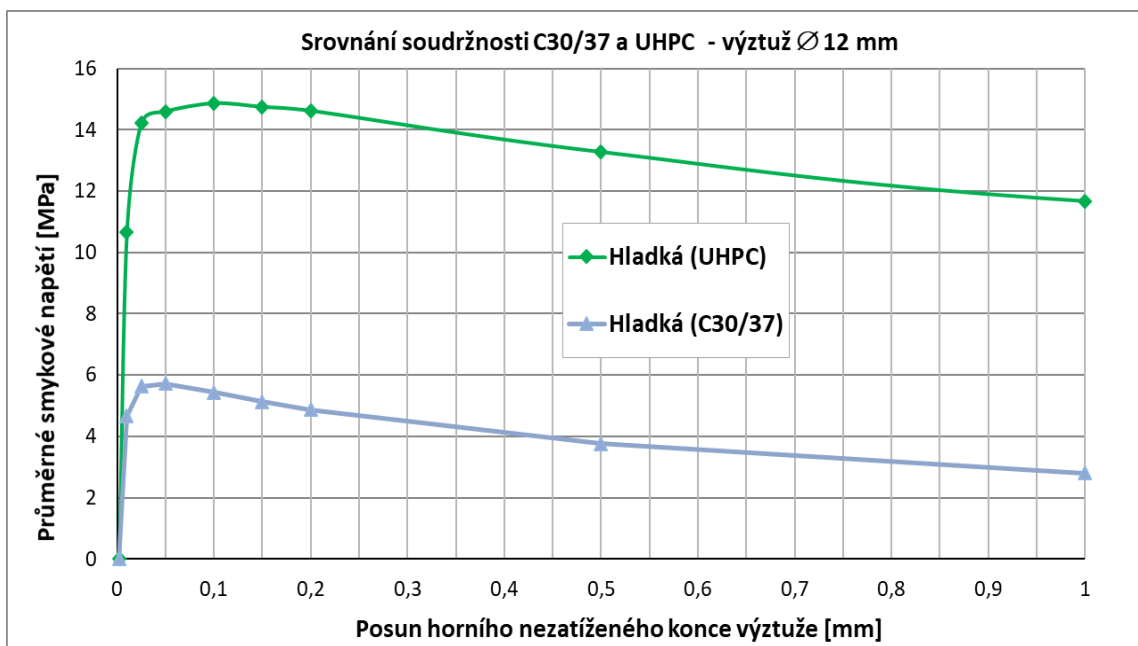
- Žebírková výztuž
- Výztuž s vtisky
- Hladká výztuž

Referenční hodnotou jsou v následujících experimentech hodnoty smykového napětí v soudržnosti hladké výztuže. Při jejím vytahování se na výsledném smykovém napětí nepodílí složky sil působících na žebírka a hlavní složkou je adheze povrchu výztuže k UHPC. V případě všech tří zkoušených variant lze odvodit obecný poměr pro soudržnost oceli a betonu, respektive UHPC, využití nejen v detailech kotvení (spoje) ale i v případě samotného spřažení.

Zkoušky byly prováděny na krychlích o hraně 150 mm a kotevní délka byla volena shodně pro všechny druhy výztuže 5x průměr výztuže. Výztuže byly voleny také shodně a to průměru 12 mm. Zvolená úprava zkušebních těles byla zvolena pro možnost betonáže většího množství těles na jeden záběr a pro snazší manipulaci se vzorky. Velikost tělesa byla upravena i z hlediska zkoušení relativně malého průměru výztuže – 12mm.

Hladká výztuž:

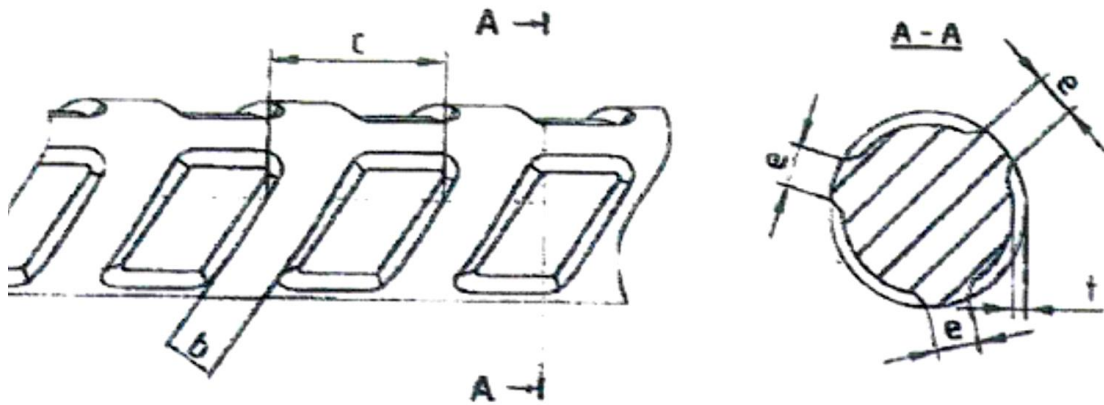
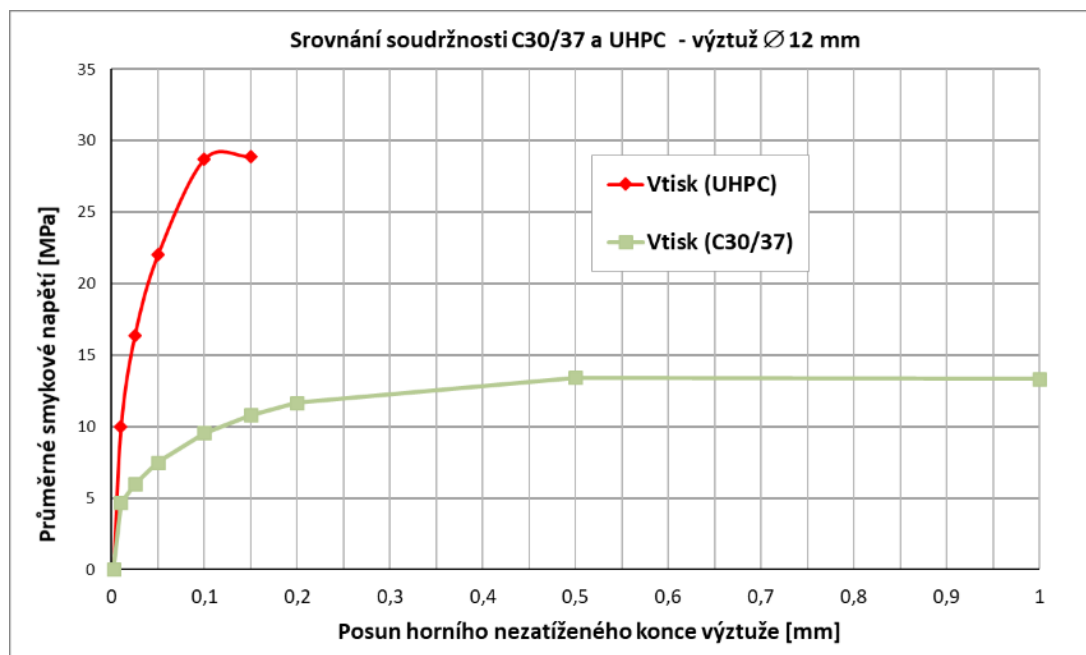
V případě zkoušek hladké výztuže je zkoušena čistě složka povrchové soudržnosti. Možným faktorem ovlivňujícím výsledné hodnoty soudržnosti může být imperfekce v rovinnosti jak samotného prutu výztuže, tak drsnosti povrchu. Tyto parametry se ukázaly jako nedostatečně významné z hlediska výsledného rozptylu hodnot.

**Obr. 77** Příčný řez výztuží**Graf 6** Porovnání smykového napětí hladké výztuže v soudržnosti s UHPC a NSC

Dosažené hodnoty (graf 6) a srovnání běžného betonu a UHPC poukazují na významný nárůst průměrného smykového napětí v soudržnosti a to až skoro 3násobný. Maximální hodnoty průměrného smykového napětí u betonu C30/37 byly 4,9 MPa, oproti tomu průměrné smykové napětí u UHPC dosahovalo hodnot až 14,2 MPa. U všech vzorků došlo k vytažení výztuže – porušení v soudržnosti.

Výztuž s vtiskem:

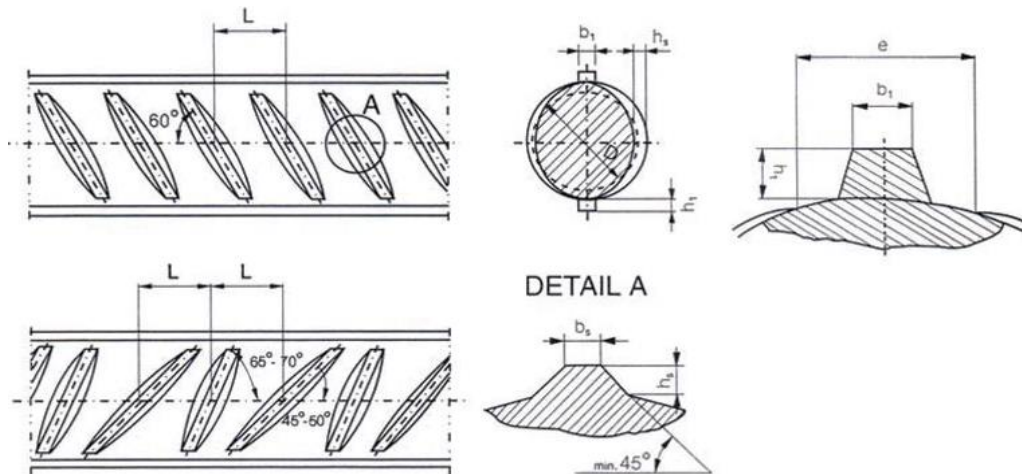
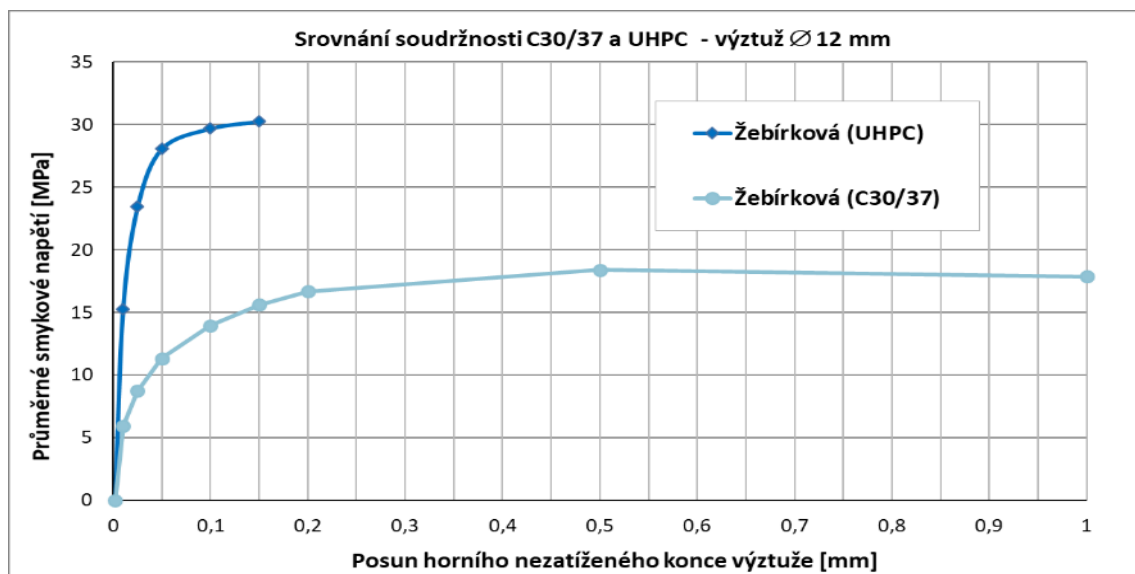
V případě zkoušek výztuže s vtiskem bylo motivací popsání soudržnosti a charakteru porušení u výztuže na pomezí mezi hladkou a žebříkovou výztuží. Výztuž s vtiskem je používána v menších průměrech zpravidla kolem 12 mm.

**Obr. 78** Příčný řez výztuží**Graf 7** Porovnání smykového napětí výztuže s vtiskem v soudržnosti s UHPC a NSC

Dosažené hodnoty (graf 7) a srovnání běžného betonu a UHPC poukazují na významný nárůst průměrného smykového napětí v soudržnosti a to až skoro 2násobný. Maximální hodnoty průměrného smykového napětí u betonu C30/37 byly 14,2 MPa, oproti tomu průměrné smykové napětí u UHPC dosahovalo hodnot až 29,4 MPa. U UHPC došlo k porušení výztuže oproti běžnému betonu, u kterého došlo k porušení v soudržnosti a vytažení výztuže.

Žebříková výztuž:

Zkoušky žebříkové výztuže v této fázi experimentu byly provedeny pro srovnání zkoušek na jiném rozměru zkušebního tělesa a to na krychli o rozměru 150 mm oproti původním 200 mm. Postup vytahování se jinak nelišil od předešlých zkoušek.

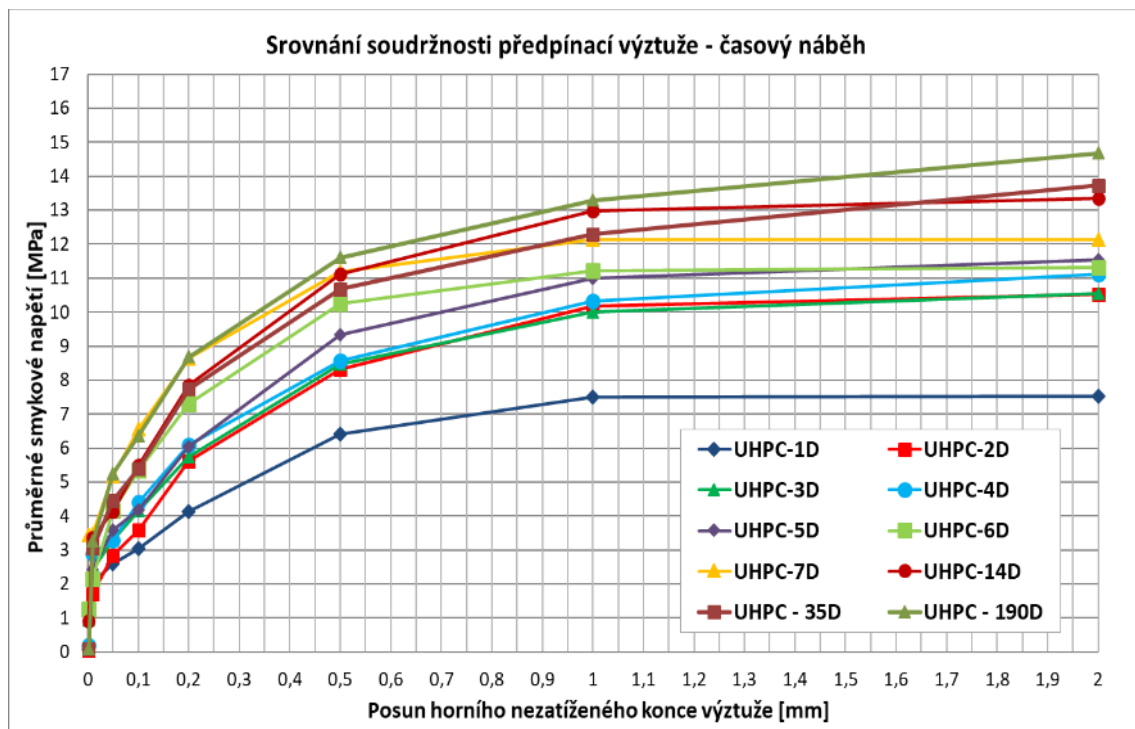
**Obr. 79** Příčný řez výztuží**Graf 8** Porovnání smykového napětí žebříkové výztuže v soudržnosti s UHPC a NSC

V případě zkoušek žebříkové výztuže byl dosažen obdobný výsledek jako v případě úvodních testů soudržnosti UHPC a výztuže (graf 8). V tomto případě byly výsledky důležité pro ověření zkušební postupu uvažovaného dle RILEM RC6. V případě použití menších zkušebních těles nebyly pozorovány odchylky od výsledných naměřených průměrných hodnot soudržnosti. U UHPC došlo k porušení výztuže oproti běžnému betonu, u kterého došlo k porušení v soudržnosti a vytažení výztuže.

4.2 ANALÝZA SOUDRŽNOSTI PŘEDPÍNACÍ VÝZTUŽE A UHPC

4.2.1 Vliv stáří na soudržnost předpínací výztuže

UHPC se jako materiál vyznačuje velmi rychlým nárůstem pevností, a to v relativně krátkém čase po vybetonování. Strmý nárůst tlakových a tahových pevností v úvodních dnech má za následek i rychlý nárůst smykových napětí mezi předpínací výztuží a UHPC. V rámci experimentu byla zkoumána právě tato relace. V laboratořích byly vybetonovány vzorky na pull out testy pro zkoušky v krátkých časech a to v 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 a 14 dnech. Vzorky původně plánované zkoušet ve stáří betonu 28 dní byly z technických důvodů vyzkoušeny až 35. den po betonáži. Pro srovnání byly připraveny vzorky na dlouhodobější zkoušky a to ve stáří betonu 190 dní. Tyto dlouhodobější testy byly provedeny dodatečně. Průběhy průměrného smykového napětí jsou vykresleny v následujícím grafu 9.



Graf 9 Vyhodnocení průměrného smykového napětí v soudržnosti v různých časech

Z grafu je patrná skutečnost, že nejvyšší nárůst průměrného smykového napětí v soudržnosti se projevuje v úvodních 24 hodinách po betonáži. Hodnoty napětí dosahují až 50% hodnot z celkových, v nynějším případě 35 denních hodnot napětí. Významný nárůst byl zaznamenán v čase 2 dny, další vývoj průměrných smykových napětí je již pozvolnější. Velmi důležitým faktorem je u těchto zkoušek počet zkoušených vzorků.

Vzhledem k celkovému rozsahu experimentu byly od každé sady vyrobeny 3 vzorky. Jak se ale zpětně ukazuje, vliv povrchu výztuže (lokální znečištění atd.) má velmi fatální vliv na výsledné hodnoty smykových napětí. Pro statisticky optimální vyhodnocení krátkodobých průměrných smykových napětí by bylo vhodné rozšířit počet zkoušených vzorků, aby došlo k zpřesnění hodnot napětí zejména při prvotních posunech výztuže (0,002 – 0,1 mm). Tato část výzkumu si však klade za cíl popsat trend chování nového materiálu, v tomto případě jaký je vývoj v soudržnosti předpínací výztuže a UHPC v krátkém čase po betonáži. Vzorky zkoušené po 190 dnech od betonáže nevykazovaly výrazný nárůst ve smykovém napětí v soudržnosti. Tento fakt koreluje s vývojem pevností betonu, respektive UHPC. V jeho případě je náběh pevností díky vysokému obsahu pojivové složky rychlejší než u běžných betonů.

Dílčí závěr

V experimentech byl detailněji popsán vliv času na výslednou soudržnost předpínací výztuže a UHPC. Nejvyšší nárůst byl zaznamenán v úvodních 48 hodinách po betonáži, kdy bylo dosaženo cca 60-70% hodnot výsledných průměrných smykových napětí. Nárůst smykového napětí v pozdějším stáří betonu (více než 28 dní) je již méně významný. Rychlost nárůstu smykové pevnosti je v raném stráří vzorku rychlejší než samotný nárůst pevnosti v tlaku. Při korelaci nárůstu pevností UHPC v tlaku, statického modulu pružnosti a nyní zmiňované soudržnosti lze výsledky zohlednit při návrhu času předpínání. U prefabrikovaných konstrukcí tak lze velmi výrazně zrychlit výrobní proces.

4.2.2 Vliv extrémních podmínek na soudržnost předpínací výztuže

Další významnou částí experimentů byl detailnější popis chování materiálu vystavenému teplotnímu namáhání. Teplotní namáhání je zde chápáno ve smyslu cyklování mráz/voda. Vzorky (krychle s osově zabetonovanou výztuží dle ČSN 73 1333) byly vloženy do cyklovacího zařízení, ve kterém byly prováděny cykly mráz (-20°C) s trváním 4 hodin a vodní uložení (+20°C) s trváním 2 hodin. Vzorky byly ponechány v zařízení až do uplynutí nejprve 100 cyklů, dále 200, 300 a nakonec 400 cyklů (Obr.80). Aktuální výsledky zahrnují sady po 400 cyklech. Pro lepší časovou představu, provedení 100 cyklů trvá cca 1 měsíc. Celkem celý experiment od času výroby po zkoušku trval 6 měsíců.

V rámci experimentu byly vyhotoveny sady vzorků po třech vzorcích pro jednotlivé varianty. Celkem bylo vyrobeno 40 těles (20 z UHPC a 20 z betonu C50/60). Více těles nebylo možné vyrobit z důvodu kapacity cyklovacího zařízení. Princip experimentu spočíval v uložení poloviny vzorků do cyklovacího zařízení a poloviny dle normy do PE folie (Obr.81). Cyklování bylo zahájeno cca po 50 dnech od betonáže vzorků, aby vzorky byly co nejméně ovlivněny rozdílnými materiálovými charakteristikami v čase. Do té doby byly vzorky uloženy dle normy v PE folii. Po ukončení 100, 200, 300 a 400 cyklů byly vyndány příslušné vzorky, nafoceny a odzkoušeny společně s referenční sadou uloženou dle normy. Vyhodnocení výsledků bylo naprosto totožné jako u předchozích testů – tahové síly byly přepočítány na průměrné hodnoty smykového napětí v soudržnosti.



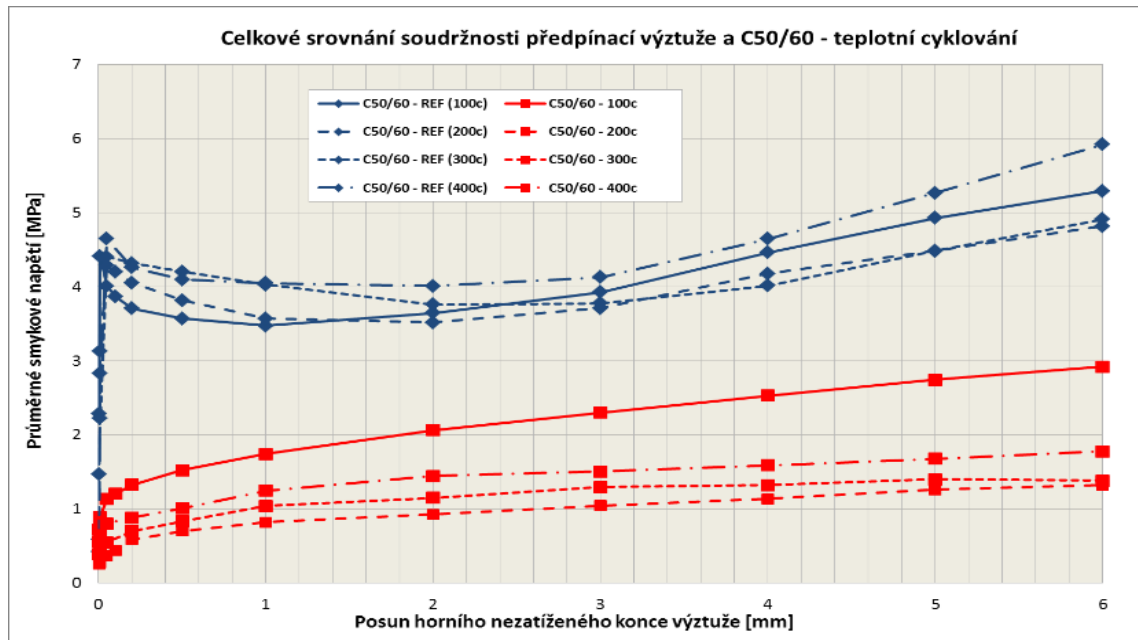
Obr. 80 Vzorky v cyklovacím zařízení



Obr. 81 Referenční vzorky

Vzorky z C50/60

Vzorky z běžného betonu C50/60 prokazovaly již po 100 zmrazovacích cyklech povrchové poškození vlasovými trhlinami. Referenční vzorky uložené dle normy a zkoušené vždy ve stejný čas jako vzorky po dokončení cyklování prokazovaly dobrou shodu (graf 10).

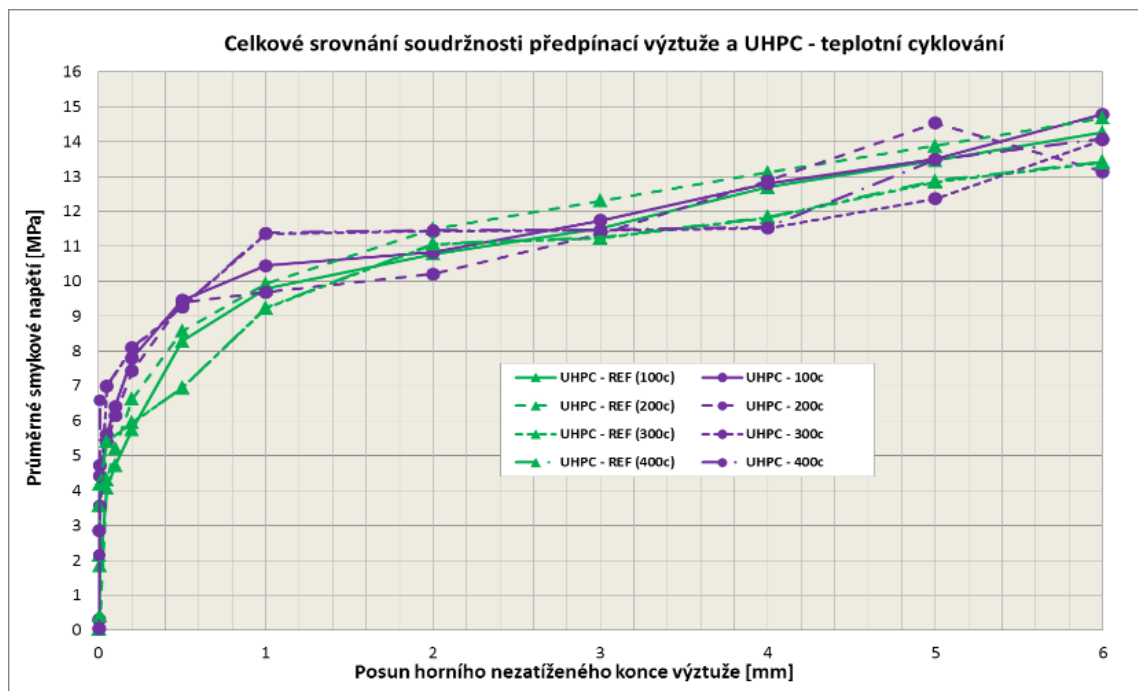


Graf 10 Průměrné smykové napětí v soudržnosti C50/60 – srovnání vzorků po cyklování

U vzorků po 100 zmrazovacích cyklech došlo zejména při počátečních posunech horního nezátíženého konce výztuže ke snížení průměrného smykového napětí v soudržnosti až na cca 30% hodnot referenčních vzorků. Maximální hodnoty dosahovaly u referenčních vzorků hodnot 4,6 MPa a u vzorků po 100 cyklech hodnot 2,6 MPa. Vzrůstající tendence křivek je způsobena šroubovitým zapletením předpínací výztuže, které je při vytahování zabráněna rotace. Tato tendence je shodná u všech zkoušených vzorků. U vzorků po 200 zmrazovacích cyklech byl zaznamenán obdobný trend celkového snížení soudržnosti (maximální hodnota průměrného smykového napětí byla cca 1,2MPa). U vzorků po 300 a 400 zmrazovacích cyklech docházelo k povrchovému odpadávání betonu, zejména na hranách vzorku. Soudržnost se již razantně neměnila a rozptyl výsledků byl ovlivněn malým počtem zkoušených těles. Ve všech těchto případech nedochází k postupnému nárůstu napětí – beton v okolí výztuže je porušován při jejím vytahování.

Vzorky z UHPC

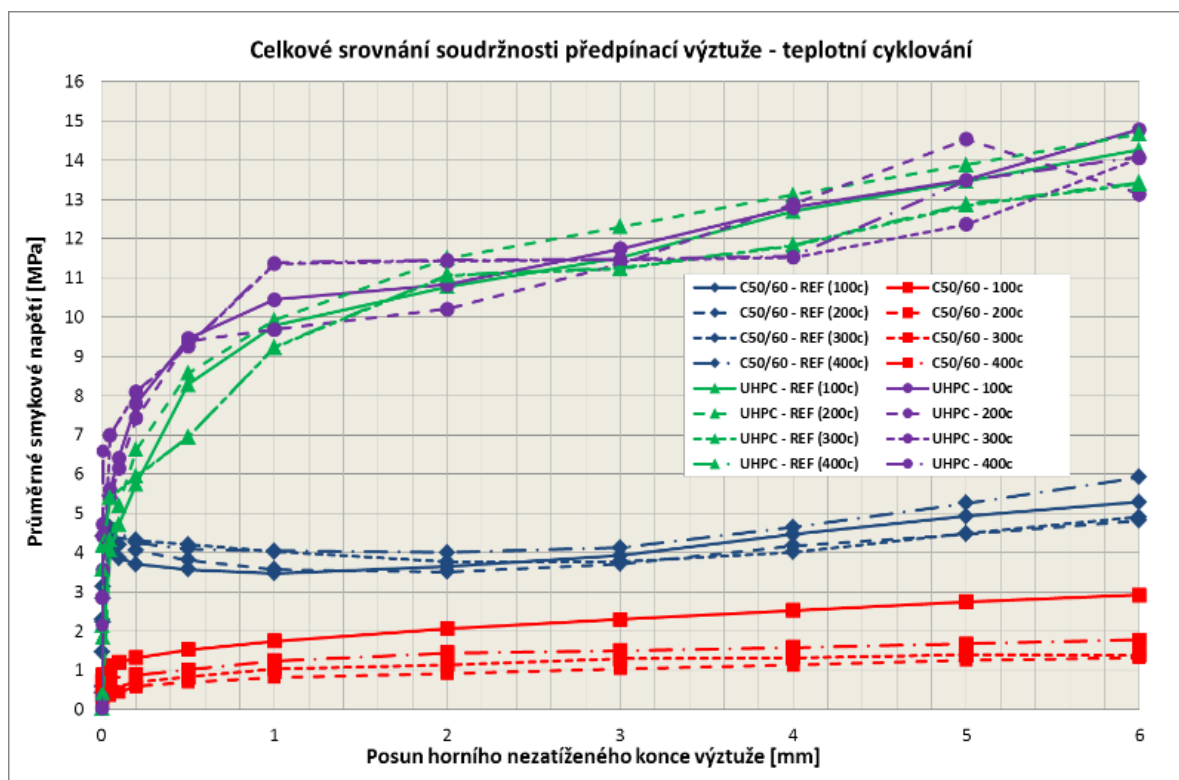
Velmi zajímavý průběh experimentu oproti vzorkům z běžného betonu byl zaznamenán u těles vyrobených z UHPC. Opět se dá z následujícího grafu potvrdit shodnost výsledků z referenčních sad vzorků zkoušených ve stejný termín jako vzorky po cyklování. Tělesa byla uložena identicky jako tělesa z betonu C50/60 a byla podrobena stejným počtům cyklů. Zásadní bod experimentu spočívá ve zjištění, že ani u vzorků po 400 cyklech nedochází jednak k porušení struktury tělesa, ale ani ke snížení průměrných napětí v soudržnosti. Jemnozrná struktura UHPC ve spojení s výbornými materiálovými parametry tak odolá dlouhodobě extrémním podmínkám, které tyto zmrazovací cykly bezpochyby jsou. Průběhy hodnot průměrného smykového napětí v soudržnosti u vzorků z UHPC zobrazuje detailně graf 11. Maximální hodnoty napětí dosahovaly hodnot blízcích se cca 15MPa. Hodnoty u vzorků po cyklování dosahovaly dokonce vyšších hodnot průměrných smykových napětí – to je možné vysvětlit faktem, že při cyklování docházelo při vodním uložení k postupné hydrataci cementu.



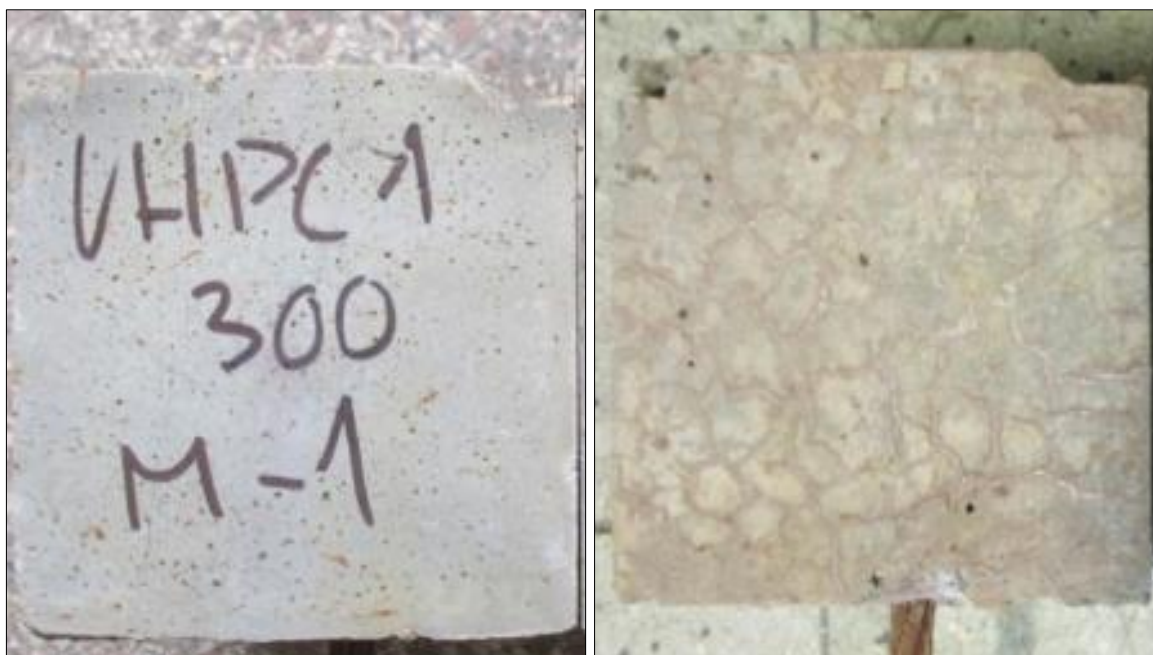
Graf 11 Průměrné smykové napětí v soudržnosti UHPC – srovnání vzorků po cyklování

Srovnání soudržností po extrémním zatížení

Rozdíl mezi UHPC a betonem C50/60 v soudržnosti je zřejmý. Referenční vzorky z běžného betonu dosahují výrazně menších hodnot průměrných smykových napětí (graf 12), což již bylo prokázáno předchozí částí výzkumu. Nejdůležitějším faktem je skutečnost, že extrémní podmínky ve smyslu teplotního a vlhkostního cyklování nezpůsobují degradaci vzorků z UHPC a tak ani snížení průměrných hodnot soudržnosti (obr. 81 vlevo). Oproti tomu vzorky z běžného betonu degradují (obr. 81 vpravo) a jejich soudržnost se snižuje. Krychelné pevnosti v tlaku referenčních vzorků z UHPC se pohybovaly v rozmezí 120-140 MPa a pevnosti betonu třídy C50/60 v rozsahu 60-70MPa.



Graf 12 Celkové porovnání UHPC a C50/60 po 100, 200, 300 a 400 zmrazovacích cyklech



Obr. 82 Vzorky z UHPC po 300 zmrazovacích cyklech

Dílčí závěr:

V aktuální části experimentu byly vzorky před zkouškou vytažením vystaveny extrémnímu teplotnímu namáhání cyklováním mezi mrazem (-20°) a vodou ($+20^{\circ}$). Tělesa z UHPC a také z běžného betonu C50/60 byla vystavena až 400 cyklům. U vzorků z běžného betonu docházelo k degradaci struktury betonu a hodnoty smykového napětí v soudržnosti měly klesající charakter. Naproti tomu u vzorků z UHPC nebyla zaznamenána žádná degradace materiálu a ve všech případech i po 400 cyklech byly naměřeny hodnoty smykového napětí stejné nebo vyšší než u referenčních vzorků. Na povrchu vzorků z běžného betonu byly po zkouškách patrné sítě mikrotrhlin prostupujících do hloubky vzorku. Oproti tomu vzorky z UHPC nevykazovaly žádné výrazné poškození. Na povrchu vzorku zůstaly i nápisy permanentním fixem, což poukazuje na vynikající odolnost povrchu vzorku.

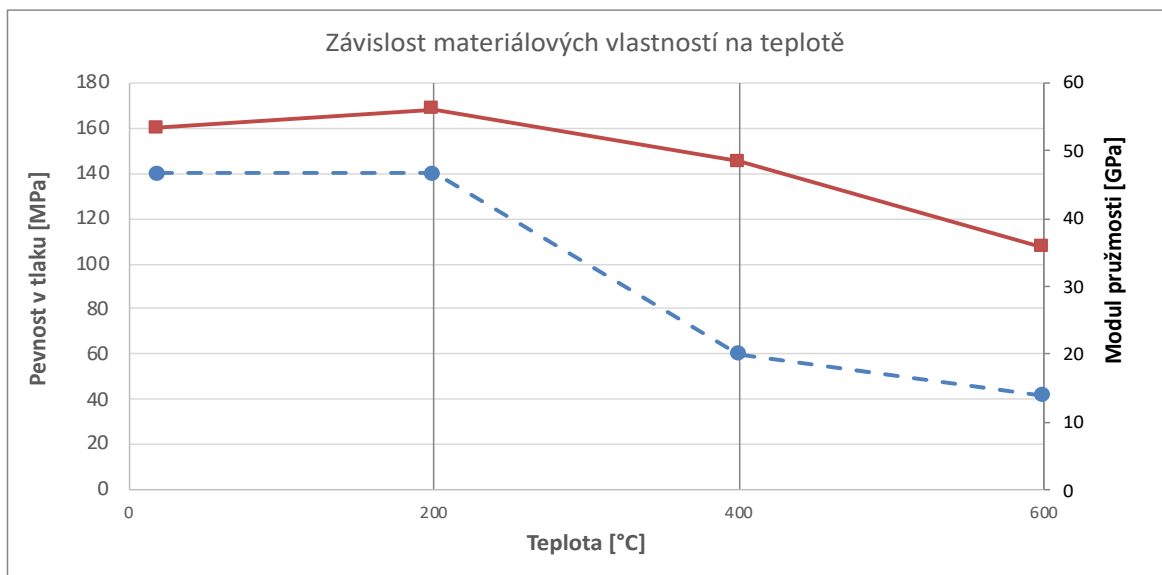
4.2.3 Vliv zvýšené teploty na smyková napětí v soudržnosti

Jako vstupní parametry pro numerické modelování byly experimentálně zjištěny krychelná pevnost a modul pružnosti za referenční teploty (cca 20°C) a dále při zvýšených teplotách 200, 400 a 600°C . Teplota byla vyvozována automaticky v elektrické peci s rychlostí zatěžování $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Na dané teplotě byla pec temperována po dobu 1 h. Chladnutí pece nebylo řízeno. Vychladlé vzorky byly dále zkoušeny kvůli stanovení jednotlivých materiálových parametrů. Pomocí zjištěné krychelné pevnosti za dané teploty byly pak pomocí programu Atena vygenerovány další materiálové vlastnosti potřebné pro

numerickou analýzu (válcová pevnost v tlaku, pevnost v tahu). Moduly pružnosti vygenerované programem Atena byly následně upraveny na základě experimentálního měření modulu pružnosti na skutečných vzorcích za vyšších teplot.

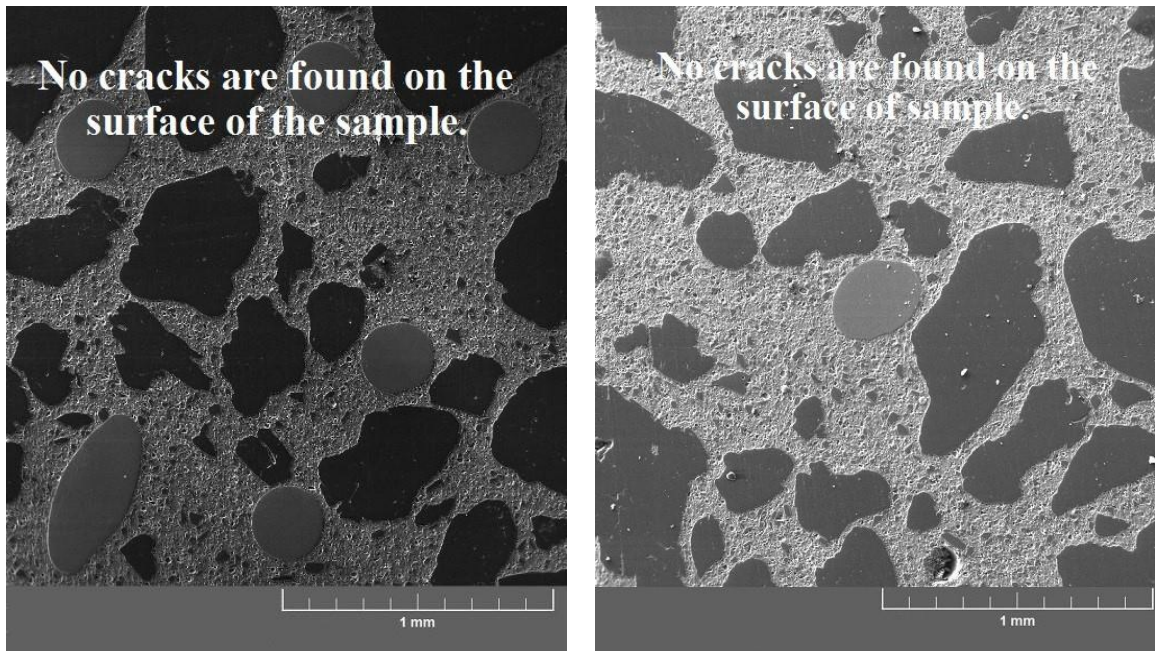
Vlastnosti UHPC po vystavení vysokým teplotám

Pro popsání materiálových vlastností materiálu UHPC vystaveného vysokým teplotám byly u vzorků zkoušeny mechanicko-fyzikální vlastnosti jako je pevnost betonu v tlaku na zlomcích trámečků 40/40/160 a modul pružnosti na válcích 100/200 mm. Vývoj je popsán na následujícím grafu 13.

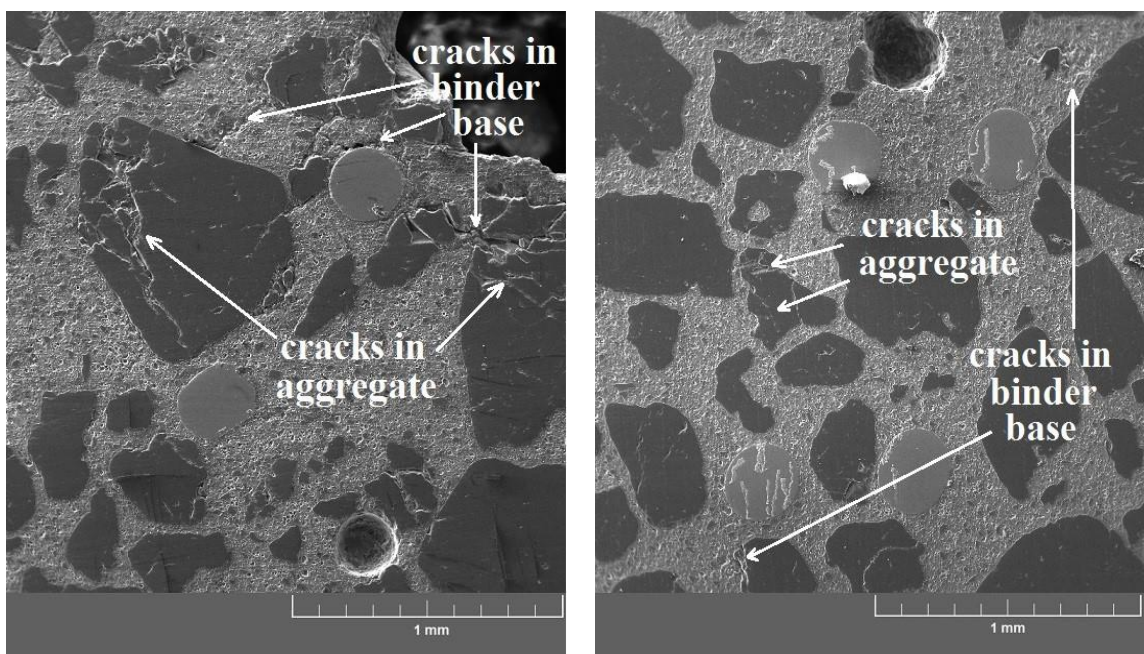


Graf 13 Průběh krychelné pevnosti (červeně) a modulu pružnosti (modře) UHPC v závislosti na teplotě

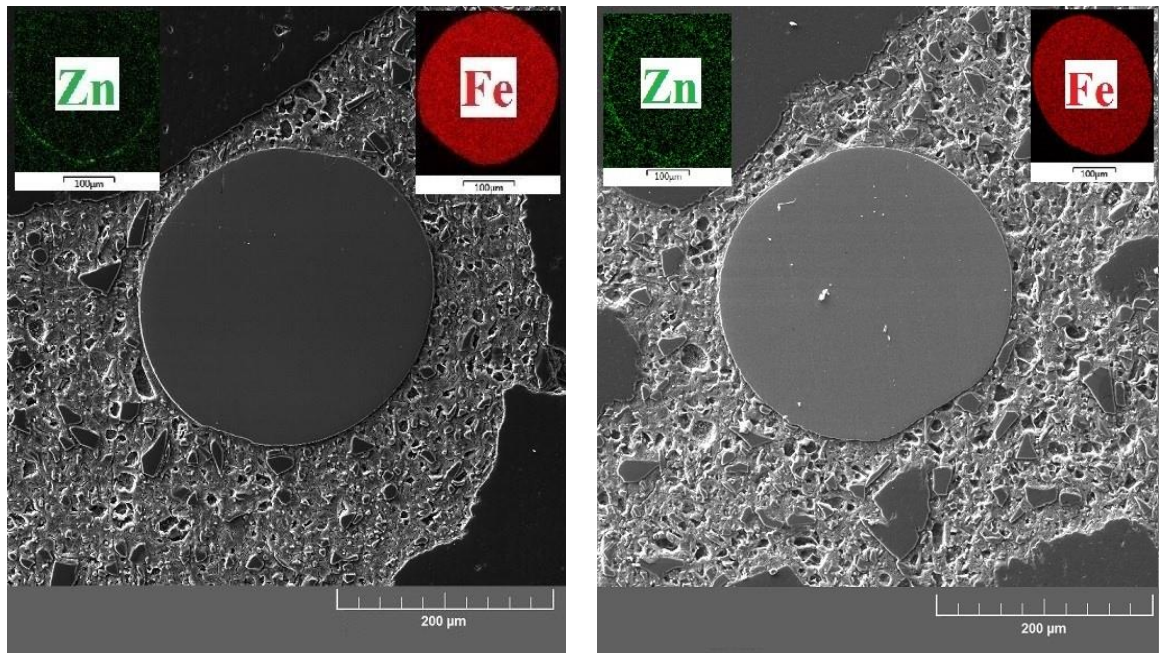
Oproti tomu popsání změny vnitřní struktury matrice UHPC vyztuženého ocelovými vlákny je popsáno SEM analýzou. Analýza vysvětluje snížení materiálových vlastností při 400 ° C a 600 ° C. Postupná degradace struktury matrice a vznik mikrotrhlin je patrný z obrázků 83-86.



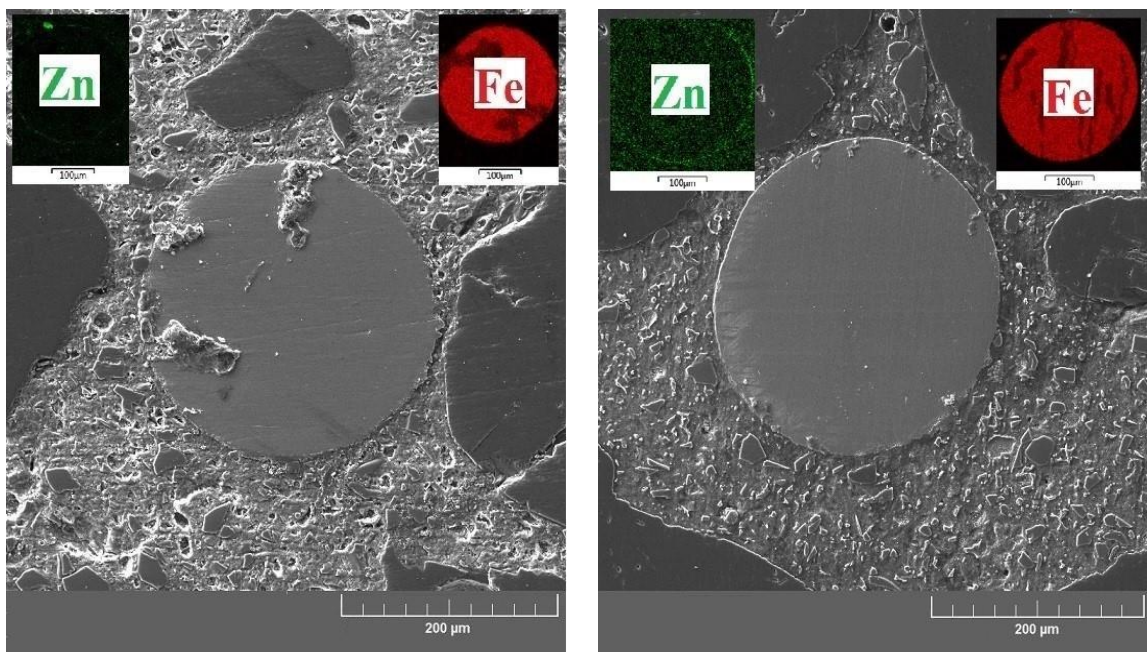
Obr. 83 SEM snímek vzorku po expozici 20 ° C (vlevo), 200 ° C (vpravo) zaměřený na přechodovou zónu kolem kameniva / UHPC matrice



Obr. 84 SEM snímek vzorku po expozici 400 ° C (vlevo), 600 ° C (vpravo) zaměřený na přechodovou zónu kolem kameniva / UHPC matrice



Obr. 85 SEM snímek vzorku po expozici 20 ° C (vlevo), 200 ° C (vpravo) zaměřený na přechodovou zónu kolem ocelového vlákna / UHPC matrice



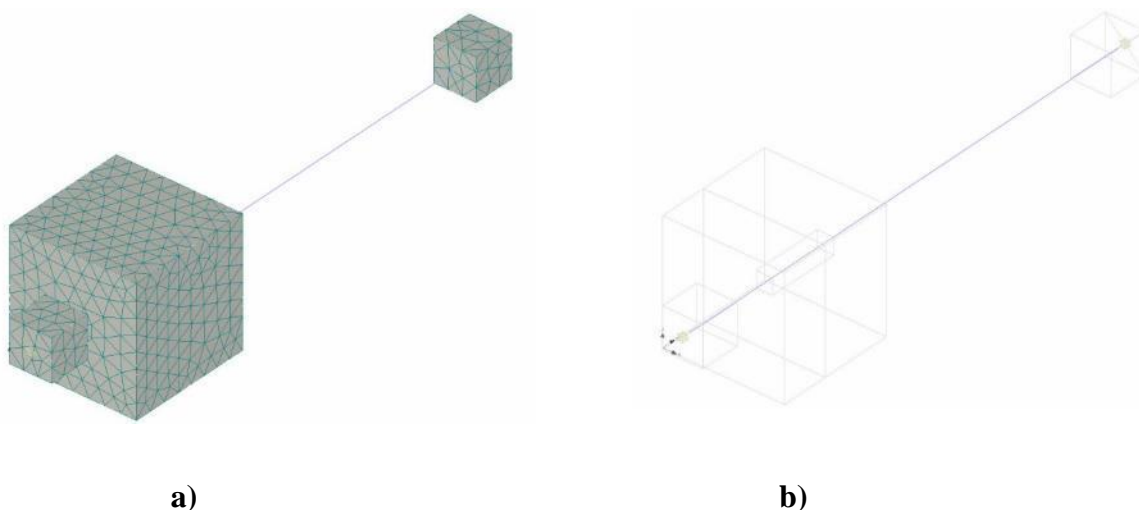
Obr. 86 SEM snímek vzorku po expozici 400 ° C (vlevo), 600 ° C (vpravo) zaměřený na přechodovou zónu kolem ocelového vlákna / UHPC matrice

Numerické modelování

Numerický model uspořádání zkoušky soudržnosti na vytažení byl vytvořen a počítán v softwaru Atena 3D Engineering (obr. 87). Zkušební krychle z UHPC byla modelována jako dva standardní makroprvky – jeden o délce hrany 60 mm, v němž byla výztuž zakotvena, a druhý o délce hrany 90 mm s otvorem pro výztuž pro simulaci separace ocelového prutu (předpínacího lana). Zabetonované ocelové lano bylo modelováno jako prvek s označením Prutová výztuž s parametry shodnými se zkouškou v laboratoři. Mimo tyto prvky byly vymodelovány ještě pomocné makroprvky, a to krychličky na volných koncích ocelového prutu. Na tyto pomocné makroprvky bylo aplikováno zatížení posunem a monitory ke sledování posunu a působící síly, poněvadž program Atena neumožňuje aplikovat monitory a zatížení do koncového bodu položky Prutová výztuž.

Jako materiál zkušební krychle byl z knihovny programu Atena vybrán materiálový model 3D Nonlinear Cementitious 2. S jeho pomocí byly vygenerovány materiálové vlastnosti na základě experimentálně zjištěné krychelné pevnosti UHPC po ohřevu na příslušnou teplotu a ochlazení. Experimentálně zjištěné moduly pružnosti UHPC byly do vygenerovaných materiálových modelů dodatečně doplněny.

Jako materiál výztužného prutu byla zvolena položka s názvem Výztuž se středními hodnotami bilineárního pracovního diagramu v tahu. Soudržnost výztužného ocelového prutu byla modelována materiálovou položkou s názvem Soudržnost výztuže, jejíž parametry byly vygenerovány programem na základě profilu prutu, experimentálně zjištěné krychelné pevnosti UHPC v tlaku a odborně odhadnuté kvalitě soudržnosti (program nabízí možnosti: výborná, dobrá nebo špatná). Pomocné krychličky byly modelovány z materiálu Bilinear Steel von Mises.



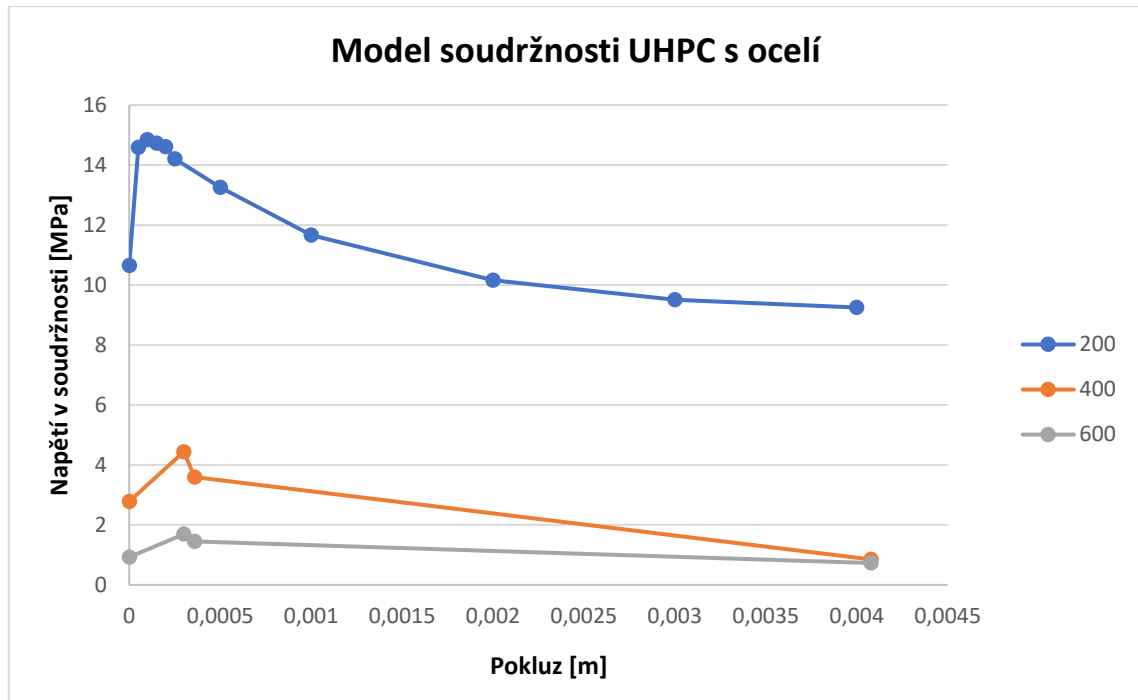
Obr. 87 Numerický model testu soudržnosti – a) plný model se sítí konečných prvků; b) drátový model

Jako zatížení byl aplikován posun na jednom volném konci výztužného prutu (na pomocný makroprvek), a to v hodnotě 0,1 mm v každém kroku. Současně byl osazeným monitorem na opačném konci měřen posun tohoto konce výztužného prutu (podobně jako v experimentu). Dalším osazeným monitorem byla dopočítávána síla, která působící posun vyvolává, a tak byl vytvářen L-D diagram pro srovnání chování krychlí vystavených extrémním teplotám a krychle za referenční teploty.

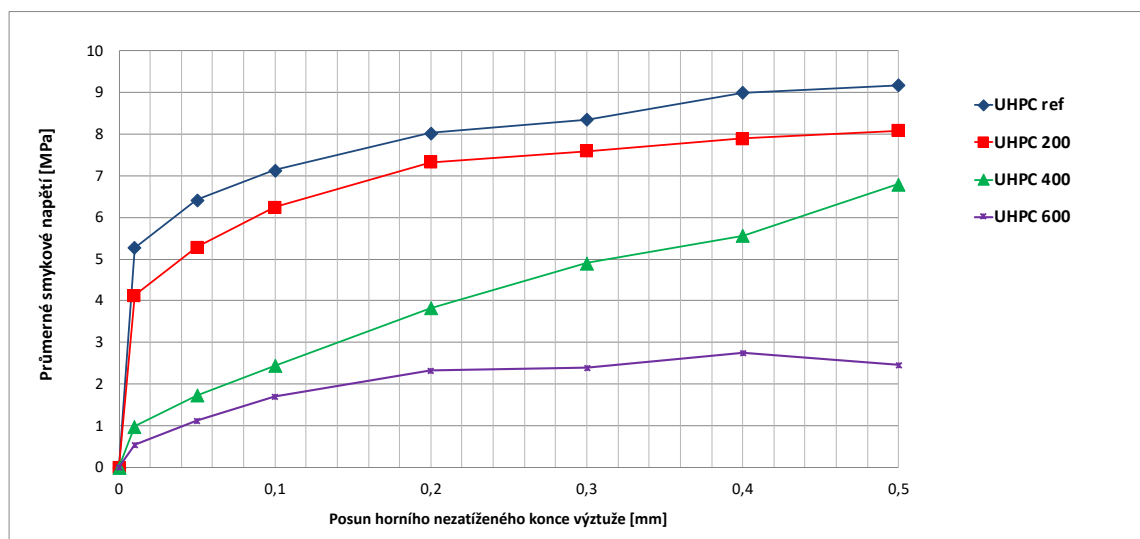
Jednotlivé makroprvky byly nasítovány lineárními „tetrahedra“ konečnými prvky o velikosti hrany 10 mm. Za výpomoc s numerickou analýzou děkuji Ing. Jidřichu Čechovi, Ph.D.



Obr. 88 Boční pohled na plný model s podporami



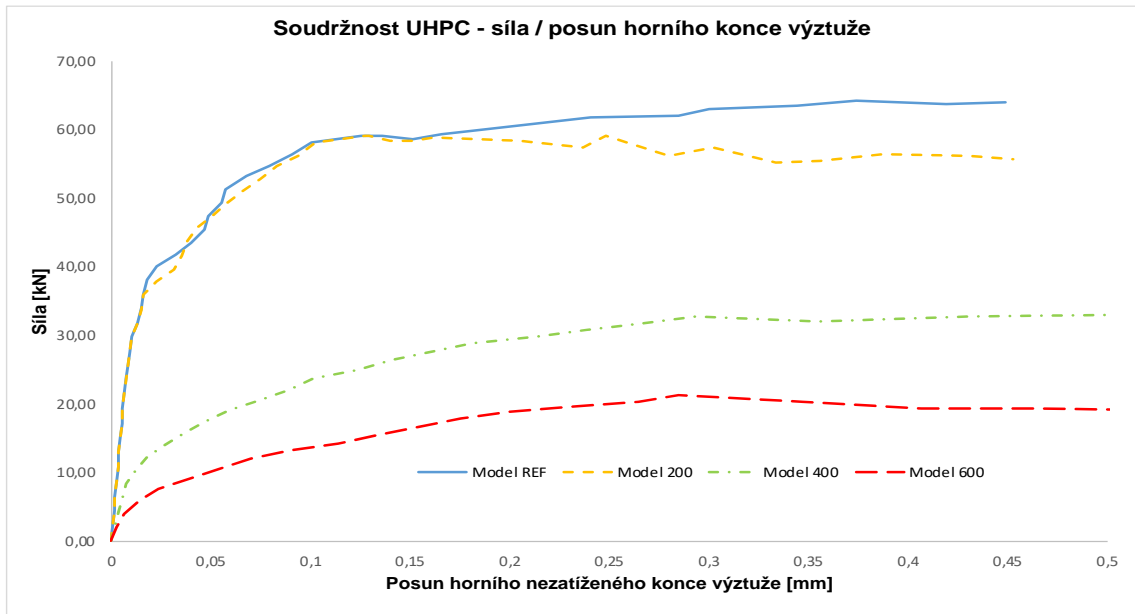
Graf 14 Porovnání modelů soudržnosti UHPC s ocelí generovaných programem Atena na základě krychelné pevnosti



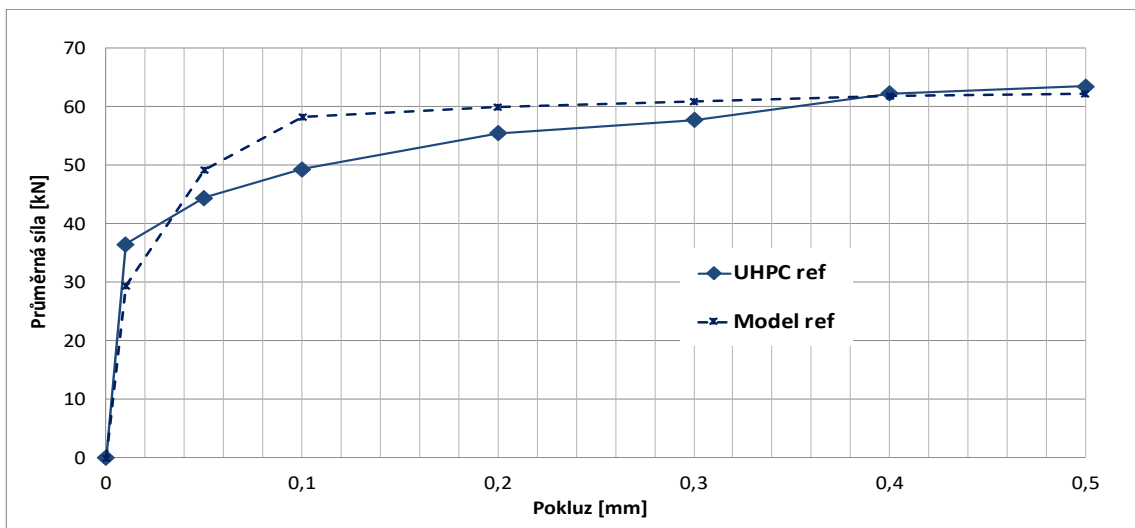
Graf 15 Experimentální výsledky závislosti průměrného smykového napětí na pokluzu

Pro jednotlivá teplotní namáhání byla provedena řada výpočtů, které byly kalibrovány z hlediska materiálových vlastností a okrajových podmínek. Pro jednotlivé teploty jsou zde prezentovány grafy závislosti síly na pokluzu (graf 14). Z numerické analýzy vyplývá, že při ohřátí UHPC na teplotu do 200 °C nedojde v soudržnosti s ocelovou výztuží téměř k žádné změně. Výrazné změny v soudržnosti UHPC s výztužnou ocelí se projeví při ohřátí betonu

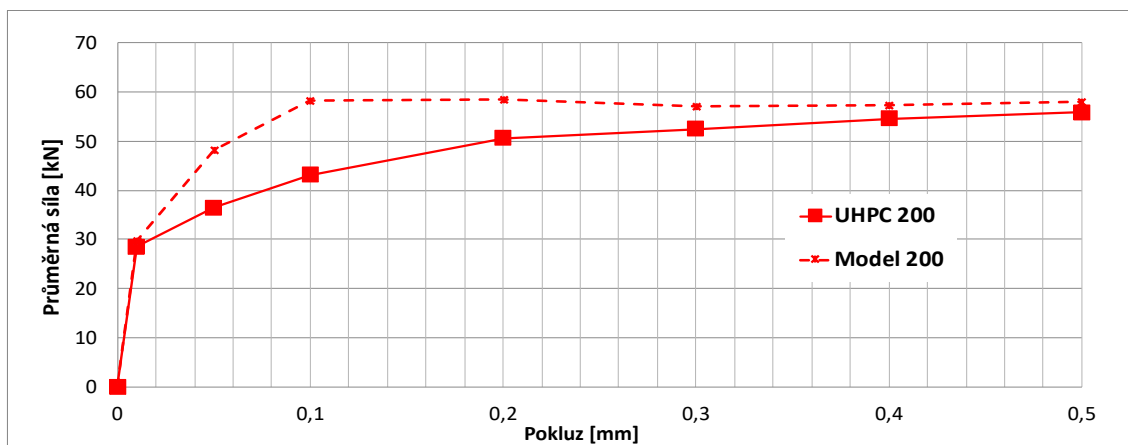
na 400 a 600 °C, kdy se sníží jak krychelná pevnost v tlaku, tak statický modul pružnosti. Tyto skutečnosti se výrazně projeví na průběhu vytažovacího testu. Výsledné průběhy testů vytažování ocelového prutu ze zkušební krychle z UHPC při referenční teplotě (cca 20 °C) a při teplotách 200, 400 a 600 °C jsou znázorněny v grafu 15. Porovnání výsledků numerických modelů a výsledků experimentálního měření znázorňují grafy 16-20.



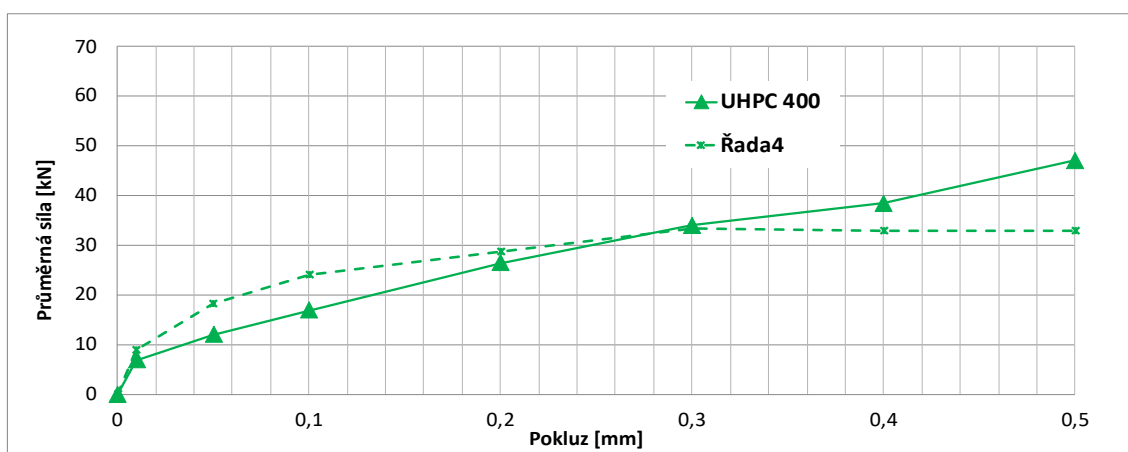
Graf 16 Průběhy testů vytažování při určitých teplotách UHPC z numerické analýzy



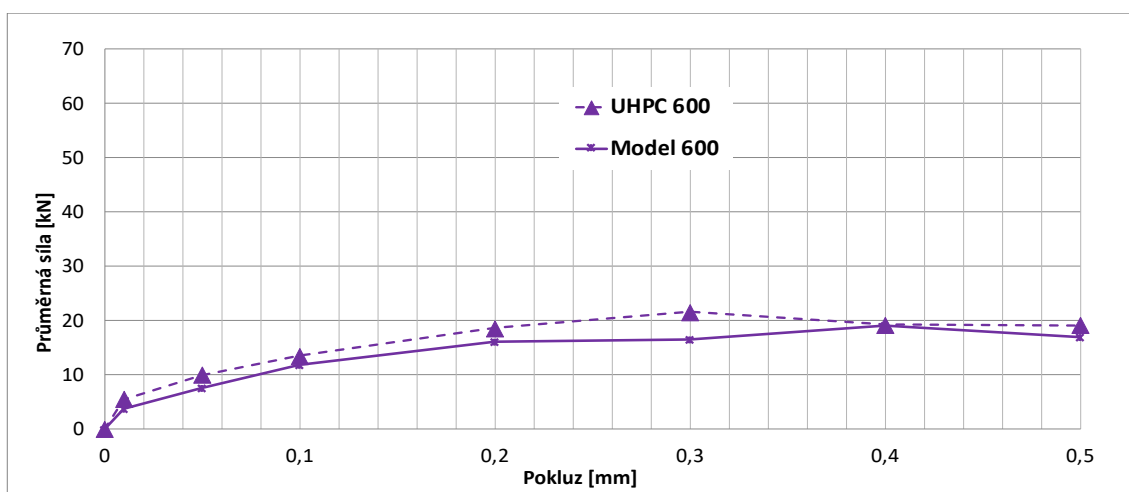
Graf 17 Porovnání výsledků numerického modelu a experimentu pro referenční vzorek



Graf 18 Porovnání výsledků numerického modelu a experimentu pro vzorek ohřátý na 200°C



Graf 19 Porovnání výsledků numerického modelu a experimentu pro vzorek ohřátý na 400°C



Graf 20 Porovnání výsledků numerického modelu a experimentu pro vzorek ohřátý na 600°C

Dílčí závěr:

Z numerické analýzy testu vytahování ocelového prutu z krychle z UHPC vyplývá, že soudržnost UHPC s ocelovým prutem je téměř totožná při referenční teplotě 20 °C a při zvýšené teplotě do 200 °C. Teprve při ohřátí na 400 a 600 °C se model soudržnosti změkčuje v závislosti na zvyšující se teplotě. Snížení soudržnosti koreluje se snížením materiálových parametrů matrice UHPC.

Z porovnání výsledků numerické analýzy a výsledků experimentu je zřejmá shoda numerického modelování a experimentálního chování všech vzorků ohřátých na příslušné teploty. Na základě numerických modelů soudržnosti UHPC s ocelí použitých v numerické analýze lze říci, že po vystavení UHPC teplotě do 200 °C se materiálové vlastnosti a soudržnost UHPC s ocelí prakticky nezmění. Snížení hodnot materiálových vlastností a únosnosti v soudržnosti UHPC s ocelí se projeví až při ohřátí UHPC na teploty cca 400 °C, 600 °C a vyšší. Zatímco při zahřátí UHPC na teplotu 400 °C a následném ochlazení se krychelná pevnost sníží o cca 10 % hodnot ve srovnání s pevností krychlí při referenční teplotě a teplotě 200 °C, modul pružnosti se sníží o více než 50 %. Vzorek UHPC zahřátý na 600 °C a následně ochlazený vykázal pokles krychelné pevnosti 30 až 35 %, ale pokles hodnoty modulu pružnosti až cca 70 %. Poklesy hodnot soudržnosti UHPC s ocelí vykazují podobnost spíše s modulem pružnosti, kdy mezi hodnotami soudržnosti pro teplotu 200 °C a teplotu 400 °C je pokles 70 až 90 %. Pro teplotu 600 °C je pak pokles hodnot soudržnosti 90 až 95 %. Největší pokles smykového napětí v soudržnosti tedy nastane mezi teplotami 200 °C a 400 °C, při teplotě vyšší než 400 °C je další pokles hodnot v závislosti na zvyšující se teplotě již mírnější.

Lze tedy konstatovat, že chování UHPC v soudržnosti s ocelí za běžných teplot lze pro analýzu konstrukce uvažovat až do zahřátí či vystavení konstrukce teplotám do 200°C. Pro konstrukce z UHPC vyztuženého předpínací výztuží vystavené teplotám vyšším než 200 °C se musí pokles hodnot soudržnosti zahrnout do statického návrhu či tato skutečnost řešit dalšími opatřeními.

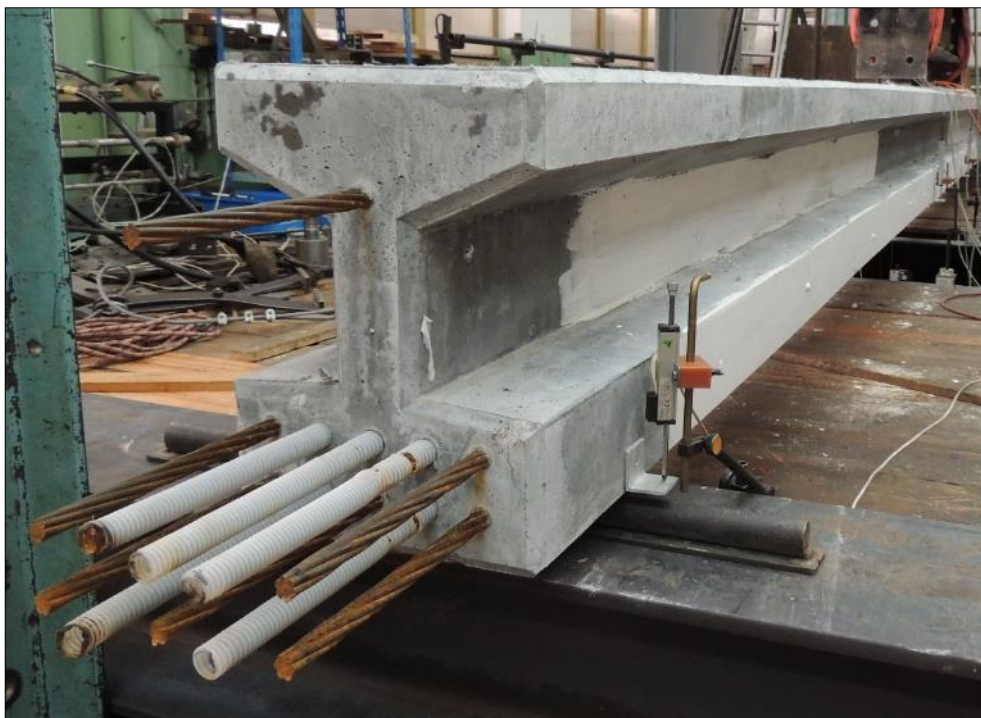
Tyto dílčí výsledky jsou podkladem pro náročnější simulace konstrukčních prvků a konstrukcí namáhaných zvýšenou teplotou, u kterých je experimentální zkouška komplikovaná či nemožná.

4.2.4 Soudržnost předpínací výztuže na koncích předepjatých vazníků z UHPC

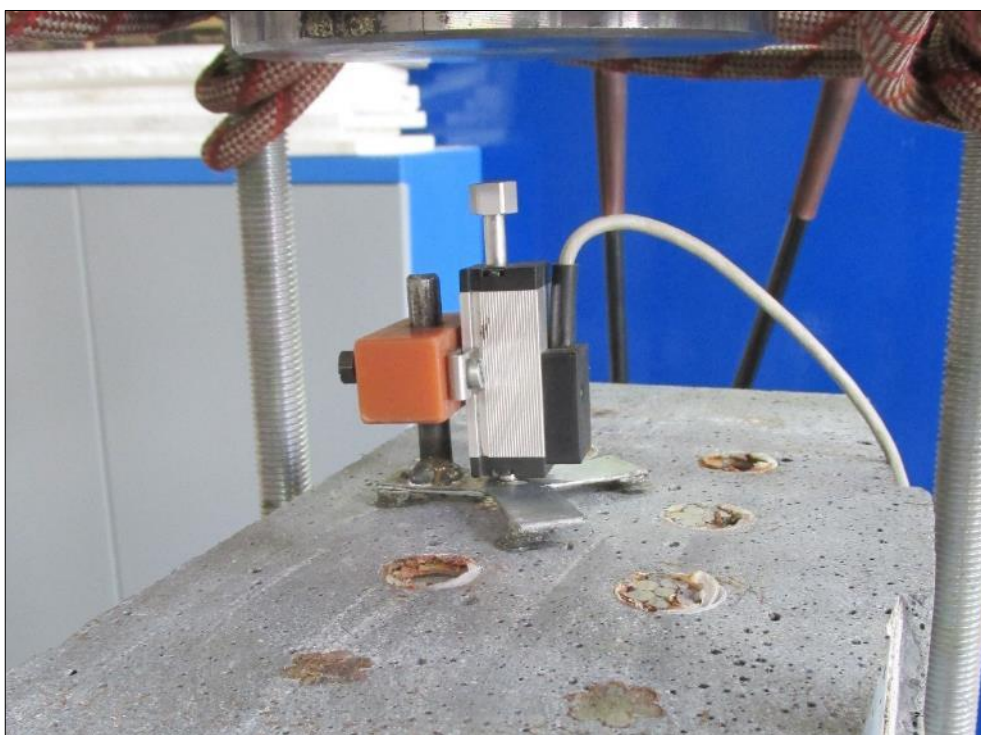
Všechny předcházející testy byly prováděny na nově vytvořených a vyrobených vzorcích pro zkoušky daných vlastností. To je v mnoha případech nejvhodnější možnost pro eliminaci vedlejších vlivů vstupujících do zkoušky. V případě, že je ale předpínací výztuž napnuta a zabetonována do konstrukce, lze očekávat po zavedení předpětí aktivace tangenciálních sil ve výztuži působící na okolní beton a tím i zvýšení smykového napětí. Lze tak pro předpínací výztuž predikovat vyšší hodnoty smykového napětí v soudržnosti u vzorků v konstrukci než u normových. Proto v další části experimentálního programu bylo provedeno právě toto ověření soudržnosti předpínací výztuže na vzorcích vyřezaných z reálné předem předpjeté konstrukce. Průměrné smykové napětí v soudržnosti bylo stanoveno na koncích lan předepjatých nosníků vyrobených z UHPC (obr.89). Nosníky nejprve zatěžované do porušení ve zkoušce ohybem byly po zkoušce nařezány a jejich konce s vystupující předpínací výztuží upraveny řezáním tak, aby mohla být jednotlivá lana vytahována obdobným postupem jako u normových těles – krychlí, popsanych v přecházející kapitole. Tyto testy byly doplňkem množství materiálových testů a cílem bylo informativní stanovení vlivu délky kotevní délky předpínací výztuže na průměrné smykové napětí ve smyku. Z každého nosníku byly po zkoušce v ohybu vybrány nepoškozené konce a vybrány vhodné výztuže pro následnou přípravu na pull out test (obr.91).

Při zkoušce je těleso s výztuží vloženo do ocelového zkušebního přípravku (klece), který se pomocí kloubového závěsu upevní do horní části zkušebního lisu. Delší konec zkoušené výztuže je při zkoušce vytahován čelistmi zkušebního stroje. Zkouška byla řízena posunem a byla přerušena po dosažení maximální síly, respektive po jejím znatelném poklesu. Rychlost zatěžování byla zvolena 0,05 mm/s.

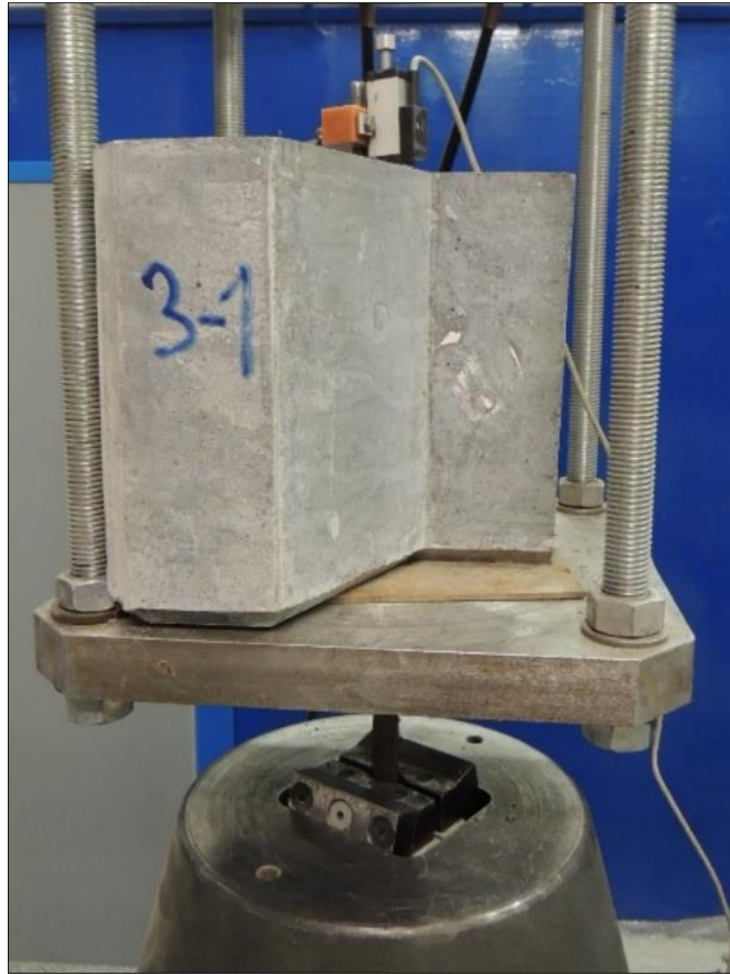
Výsledkem zkoušky je vyhodnocení jednak průběhu závislosti posunu nezatíženého konce zkoušené výztuže, jednak odvození maximálního napětí v soudržnosti výztuže s betonem a stanovení soudržnosti výztuže dle [2].



Obr. 89 Předpjatý I nosník, detail konců vystupujících předpínacích lan

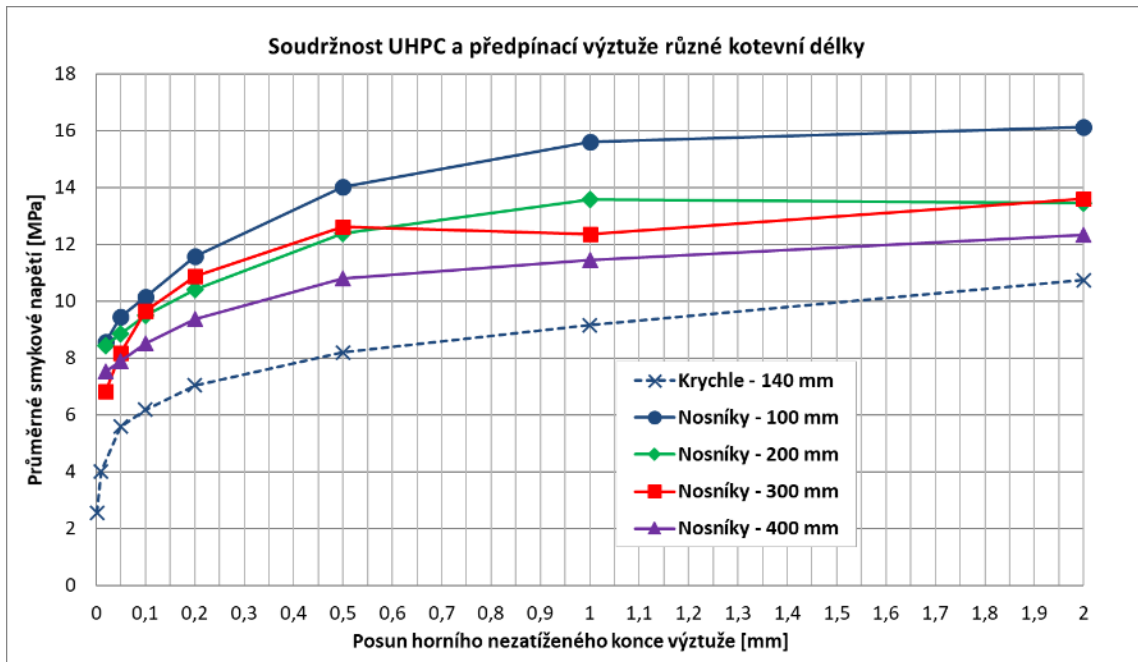


Obr. 90 Detail potenciometrického snímače dráhy na horní straně vzorku



Obr. 91 Umístění vzorku v zatěžovacím zařízení

Vzhledem k náročnosti výroby a omezeného množství nosníků bylo vybráno 2-5 vzorků od každé sady, která se lišila kotevní délkou výztuže (délkou zakrácení konců nosníků). Pro zkoušku muselo být vybráno omezené množství výztuží a ostatní zakráceny tak, aby bylo možné vložit prvek do zatěžovací klece. Zvolené kotevní délky byly 100, 200, 300 a 400 mm. Takto připravené vzorky byly zkoušeny obdobným způsobem jako normová tělesa pull out testem (obr.91). Zaznamenaná síla byla v tomto případě u každé sady přepočítávána na aktuální kotevní délku výztuže. Přehled průměrných hodnot smykových napětí u vzorků z UHPC (krychle a konce nosníků) a jejich vzájemné srovnání názorně zobrazuje následující graf 21.



Graf 21 Graf závislosti průměrných smykových napětí na posunu horního konce výztuže

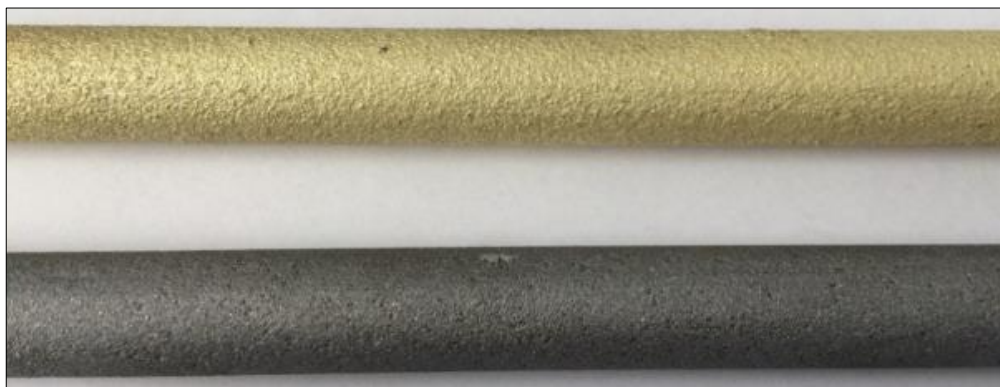
Dílčí závěr:

Pro zkoušku byly vzorky připraveny na pullout test a zkoušeny ve shodném schématu jako v případě normových zkoušek. V případě normových zkoušek byly dosaženy nižší hodnoty průměrných napětí v soudržnosti než v případě zabetonovaných předpínacích lan ve vzorku. Jedná se tedy o konzervativnější charakterizaci průběhu smykových napětí, která je dána pravděpodobně technologií betonáže nosníku oproti betonáži zkušební vzorku. V případě nosníku je lano před betonáží napnuto – dochází k příčnému zmenšení průřezu vlivem tahových napětí. Následně je předpínací lano zabetonováno a po určitém čase jsou konce lan přeříznuty a je vneseno předpětí do nosníku. Napětí ve výztuži je přeneseno do nosníku a výztuž má tendenci vrátit se do původního stavu. Tato příčná síla působí příznivě pro zvýšení soudržnosti a z tohoto důvodu jsou u všech vzorků dosaženy vyšší hodnoty průměrného smykového napětí v soudržnosti.

4.3 KOROZNÍ VLIVY NA SOUDRŽNOST VÝZTUŽE A UHPC

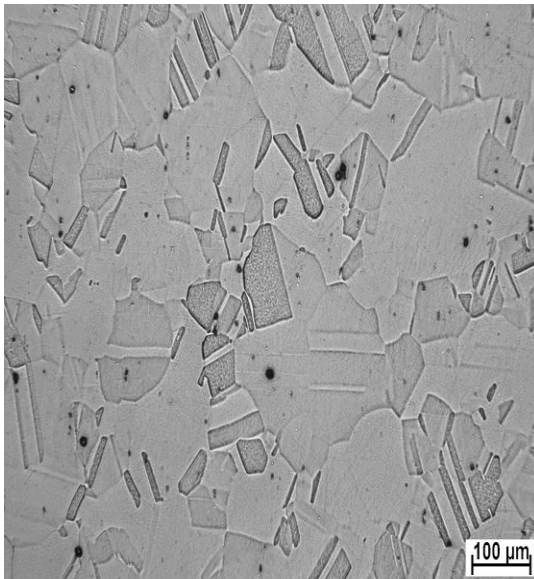
4.3.1 Korozní vlivy žárově povlakované výztuže mosazí na soudržnost s betonem a UHPC

Experimentální část výzkumu byla rozdělena na dvě části. V první části byla stanovena soudržnost výztuže s betonem pull-out testem. Zkoušeny byly 4 sady vzorků (4 vzorky v sadě). Ocelový prut bez povlaku (Obr. 92 dole) zabetonován v NSC a UHPC a ocelový prut s mosazným povlakem (Obr. 92 nahoře) zabetonován v NSC a UHPC. Metalizací mosazí byly povlakovány hladké ocelové pruty (třída 10 216) pro konvenční zkoušky soudržnosti výztuže s betonem. Pruty byly předem opískovány pro zajištění stejného stupně drsnosti. Složení aplikačního mosazného drátu bylo realizováno prostřednictvím XRF (bezkalibrační metoda; přístroj Axios- PANalytical s vyhodnocením v software Omnian). Zastoupení mědi (Cu) je 77% relativní hmotnosti, zinku (Zn) 22% a železa 0,4% relativní hmotnosti mosazného povlaku.

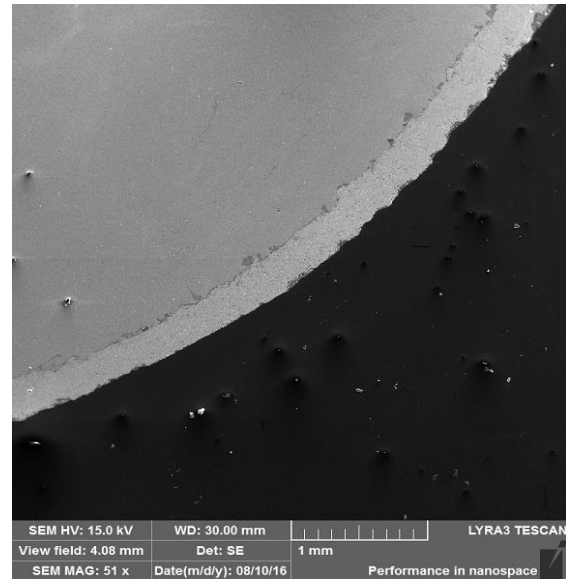


Obr. 92 Detail povrchu ocelového prutu s mosazným povlakem (nahore) a bez povlaku (dole)

Rovněž byla provedena metalografická analýza rozložení fází (broušení manuální na brusných papírech P60-P1500; leštění na diamantových pastách). Na obr. 33. je zachycen snímek rozložení fází v aplikované mosazi. Z uvedených výsledků je zřejmé, že se jedná o α -mosaz, tj. nasycený roztok zinku v mědi. Povlak byl detailně studován na elektronové mikroskopii s EDS analýzou realizované na přístroji TESCAN LYRA3. Referenční vzhled referenčního nepoškozeného povlaku na ocelovém prutu je zobrazen na obr. 34.



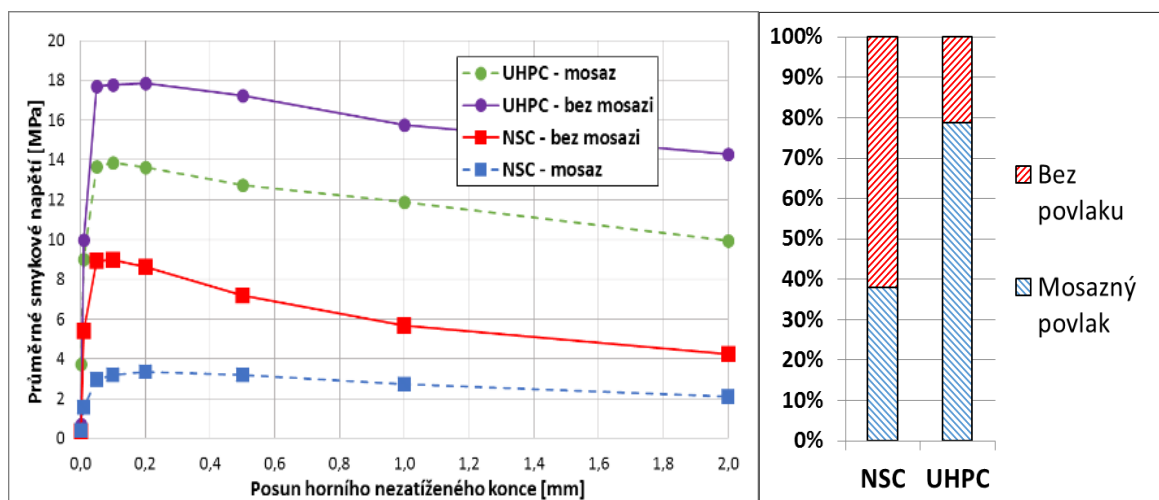
Obr. 93 Mikrostruktura mosazi z aplikačního drátu – optická mikroskopie



Obr. 94 Referenční vzhled nepoškozeného povlaku na ocelovém prutu

Výsledky měření

Zkoušky soudržnosti byly provedeny na všech sadách vzorků se shodnými okrajovými podmínkami. Výztuže průměru 12 mm byly vytahovány tahovou silou z krychlí o hraně 150 mm. V grafu 22 vlevo jsou zaznamenány závislosti průměrného smykového napětí na posunu horního nezátíženého konce výztuže. Graf 22 vpravo zobrazuje procentuální vyjádření maximálních průměrných napětí v soudržnosti u jednotlivých sad (100% jsou vždy hodnoty nepovlakované výztuže).

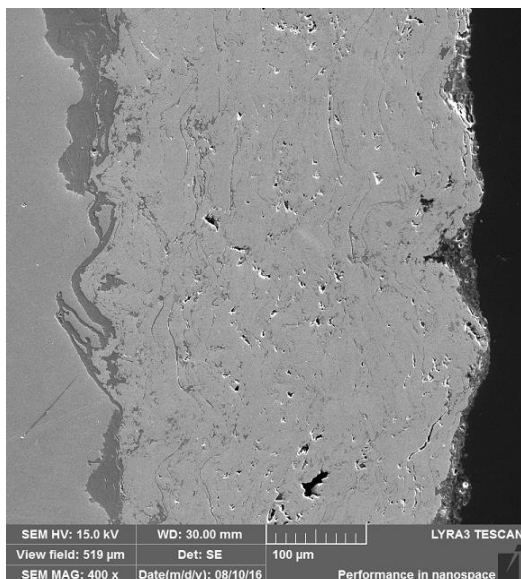


Graf 22 Diagram závislosti průměrného smykového napětí v závislosti na posunu horního konce výztuže a procentuální srovnání maximálních napětí

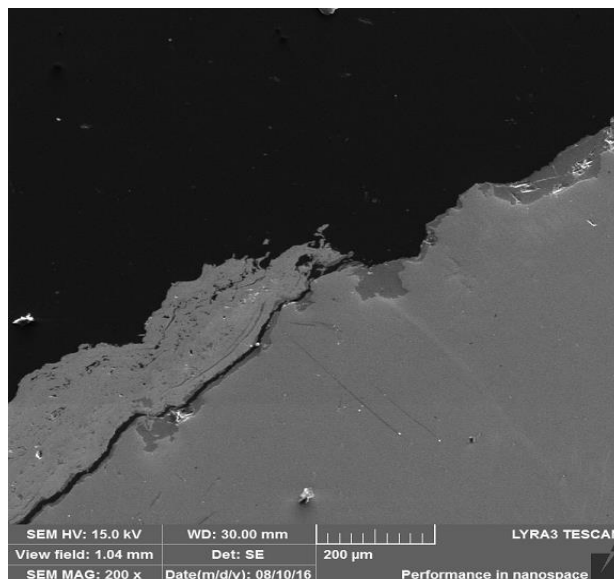
Před zkouškami soudržnosti byl mosazný povlak podroben detailní studii tloušťky a charakteru (Obr. 95.). Z Výsledků je zřejmý obvyklý splatový charakter povlaku (toto vykazují všechny metalizované povlaky) s průměrnou tloušťkou cca $300 \mu\text{m} \pm 30 \mu\text{m}$.

Zkoušky soudržnosti pull-out testem prokázaly jednak velmi výrazný rozdíl v dosahovaných maximálních hodnotách průměrného smykového napětí 9,1 MPa (NSC) a 17,1 MPa (UHPC) s výztuží bez povlaku a hodnot 3,5 MPa (NSC) a 14,1 MPa (UHPC) s výztuží s mosazným povlakem. Snížená soudržnost hladkého prutu s mosazným povlakem v betonu pevnostní třídy NCS (cca 38% max. hodnoty nepovlakované výztuže) lze obdobně jako u žárově zinkované výztuže vysvětlit korozí povlaku za vývoje vodíku v čerstvém a tvrdnoucím betonu. Alkalický elektrolit snadno proniká do kaveren mezi splaty a korozní poškození probíhá i v oblastech mimo externí povrch. Důsledkem může být desintegrace (odprýskávání povlaku) po zatížení (zkouška soudržnosti). Poškození povlaku vlivem koroze v betonu (v případě NSC) zobrazuje Obr. 96. Při EDS analýze byl nalezen vápník (ve formě precipitovaných korozních produktů – pravděpodobně zinečnanů, či vykrystalizovaného přebytku portlanditu $\text{Ca}(\text{OH})_2$ integrovaný částečně do povlaku). Tato skutečnost podporuje teorii o korozním napadení i vnitřních částí povlaku. Po rozlomení krychle bylo zkoumáno fázové rozhraní povlakovaná výztuž/beton a bylo ověřeno, že mosazný povlak v NSC koroduje za vývoje vodíků, který zvyšuje pórovitost cementového tmelu (obr. 97.). Tato skutečnost se rovněž podílí na snížení soudržnosti výztuže s betonem.

Naopak v případě obdobně povlakované výztuže s uložením do UHPC se podobně významné snížení soudržnosti neprokázalo. Soudržnost oceli s mosazným povlakem byla oproti NSC snížena u UHPC na cca 78%. Na detailu na obr. 98. je jednoznačně ukázáno, že povlak není tak významně korozně napaden. Ze snímků je zřejmé, že při zkoušce soudržnosti došlo k porušení soudržnosti v betonu nad hranicí povlaku (jedná se o lokální kohezní lom). Povlak není evidentně významně korozně poškozen a pravděpodobně nedošlo v čerstvém betonu k vývoji vodíku, jako tomu bylo u NSC.



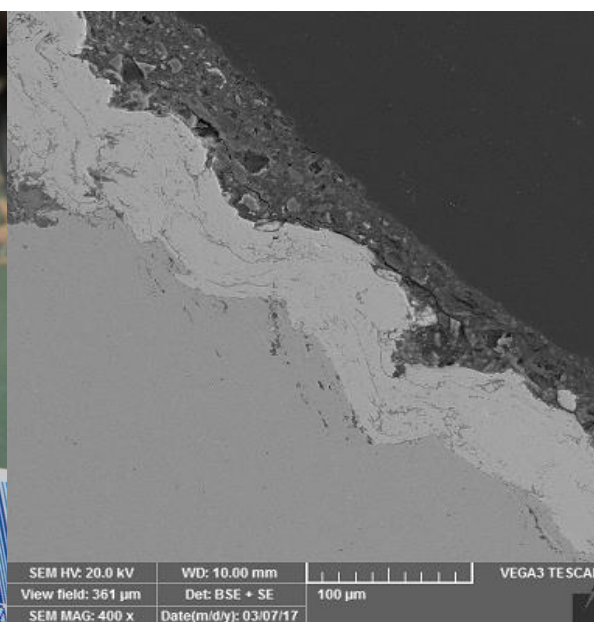
Obr. 95 Detail nepoškozeného povlaku na ocelovém prutu u vzorků před uložením do betonu



Obr. 96 Lokální odprýsknutí korozním poškozením narušeného povlaku mosazi po zkoušce soudržnosti (vzorek uložen v NSC)



Obr. 97 Fázové rozhraní povlakovaného prutu a betonu po zkoušce soudržnosti



Obr. 98 Detail povlaku na ocelovém prutu po zkoušce soudržnosti (vzorek uložen v UHPC)

Dílčí závěr

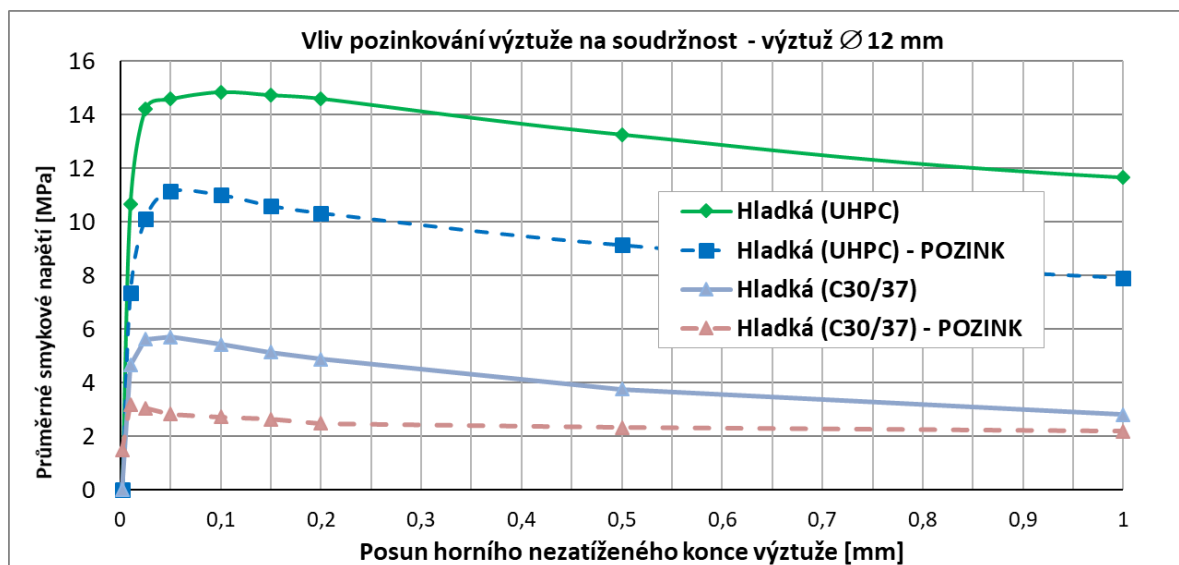
Experiment jednoznačně dokazuje očekávanou skutečnost, že koroze mosazného povlaku může negativně ovlivnit soudržnost povlakované výztuže s betonem běžné pevnostní třídy (tj. NSC). Za snížení soudržnosti zodpovídá koroze povlaku v čerstvém a tvrdnoucím betonu za vývoje vodíku a tvorbě krystalických korozních produktů. Vrstva těchto korozních produktů působí velmi negativně separačním účinkem, který má za následek ztrátu soudržnosti ocelového prutu v NSC. V případě aktuálních zkoušek až na cca 38%.

V případě uložení vzorků v UHPC se obdobně výrazné snížení soudržnosti vlivem koroze nepotvrdilo. Hodnoty průměrného smykového napětí v soudržnosti povlakované výztuže byly na úrovni cca 78%. Studium koroze mosazného povlaku po zkoušce soudržnosti byl pozorován značný rozdíl oproti povlaku v NSC. V případě UHPC pravděpodobně není v počáteční fázi tuhnutí betonu pórový roztok natolik alkalický, aby způsobil významnější korozní poškození. Nevzniká tak desintegrace povlaku vlivem korozních produktů a s ní spojená ztráta soudržnosti oceli. Motivací výzkumu bylo ověření neškodnosti použití mosazného povlaku rozptýlené výztuže ve velmi vysokohodnotných betonech. Tato skutečnost byla v úvodní části výzkumu podpořena jak mechanickým ověřením, tak mikroskopickou analýzou.

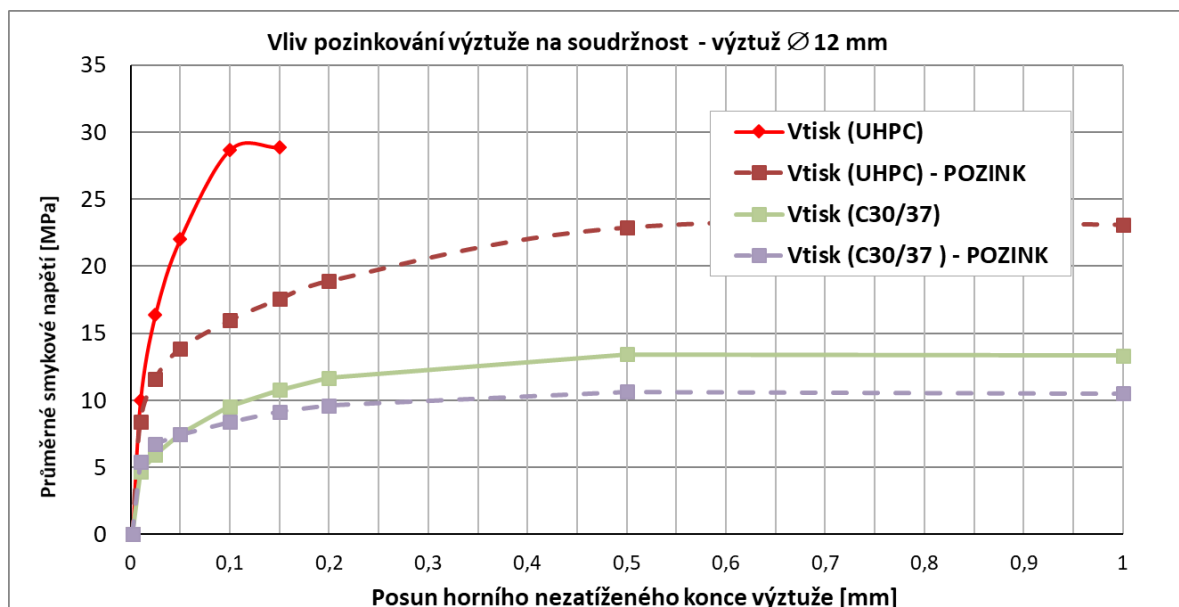
Nicméně je nutné poznamenat, že UHPC oproti NSC hydratuje déle (obsahuje vyšší množství konvenčního silikátového cementu), proto je nezbytné studovat průběh korozních procesů takto povlakované výztuže po delší časové periody. Dále je nezbytné studovat vliv vlhkosti (při uložení betonu) na korozní chování a soudržnost výztuže v betonu. K významnějšímu ověření závěrů je nezbytné rozšířit a statisticky upravit další experimenty.

4.3.2 Korozní vlivy žárově povlakované výztuže zinkem na soudržnost s betonem a UHPC

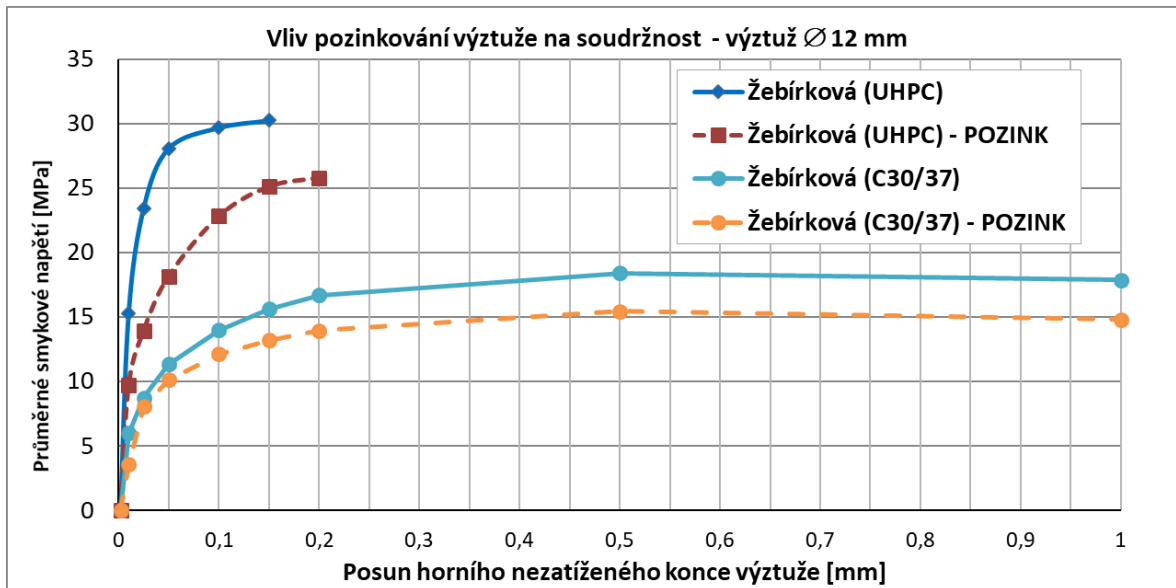
Stanovení vlivu žárového zinkování na soudržnost takto povlakované výztuže s UHPC byla zkoušena pull out testem stejně jako v předchozích případech. Zkoušeny byly sady vzorků po 4 vzorcích. Pro srovnání byly do grafů doplněny hodnoty ze zkoušek uvedených v kapitole 4.1.4. Žárové zinkování bylo provedeno na třech stejných typech výztuže – hladké výztuži, výztuži s vtiskem a žebírkové výztuži. Zkoušky probíhaly a za stejných okrajových podmínek. Srovnání soudržnosti nepovlakovaných výztuží s povlakovanými u obou druhů materiálu (beton C30/37 a UHPC) jsou uvedeny na následujících grafech 23 až 25:



Graf 23 Diagram závislosti průměrného smykového napětí v soudržnosti – hladká výztuž



Graf 24 Diagram závislosti průměrného smykového napětí v soudržnosti – výztuž s vtiskem



Graf 25 Diagram závislosti průměrného smykového napětí v soudržnosti – žebříková výztuž

Dílčí závěr

Zkoušky prokázaly obecně menší soudržnost pozinkované výztuže oproti nepozinkovaným výztužím v obou typech materiálu běžného betonu i UHPC. V případě soudržnosti hladké výztuže, kde hlavní složkou soudržnosti je právě smykové napětí byla snížena maximální hodnota smykového napětí o cca 25% v případě UHPC. Běžný beton vykazoval snížení o cca 40%. Maximální hodnota průměrného napětí v soudržnosti povlakované výztuže byla 3,5x vyšší než v případě běžného betonu. U zkoušek výztuže s vtiskem bylo ve variantě povlakované výztuže zinkem s UHPC dosaženo porušení v soudržnosti a vytažení výztuže. Maximální hodnota průměrného napětí v soudržnosti povlakované výztuže byla 2,1x vyšší než v případě běžného betonu. Běžný beton vykazoval snížení soudržnosti o cca 20% v případě pozinkovaných prutů. Zkoušky žebříkové výztuže povlakované zinkem prokázaly mírné snížení maximálních hodnot, v obou případech UHPC došlo k přetržení výztuže. U povlakované výztuže došlo k iniciaci pokluzu při nižších hodnotách smykového napětí. Zkoušky běžného betonu poukazují na snížení soudržnosti o cca 15%. Rozdíly mezi typy materiálů korelují s intencemi předchozích zkoušek.

4.3.3 Vliv protikorozi ochrany na soudržnost předpínací výztuže

V rámci experimentu byl také zkoumán jednak vliv protikorozi ochrany ocelové předpínací výztuže na její soudržnost s UHPC a také byl popsán rozdíl mezi soudržností UHPC a betonem C45/55.

U předpínaných konstrukcí se obvykle se předpokládá, že předpínací výztuž má určitou soudržnost s injektážní maltou a následně s betonem konstrukce. Z těchto předpokladů se vychází při stanovení napětí v předpínací výztuži v provozních stavech i v mezních stavech únosnosti. Běžně není povrch předpínací výztuže (předpínacích lan) nijak upravován. Po instalaci předpínacích lan do kabelových kanálků se konstrukce předepne a do dvou týdnů by se kanálky měly zainjektovat, aby během doby po instalaci do doby injektáže nedošlo ke korozi lan. V případě zimních období může nastat situace, že konstrukce promrzne a není možné kanálky včas zainjektovat. Proto se v zimním období opatřují předpínací lana ochranným nátěrem, který zajistí ochranu předpínací výztuže před korozi po dobu v řádu měsíců. V takovém případě není nutné s injektáží spíchat, lze počkat, až teploty vystoupají nad minimální požadované teploty a konstrukce se ohřeje a pak injektáž provést. Ochranné nátěry však snižují soudržnost předpínací výztuže s betonem, resp. s injektážní maltou. Přestože se ochranné nátěry používají již řadu let a nikdy nebyly zjištěny žádné problémy, není zcela jasné, jaký dopad má snížení soudržnosti na působení konstrukcí v mezních stavech. V případě výzkumu nového materiálu a jeho možností lze předpokládat v extrémních případech protikorozi opatření předem předpjatých konstrukcí.

V rámci experimentů byly zkoušeny 3 ks vzorků od každé varianty (2 typy materiálů a 3 druhy povrchu předpínací výztuže):

- ošetřená protikorozi ochranou typu Eskilut 125 NK Extra,
- ošetřená protikorozi ochranou typu Unigel 128F-1,
- neošetřená

Celkem bylo zkoušeno 18ks vzorků. Dále byly stanoveny materiálové vlastnosti (modul pružnosti, pevnost v tlaku) UHPC i betonu C45/55 na doprovodných tělesech.

Zkoušené typy protikorozní ochrany

Eskilut 125 NK Extra

Jedná se o nízkoviskózní minerální olej s ochrannými přísadami proti korozi. Protikorozní ochrana je klasifikována jako velice dobrá. Parametry protikorozní ochrany jsou:

<u>Opoždění</u>			<u>Stav oleje</u>		
železo Fe	mg/kg	2	viskozita 40°C	mm ² /s	3,06
chrom Cr	mg/kg	1	viskozita 100°C	mm ² /s	1,32
cín Sn	mg/kg	0	viskozitní index	-	-
hliník Al	mg/kg	2	oxidace	A/cm	-
nikl Ni	mg/kg	2	vzhled	-	typický
měď Cu	mg/kg	0			
olovo Pb	mg/kg	3			
molybden Mo	mg/kg	2	<u>Přísady</u>		
PQ index	mg/kg	OK	vápník Ca	mg/kg	534
			hořčík Mg	mg/kg	2
<u>Znečištění</u>			bor B	mg/kg	0
křemík Si	mg/kg	0	zinek Zn	mg/kg	3
draslík K	mg/kg	8	fosfor P	mg/kg	0
sodík Na	mg/kg	93	baryum Ba	mg/kg	48
voda	ppm	431			

Unigel 128F-1

Jedná se o tixotropní minerální olej s přísadami zajišťující excelentní dlouhodobou protikorozní ochranu. Specifikace je uvedena níže:

Properties	Specification	Test Method
Appearance	Translucent	Visual
Density (g/ml)	0.84 – 0.88	ASTM D1475
Flash point (°C)	>220	ASTM D92 / ISO 2592
Viscosity, 50 s ⁻¹ , 25°C (Pa.s)	2.3 – 2.8	CR Ramp 0-200 s ⁻¹
Oil separation, 24 hours (Wt %)	Zero	FTM 791(321) / DIN 51817
Oxidative Induction Time, 190°C (minutes)	>30	ASTM D3895
Oxidation Stability, 100h, 100°C (MPa)	<0.06	DIN 51 808
Oxidation Stability, 1000h, 100°C (MPa)	<0.2	DIN 51 808
Corrosion Protection 168 hrs, 35 °C		
Salt spray, 168 hrs, 35°C	Pass	NFX41-002
Distilled water spray, 168 hrs, 35°C	No corrosion	NFX41-002
Corrosion Test (EMCOR)	Grade 0,0	DIN 51802 -SKF
Water resistance, 20°C / 7days	Pass	UNIGEL
Content of Aggressive Elements Cl ⁻ , S ²⁻ , NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻	<10 ppm (0.001%)	NFM 07-023 analogue

Removal

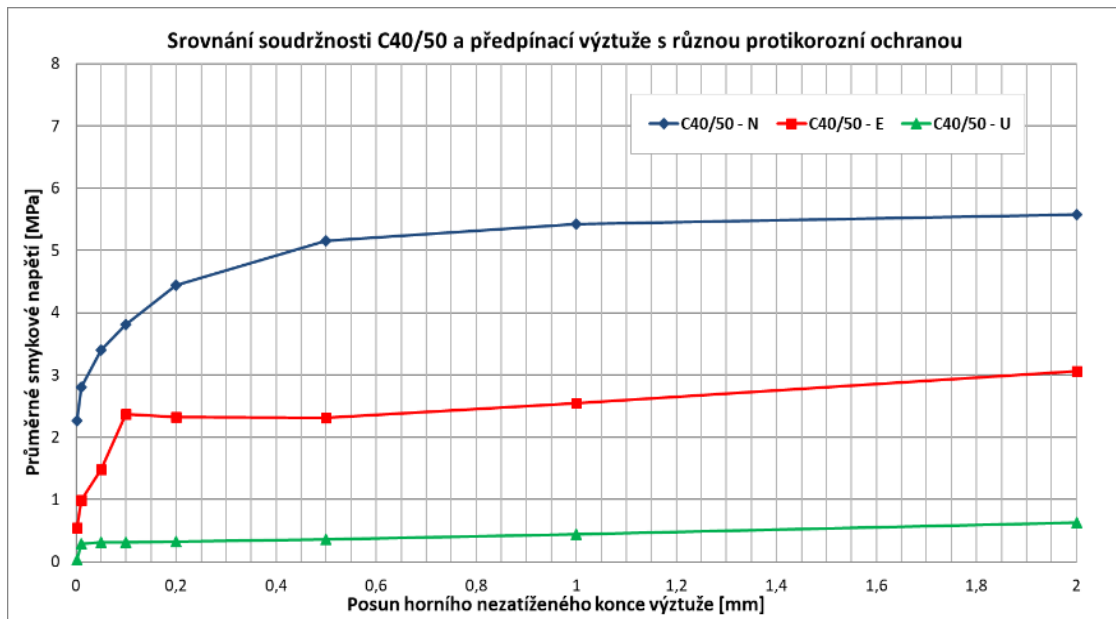
UNIGEL 128F-1 can be removed with mineral spirits and/or any petroleum solvent.

Processing

UNIGEL 128F-1 is formulated to be applied manually or via dipping. It is also easily pumped.

C40/50 a předpínací výztuž s protikorozní ochranou

Pro úvodní část experimentu byly vyrobeny a odzkoušeny jednotlivé sady vzorků z betonu C50/60 po třech kusech od každého zkoumaného povrchu předpínací výztuže. Průběh závislosti průměrného smykového napětí na posunu horního nezatiženého konce výztuže je zobrazen na grafu 26.



Graf 26 Srovnání průměrného smykového napětí – C40/50 a předpínací výztuž s různým typem povrchu

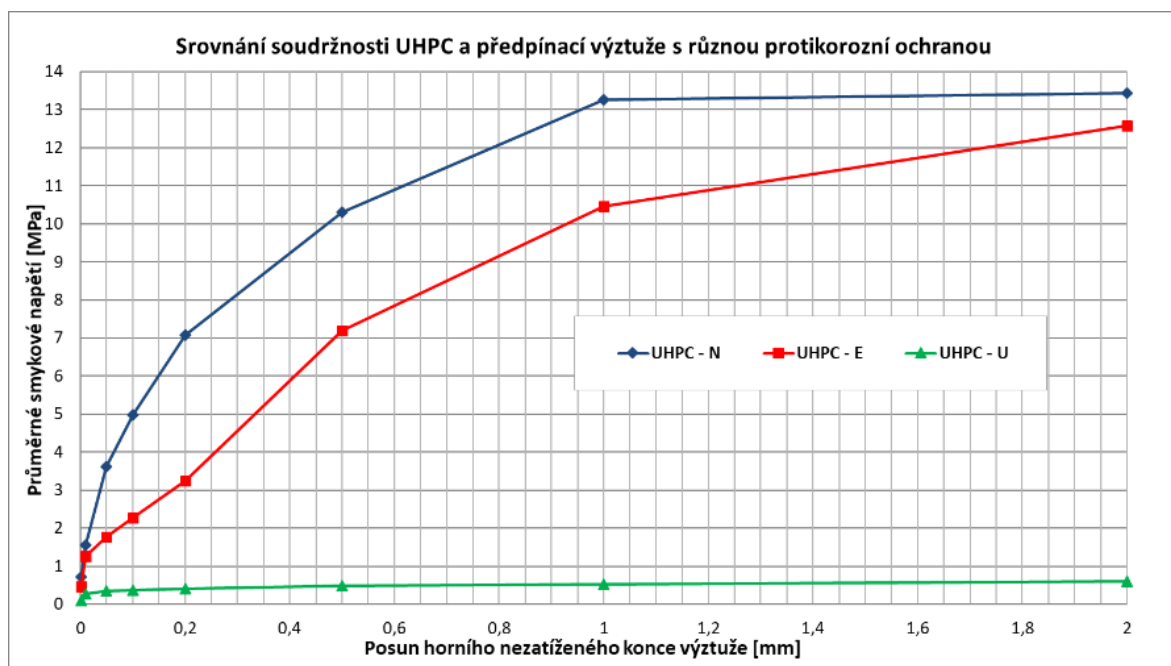
Grafy ukazují vliv jednotlivých protikorozních ochranných typů na snížení průměrných napětí v soudržnosti výztuže s betonem C40/50. Tento vliv je patrný i z charakteru porušení vzorku, respektive okolí vytahované výztuže při zkoušce. U vzorků s předpínací výztuží bez protikorozní ochrany došlo k rozrušení okolí betonu u spodního konce výztuže (obr. 99 - vlevo). Oproti tomu u vzorků s předpínací výztuží opatřenou protikorozní ochranou typu E bylo zjištěno výrazně menší porušení okolního betonu. Žádné známky poškození okolního UHPC vykazovaly vzorky s protikorozní ochranou typu U, kde došlo k hladkému vytažení výztuže (Obr. 99 - vpravo).



Obr. 99 Detail porušení vzorku z C40/50 bez protikorozní ochrany (vlevo), s protikorozní ochranou typu U (vpravo)

UHPC a předpínací výztuž s protikorozní ochranou

Stejný rozsah experimentálních vzorků byl zvolen pro stanovení vlivu protikorozní ochrany na smykové napětí v soudržnosti předpínací výztuže s UHPC. Byly vyrobeny a odzkoušeny jednotlivé sady vzorků po třech kusech. Průběh závislosti průměrného smykového napětí na posunu horního nezátíženého konce výztuže je zobrazen na grafu 27.



Graf 27 Srovnání průměrného smykového napětí – UHPC a předpínací výztuž s různým typem povrchu

Z grafu je patrná velmi malá soudržnost předpínací výztuže s protikorozní ochranou typu U stejně jako tomu bylo u běžného betonu C40/50. Hodnoty průměrného smykového napětí u této protikorozní ochrany dosahují velmi podobných hodnot u obou materiálů. Naopak u UHPC je patrný nižší poměr mezi smykovým napětím u protikorozní ochrany typu E a výztuže bez ochrany. Vliv protikorozní ochrany typu E se při vyšších hodnotách posunu výztuže ztrácí.

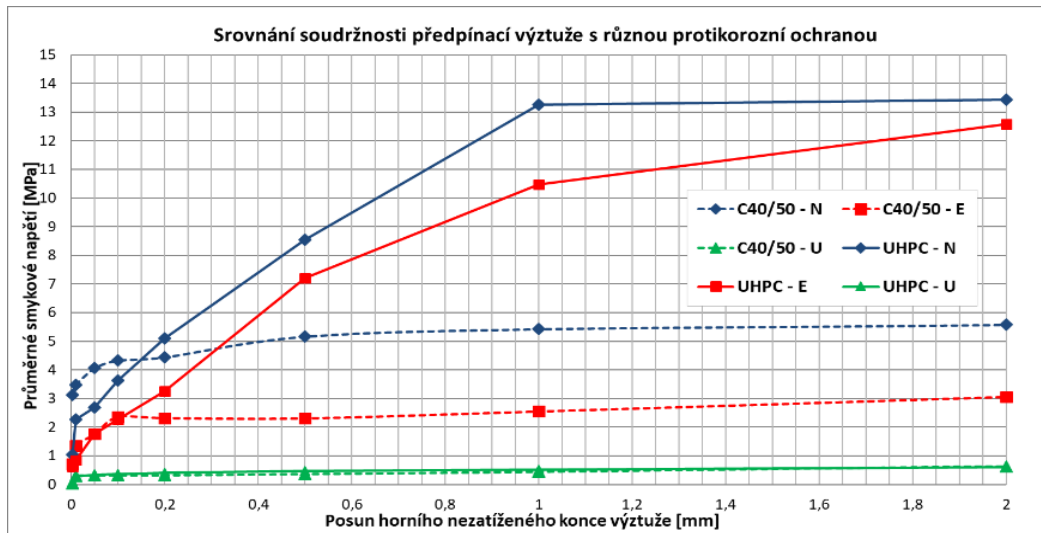


Obr. 100 Detail porušení vzorku z UHPC bez protikorozní ochrany (vlevo), s protikorozní ochranou typu U (vpravo)

Z charakteru porušení vzorků je patrný stejný vliv protikorozní ochrany na snížení smykové únosnosti v soudržnosti jako tomu bylo u vzorků z běžného betonu C40/50. U vzorků s předpínací výztuží bez protikorozní ochrany došlo k rozrušení okolí betonu u spodního konce výztuže (obr. 100 - vlevo). Oproti tomu u vzorků s předpínací výztuží opatřenou protikorozní ochranou typu E bylo zjištěno výrazně menší porušení okolního betonu. Žádné známky poškození okolního UHPC vykazovaly vzorky s protikorozní ochranou typu U, kde došlo k hladkému vytažení výztuže (Obr. 100 - vpravo).

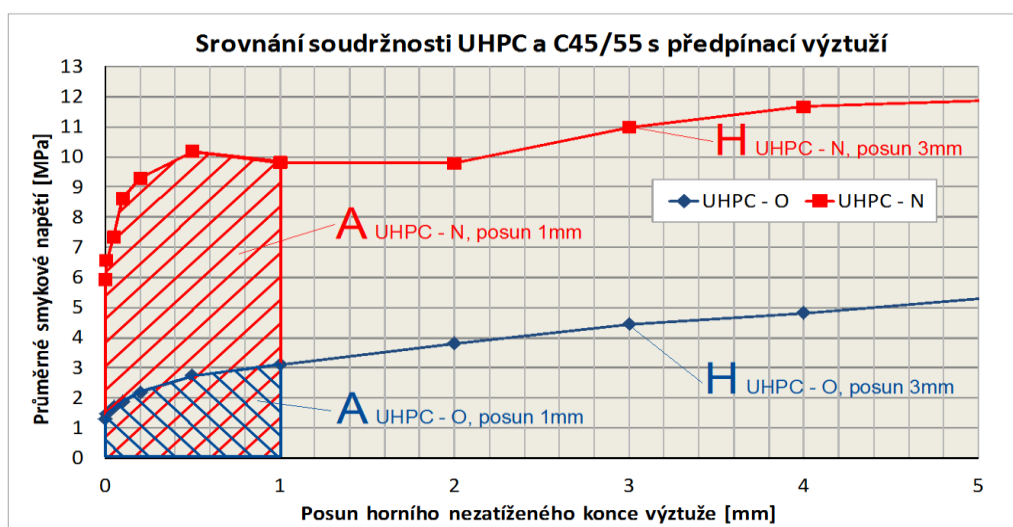
Porovnání všech zkoušených variant

Výsledkem experimentu bylo závěrečné porovnání všech variant – průběhů průměrných smykových napětí v soudržnosti dvou materiálů (UHPC a C40/50) a 3 druhů povrchu předpínací výztuže (bez protikorozní ochrany, s protikorozní ochranou typu E a protikorozní ochranou typu U). Všechny tyto varianty jsou přehledně zobrazeny v grafu 28.



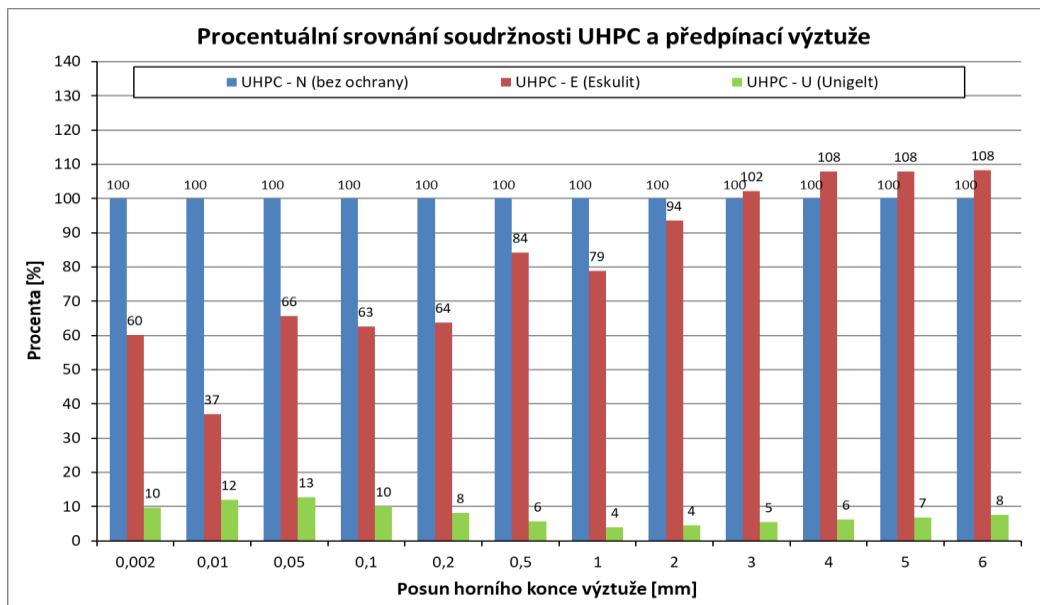
Graf 28 Srovnání průměrného smykového napětí – UHPC a beton C40/50 (3 typy povrchu výztuže)

Na základě změřených a vypočtených hodnoty byly vyhodnoceny procentuální poměry mezi jednotlivými zkoušenými variantami. Byly uvažovány dva způsoby srovnání různých variant. Jako první byly porovnávány hodnoty průměrného smykového napětí v soudržnosti v jednotlivých hodnotách posunu. V druhém případě byly vypočteny plochy pod jednotlivými zjednodušenými křivkami předchozích grafů (integrály). Tyto plochy byly dány do poměru tak, aby výsledkem bylo procentuální vyčíslení. Graficky jsou tyto uvažované způsoby naznačeny na obrázku 8, kde H označují jednotlivé hodnoty a A představují plochy pod jednotlivými křivkami. Jako referenční vzorky (100%) byly uvažovány vzorky z betonu C40/50 s výztuží bez protikorozií ochrany.

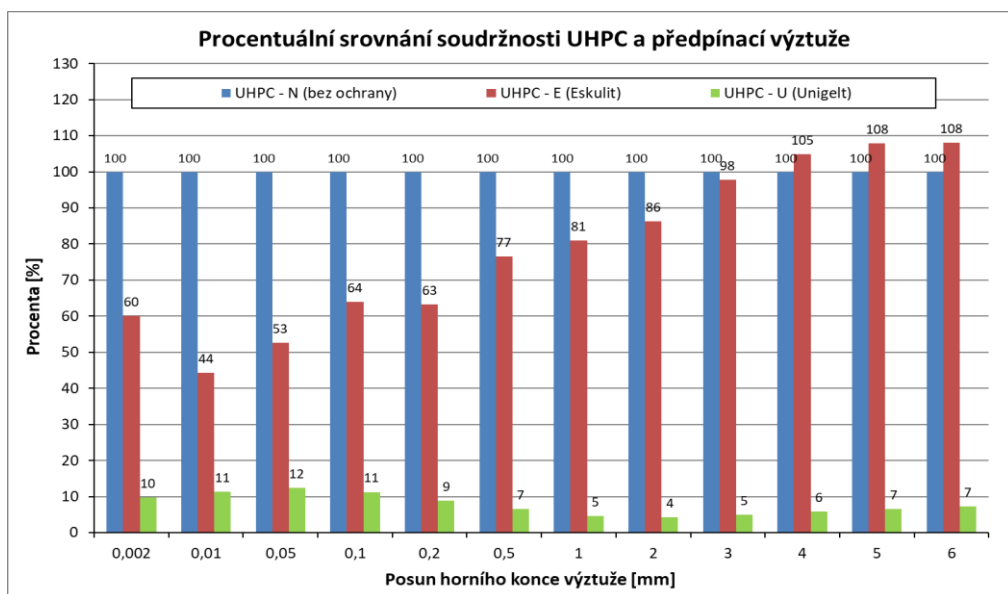


Graf 29 Grafická interpretace procentuálního vyhodnocení variant

Následující grafy zobrazují jednotlivé procentuální poměry mezi zkoušenými variantami až do posunu 6 mm. Při takovýchto velkých hodnotách posunu se již nejedná v celé míře o smykové napětí v soudržnosti, ale jde o napětí ve tření a v případě předpínací výztuže má vysoký vliv také zmiňované šroubovitě zapletení lana. V rámci jednoznačného číselného porovnání všech variant je brána v úvahu mez soudržnosti, definovaná v normě ČSN 73 1328 jako hodnota smykového napětí při posunu výztuže o 0,001-0,002 mm. Jedná se tedy o porovnání úvodních měřených hodnot (0,002 mm), při kterém je aktivován pokluz výztuže. Srovnání jsou uvedena v grafech 30 a 31.



Graf 30 Procentuální srovnání soudržností – hodnoty průměrného smykového napětí



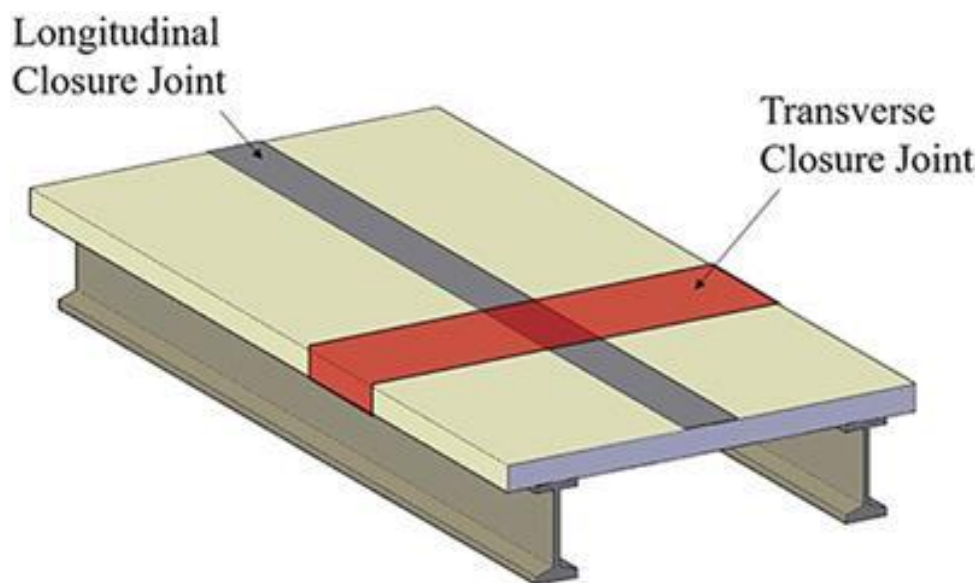
Graf 31 Graf srovnání procentuálního srovnání soudržností – integrály křivek

Dílčí závěr

Z charakteru porušení vzorků je patrný vliv protikorozi ochrany na snížení smykové únosnosti v soudržnosti. U vzorků s předpínací výztuží bez protikorozi ochrany došlo k rozrušení okolí betonu u spodního konce výztuže. Oproti tomu u vzorků s předpínací výztuží opatřenou protikorozi ochranou bylo zjištěno výrazně menší porušení okolního betonu nebo došlo k hladkému vytažení výztuže bez porušení okolního betonu. U všech vzorků (z UHPC i běžného betonu C40/50) byla zaznamenána tendence vzrůstajícího průměrného smykového napětí v soudržnosti po počátečním pokluzu. Tato skutečnost byla způsobena tím, že předpínací lana jsou šroubovitě zapletena a při vytahování výztuže z krychle dochází k jejich šroubovitému vytahování. Vzhledem k velké hodnotě tahové síly je ve zkušebním zařízení i přes umožnění minimální rotace právě tomuto šroubovitému vytahování zabráněno. Při vyšších hodnotách posunu tak byl zaznamenán postupný nárůst tahové síly. Na základě změřených a vypočtených hodnot byly vyhodnoceny procentuální poměry mezi jednotlivými zkoušenými variantami. Jako referenční vzorky (100%) byly uvažovány vzorky z betonu UHPC (případně C40/50) s výztuží bez protikorozi ochrany. U vzorků z UHPC byla zjištěna výrazně vyšší soudržnost než u běžného betonu. Zajímavým faktem byla skutečnost, že u UHPC došlo při vyšších hodnotách posunu výztuže k srovnání hodnot průměrného smykového napětí v soudržnosti u výztuže bez protikorozi ochrany a u výztuže s protikorozi ochranou typu E. U běžného betonu C40/50 byly tyto hodnoty, respektive poměry odlišné. Naopak u protikorozi ochrany typu U byla výsledná soudržnost obdobná pro oba materiály. Jednotlivé druhy protikorozi ochrany mají vliv na výslednou soudržnost předpínací výztuže – tento vliv ale nemusí být stejný pro rozdílné betony, v tomto případě byla tato skutečnost zjištěna pro C40/50 a UHPC. V konkrétním případě byly v případě protikorozi ochrany E zaznamenány hodnoty soudržnosti při pokluzu 0,002 mm – 23% a 0,1 mm – 55% pro běžný beton a 60% a 63% pro UHPC. U protikorozi ochrany typu U byly stanoveny hodnoty při pokluzu 0,002 mm – 1% a 0,1 mm – 7% pro běžný beton a 10% a 10% pro UHPC. Ve všech případech byl u UHPC zaznamenán větší poměr hodnot průměrných smykových napětí v soudržnosti výztuže s protikorozi ochranou a neochráněným lanem.

4.4 ANALÝZA FUNKCE PŘÍČNÉHO UHPC SPOJE

Experimentální ověření funkce spoje bylo provedeno na modelech prefabrikovaných desek navržených s využitím úvodních výsledků zkoušek soudržnosti. Návrh vychází z typického příčného spoje mostovkových dílců v příčném směru a nebo v podélném směru mimo hlavní nosníky. V těchto případech ve spoji prochází pouze ohybová výztuž z obou spojovaných prefabrikátů. Spoj je namáhán zejména na ohyb. Dílčí experimenty byly prováděny společně s Ing. Pavlem Jursíkem, Ph.D, který měl na starosti výkresovou dokumentaci a ve své práci se zaměřil zejména na numerické výpočty vzájemných posunů ocel/UHPC a účinnost spřažení.

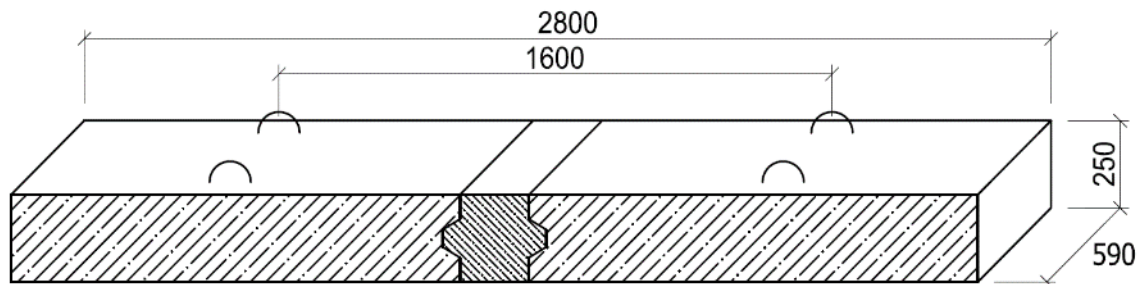


Obr. 101 Schema prefabrikátů s UHPC spojem [106]

Z hlediska návrhu spoje bylo důležitým faktorem zvolení optimálního rozměru a poměru vůči reálné konstrukci. Smyslem a motivací všech experimentů je se co nejvíce přiblížit reálným rozměrům a technologickým postupům při ukládání UHPC, který je zejména v případě využití rozptýlené výztuže ve formě drátků fatální z hlediska finální únosnosti a chování prvku. Jak výroba prefabrikátů tak i uložení UHPC bylo řešeno v podmínkách charakteristických pro běžné betonáže. Ošetřování vzorků bylo zvoleno také s ohledem na budoucí aplikaci na reálné konstrukci.

4.4.1 UHPC spoj prefabrikovaných desek

Na základě vynikajících výsledků zkoušek soudržnosti výztuže byl navržen experimentální model spoje z UHPC prefabrikovaných desek vyrobených z běžného betonu, představující detail prefabrikované mostovky ocelobetonového spřaženého mostu.

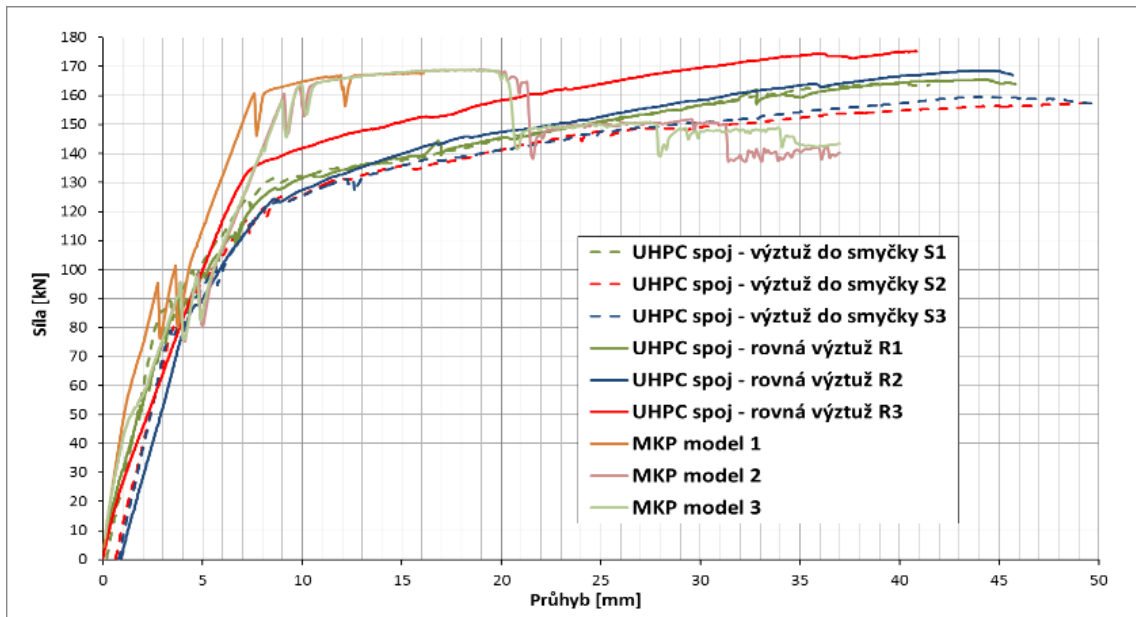


Obr. 102 Schema prefabrikátů s UHPC spojem

Spoj byl při zkouškách vystaven tříbodovému ohybovému namáhání a bylo zkoumáno působení spoje z UHPC při rostoucím ohybovém momentu až do kolapsu při dvou různých způsobech vyztužení spoje (výztuž do smyčky-tzv. petlicový spoj, rovná výztuž – obr 103). Petlicový spoj představoval prakticky fixní spojení vzhledem k nemožnosti porušení spoje v soudržnosti (vytržením). Srovnání průběhů závislosti síly na průhybu uprostřed je zobrazeno na grafu 32.



Obr. 103 Dvě varianty uspořádání výztuže ve spoji prefabrikátů



Graf 32 Porovnání odezvy vzorků po cyklování až do dosažení únosnosti

Tabulka 2: Výsledné hodnoty z 3 bodového ohybu vzorků

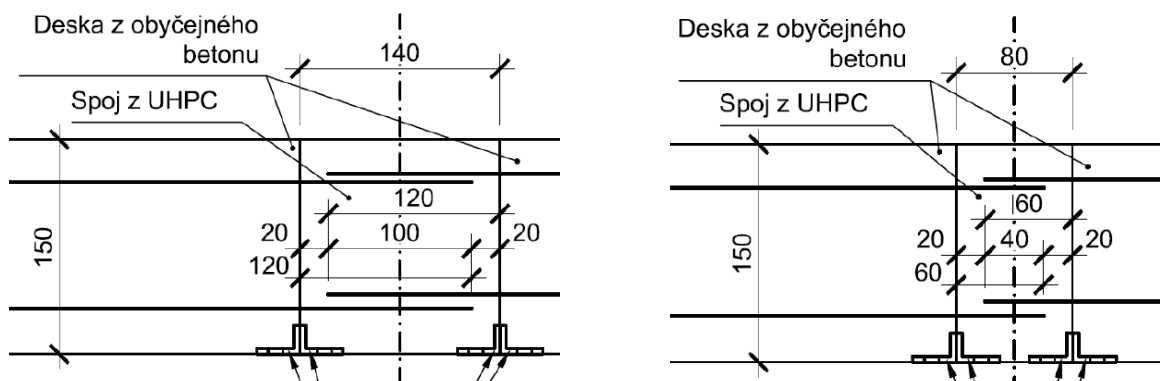
Číslo panelu	Zatížení při vzniku první trhliny [kN]	Ohybový moment ve středu rozpětí [kNm/m]	Místo vzniku první trhliny	Šířka trhliny při zatížení 75 kN [mm]	Maximální dosažené zatížení [kN]	Ohybový moment ve středu rozpětí [kNm/m]
R1	40,0	41,7	rozhraní betonů a pod krajem oc. desky	0,2	167,5	174,5
R2	35,0	36,5	rozhraní betonů	0,25	168,5	175,5
R3	38,0	39,6	rozhraní betonů a pod krajem oc. desky	0,3	177,2	184,6
Průměr R	37,7	39,2		0,25	171,1	178,2
S1	45,0	46,9	rozhraní betonů	0,1	164,1	171,0
S2	36,0	37,5	rozhraní betonů	0,15	157,4	163,9
S3	40,0	41,7	rozhraní betonů	0,15	159,6	166,3
Průměr S	40,3	42,0		0,13	160,4	167,1
Celkový průměr	39,0	40,6		0,19	165,7	172,6

Dílčí závěr

Vzorky byly zatěžovány cyklicky na cca $\frac{1}{2}$ jejich celkové únosnosti (75 kN). Závěrečným cyklem byl vzorek zatěžován až do kolapsu. Průběh zkoušky byl u všech vzorků velmi obdobný (graf 32). Nedošlo ke vzniku trhlin ve spoji z UHPC a kolaps panelů byl zapříčiněn rozevíráním hlavních trhlin v okolí UHPC spoje, nebo na rozhraní obou betonů. Při zatížení 75 kN byly pozorovány trhliny šířky max. 0,3 mm. Při zkouškách do dosažení únosnosti prvku nikdy nedošlo k porušení vzorku v soudržnosti výztuže zakotvené v UHPC spoji - byla tak ověřena spolehlivost přenesení tahové síly z výztuže do betonu při její redukované kotevní délce.

4.4.2 Krátkodobé zkoušky optimalizovaných spojů prefabrikovaných desek

V další fázi experimentálního výzkumu byly předešlé zkoušky modifikovány a rozměr UHPC spoje ještě více zredukován na šířku 140 a 80 mm. Hlavním motivem zkoušek bylo popsání chování takového spoje jak v krátkodobých, tak v dlouhodobých zkouškách. Experiment byl proveden jako zkouška nosníku ve 4 bodovém ohybu. Zkušební vzorek je navržen jako železobetonová deska o rozměrech 3,8x0,5x0,15 m, kde uprostřed délky je navržen spoj s krátkým přesahem betonářské výztuže. Rozměry vzorků byly zvoleny tak aby co nejvíce odpovídaly reálným rozměrům mostovky. U zkušebních vzorků se spojem byly obě krajní části z běžného betonu vyrobeny v předstihu tak aby mohl být následně dobetonován UHPC spoj. Jednotlivá schemata jsou uvedena u jednotlivých typů. Přesahy výztuží byly zvoleny s přihlédnutím z výsledkům předchozích zkoušek, a to pro spoj o šířce 80 mm byly přesahy výztuží 5x průměr prutu (60 mm) a u spoje šířky 140 mm byly přesahy výztuží 10x průměr prutu (120 mm).

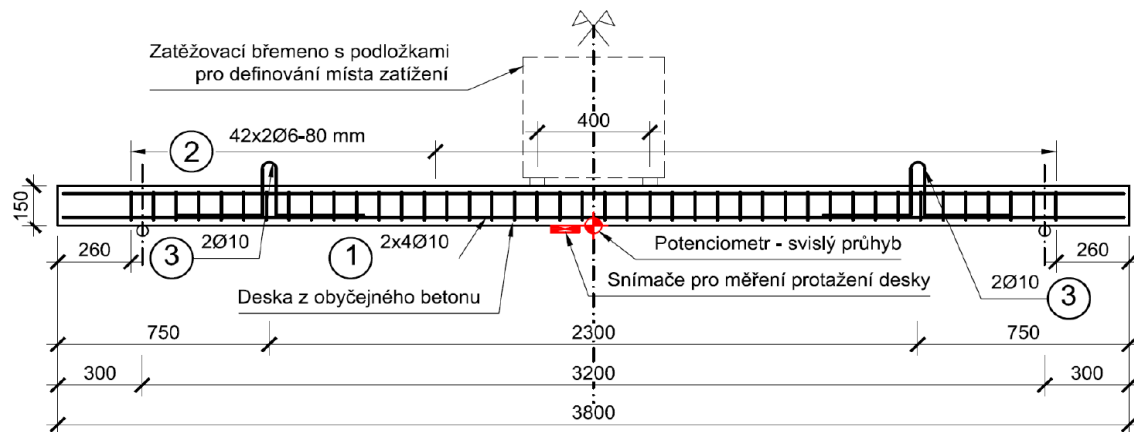


Obr. 104 Schema rozložení výztuže ve variantě většího (vlevo) a menšího spoje (pravo)

Výztuž ve všech variantách desek byla navržena shodně, pouze u variant s UHPC spojem byly ve spoji řešeny přesahy výztuží viz schémata na obrázku 104. Celkem bylo vyrobeno 9 kusů nosníků. Od každé varianty byly na krátkodobé zkoušky využity vždy 2 nosníky. Zbýlý 1 kus od každého byl ponechán na dlouhodobé zkoušky.

Cílem zkoušky a celého experimentu bylo vzájemné srovnání jednotlivých variant a zhodnocení charakteru porušení (rozložení trhlin, způsob kolapsu). Ve všech případech bylo zkoušení prováděno na zatěžovacím roštu tak, že vzorky byly cyklovány (10 cyklů řízených silou) na hodnotu předpokládaného 50% zatížení a pak zkoušeny do porušení řízením posunem tak aby bylo možné zachytit i případnou sestupnou větev zatěžování.

Referenční nosník bez UHPC spoje



Obr. 105 Výkres referenčního nosníku



Obr. 106 Pohled na referenční nosník připravený na zkoušku



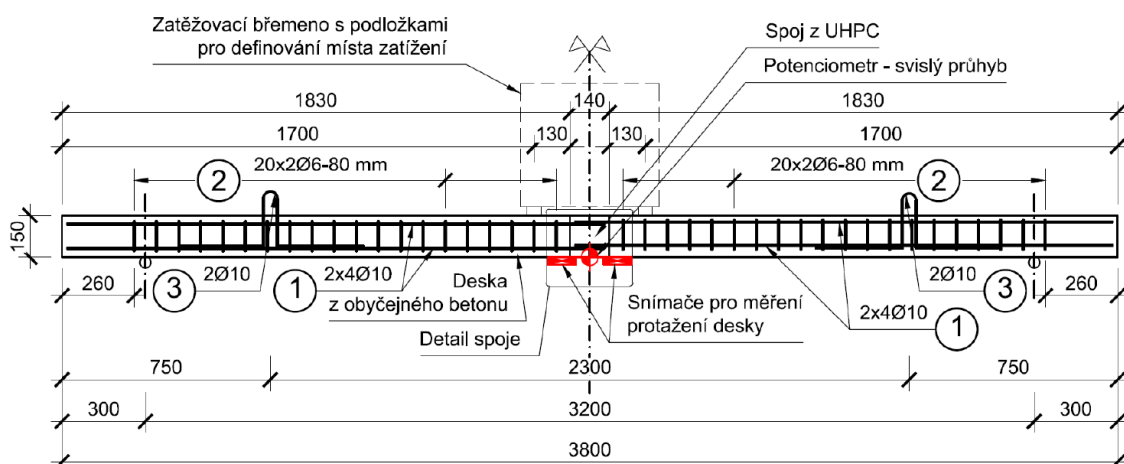
Obr. 107 Typické pravidelné rozložení trhlin vzorku zatíženého 4 bodovým ohybem



Obr. 108 Pohled na vzorek po dosažení MSÚ

U referenčních nosníků došlo k porušení v ohybu podrcením betonu v horní tlačené části průřezu. Rozložení trhlin na spodní straně prvku bylo pravidelné v rozmezích 100-200 mm. Průhyb byl měřen uprostřed rozpětí na obou stranách prvku tak, aby bylo případně měřeno i nerovnoměrné zatěžování prvku v příčném směru. Během zkoušky nedocházelo ke kroucení vzorku. Charakter průběhu zkoušky i porušení odpovídal predikovaným výsledkům a náležitostem ohybových zkoušek železobetonových prvků.

Nosník s UHPC spojem 140 mm



Obr. 109 Porovnání odezvy vzorků po cyklování až do dosažení únosnosti

U nosníku s UHPC spojem bylo měřeno přetvoření, respektive rozevření trhlin na spodní straně vzorku v místě spoje. Pro měření vodorovného pohybu v místě spoje byl na jednu stranu instalován potenciometrický snímač pracující na odměrné vzdálenosti 200 mm. Na protilehlé straně byly instalovány dva potenciometrické snímače pracující na odměrné vzdálenosti 100 a 100 mm. Pomocí těchto dvou měření bylo možné kontrolovat rozevření trhlin v místě spoje na obou stranách.



Obr. 110 Formy s připravenou výztuží

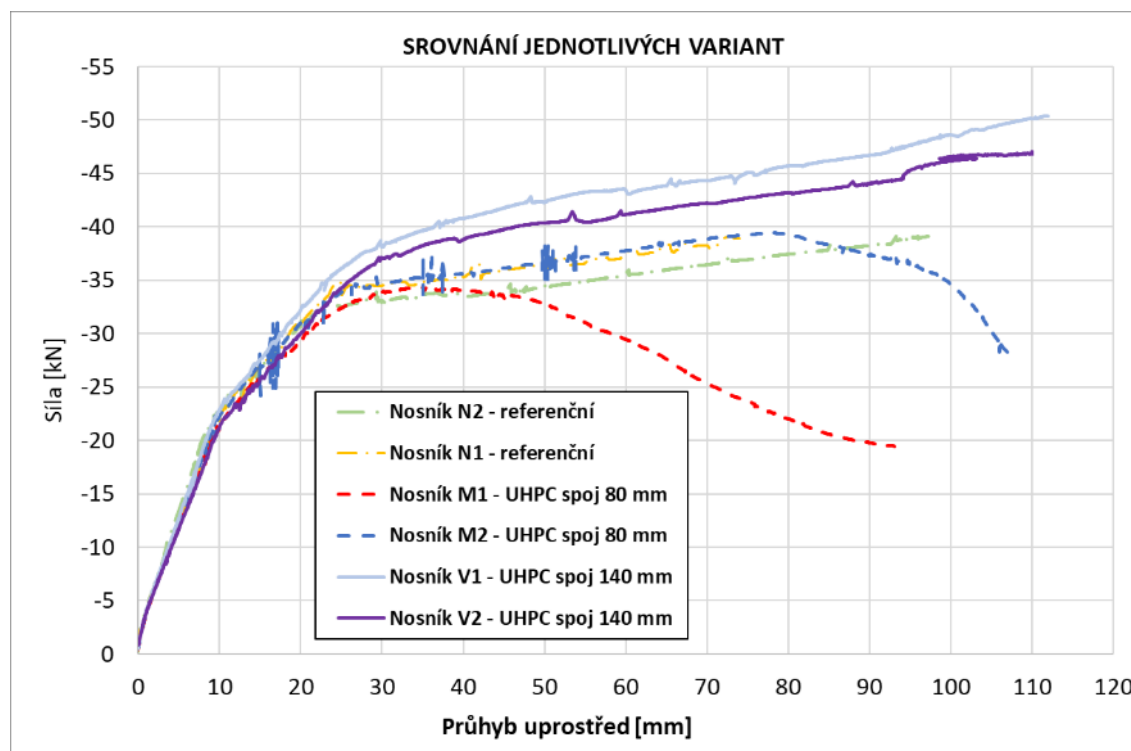


Obr. 111 Porovnání odezvy vzorků po cyklování až do dosažení únosnosti

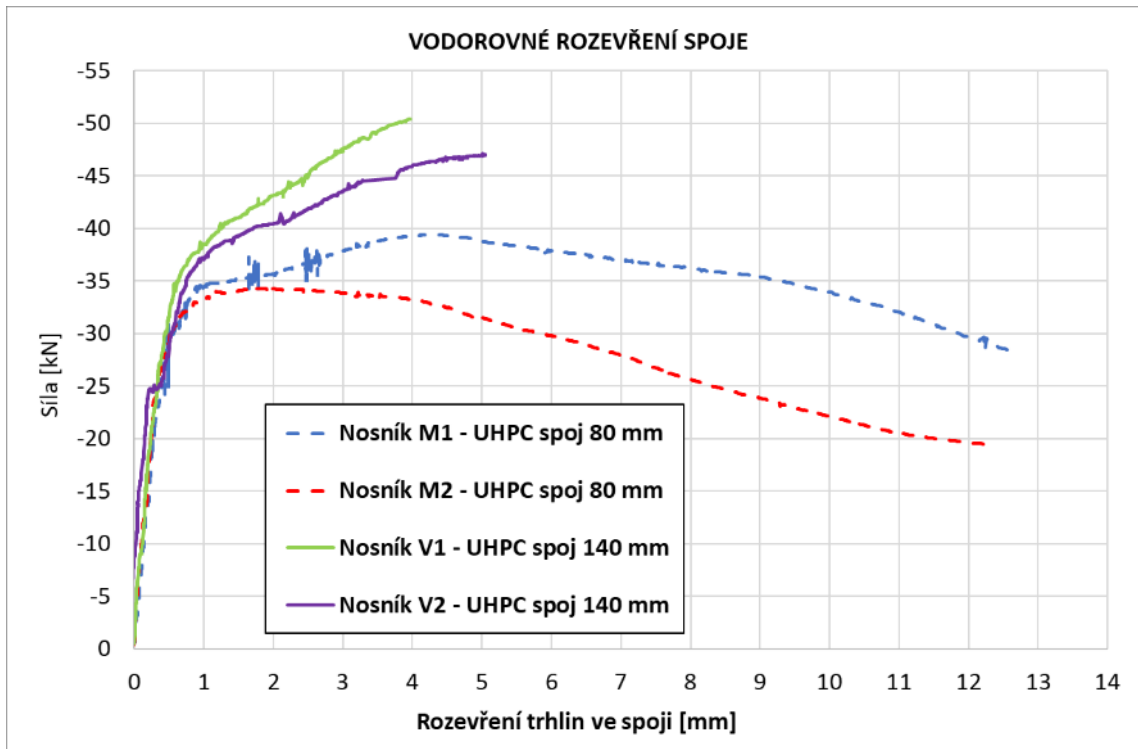


Obr. 114 Porovnání odezvy vzorků po cyklování až do dosažení únosnosti

Výsledkem experimentu bylo srovnání závislostí průhybu vzorků uprostřed rozpětí a porovnání maximálních dosažených sil. Nejvýraznějším poznatkem z provedených zkoušek byl průběh u vzorků se 140 mm spojem. Spoj z UHPC v tomto případě způsobil zvýšení únosnosti prvku oproti monolitické variantě.



Graf 33 Srovnání průběhu závislosti síly na průhybu uprostřed



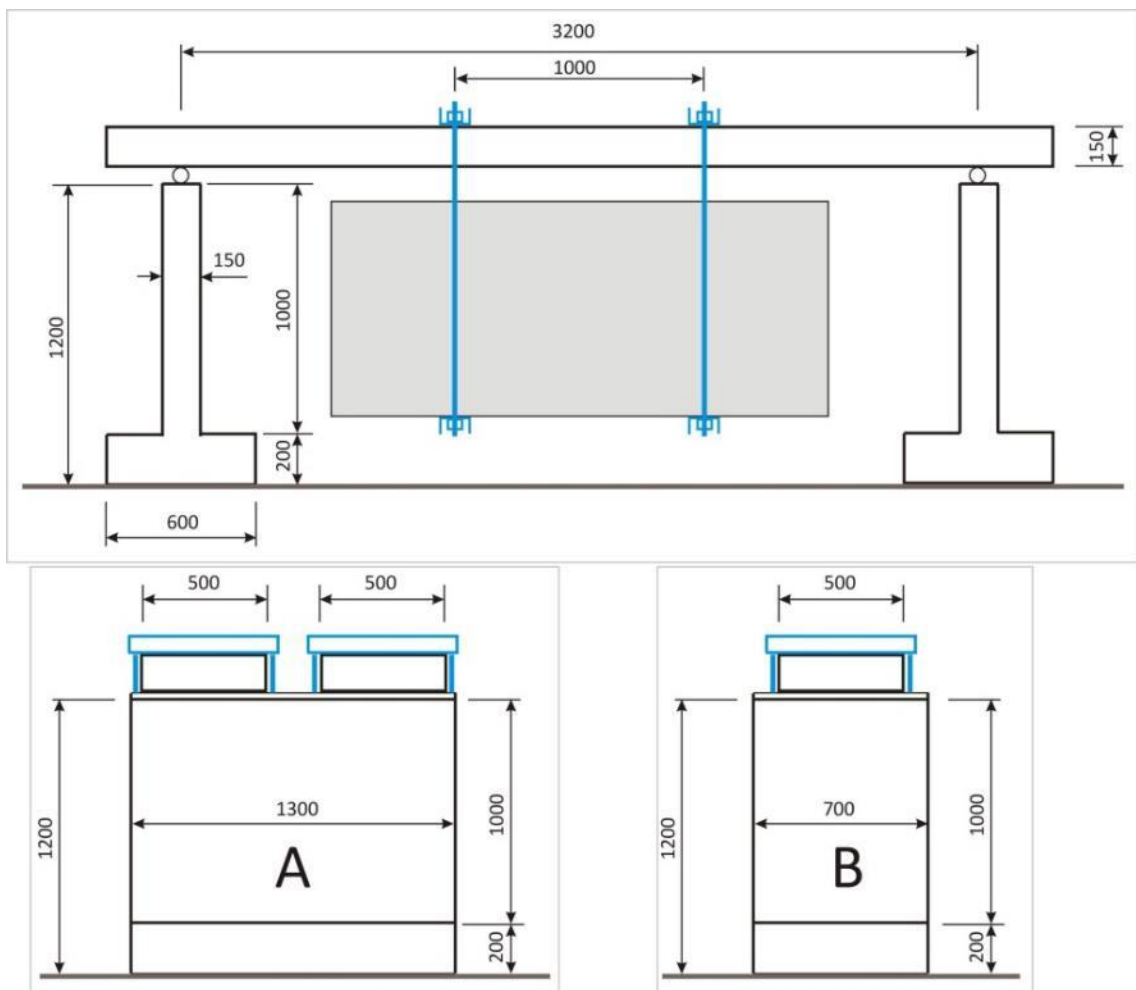
Graf 34 Srovnání průběhu závislosti síly na rozevření trhlin ve spoji

Dílčí závěr

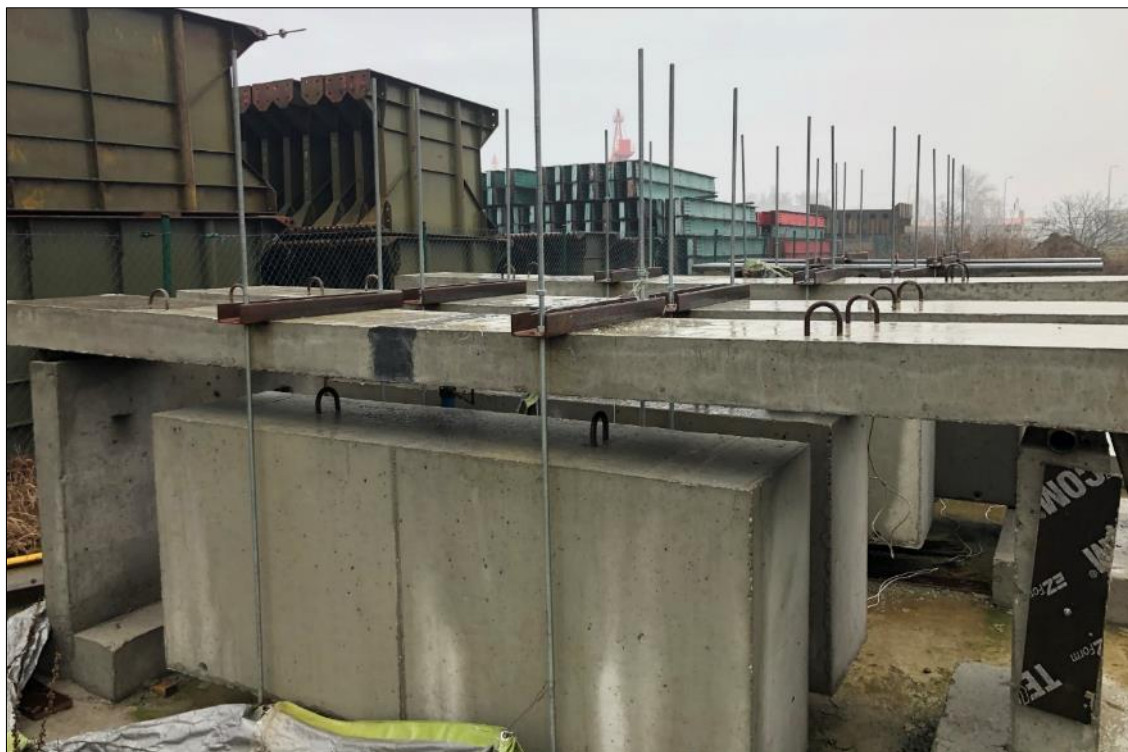
Vzorky byly zatěžovány cyklicky na cca $\frac{1}{2}$ jejich celkové únosnosti (21 kN). Závěrečným cyklem byl vzorek zatěžován až do kolapsu. Průběh zkoušky byl u všech vzorků obdobný (graf 33). Nedošlo ke vzniku trhlin ve spoji z UHPC a kolaps panelů byl zapříčiněn rozevíráním hlavních trhlin v okolí UHPC spoje, nebo na rozhraní obou betonů. Rozdíl mezi jednotlivými variantami spoje a porovnáním s referenčními nosníky byl pozorován ve smyslu rozložení trhlin. Nejpravidelnější rozložení trhlin bylo patrné u referenčního vzorku. V případě spoje o šířce 140 mm bylo rozložení podobné, v případě kolapsu se však rozevíraly trhliny v na hranách UHPC spoje. V případě spoje o šířce 80 mm byl rozvoj trhlin koncentrován blíže spoje a kolaps nosníku byl pozorován rozevřením jedné trhliny na hraně běžného betonu a UHPC spoje. Tento kolaps byl však pozorován až v závěrečné fázi zatěžování. Křivky průběhů závislosti zatížení na průhybu bylo u všech tří variant velmi podobné a lišilo se pouze v závěrečných fázích zatížení. První významnější zlom v zatěžovacích křivkách lze pozorovat při zatížení v rozmezí 22-24kN. Po tomto zatížení dochází u vzorků k redistribuci zatížení a následnému rozevírání omezeného množství hlavních trhlin.

4.4.3 Dlouhodobé zkoušky optimalizovaných spojů prefabrikovaných desek

Po vyhodnocení krátkodobých zkoušek bylo přistoupeno k dokončení návrhu dlouhodobých zkoušek. Zkoušky byly navrženy ve stejném zkušebním schématu jako v případě krátkodobých zkoušek. Z krátkodobých zkoušek byl znám charakter porušení a průběh zatěžovacího diagramu. Schema je patrné z obr. 115. Jako zatížení byly vyrobeny betonové bloky vypočítaného objemu. Všechny tři druhy panelů byly uloženy na podpory a zatíženy zatížením 21 kN. Zatížení bylo vyvozeno betonovým blokem zavěšeným v místech břemen. Během zkoušky byl monitorován průhyb uprostřed v závislosti na čase. Zároveň byly vzorky pravidelně kontrolovány z hlediska rozvoje trhlin. Vzorky byly umístěny v exteriéru – spoj tak byl namáhán nejenom stálým zatížením, ale také byl vystaven povětrnostním vlivům.



Obr. 115 Schema dlouhodobého uložení prefabrikovaných desek



Obr. 116 Pohled na zatěžované desky – vzorek se spojem o šířce 140 mm



Obr. 117 Pohled na zatěžované desky – vzorek se spojem o šířce 80 mm

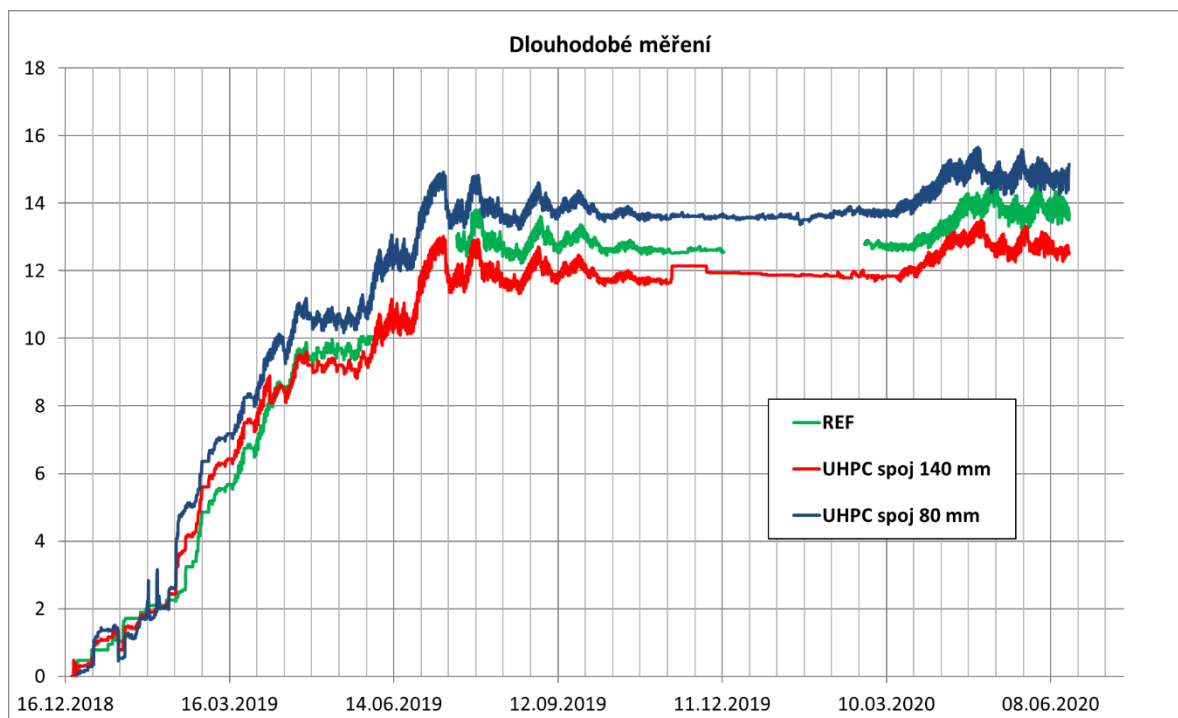


Obr. 118 Pohled na zatěžované desky – vzorek se spojem o šířce 140 mm



Obr. 119 Pohled na zatěžované desky – vzorek se spojem o šířce 80 mm

Zatížení vzorků bylo provedeno v prosinci 2018. Měření probíhalo po dobu 2 let a je stále aktivní v době psaní této práce. Zjmenění výkyvů průhybů bylo zajištěno částečně zakrytím konstrukce. Diagram závislosti průhybu na čase je uveden na grafu 35. U všech vzorků byl pozorován shodný průběh pružných deformací uprostřed rozpětí jako u vzorků zkoušených v rámci statických krátkodobých zkoušek. Rozložení trhlin bylo v případě referenčního vzorku rovnoměrné. Nejvýraznější trhliny byla pozorována v případě spoje 80 mm, u kterého došlo k otevření trhliny v místě rozhraní UHPC a betonu na jedné straně. Mezery ve vykreslení měřených průhybů znamenají částečný výpadek měření.



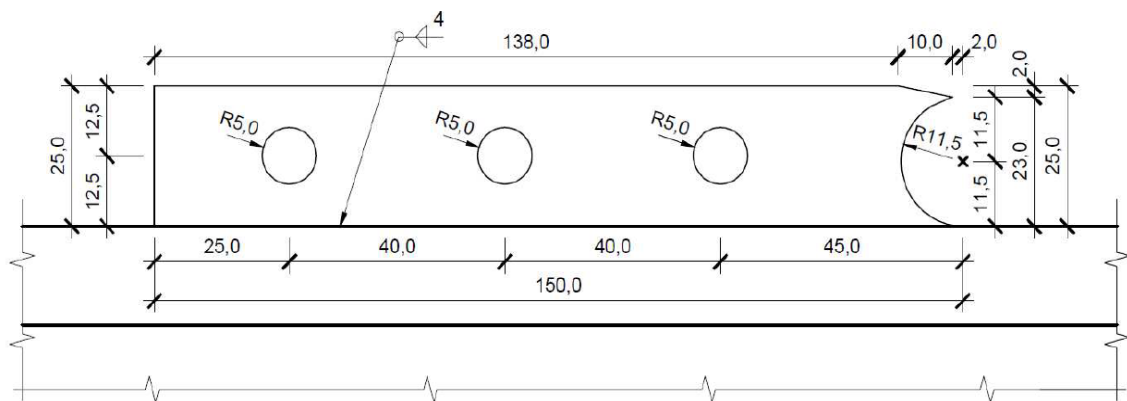
Graf 35 Srovnání průběhu závislosti (bez úvodní elastické části zatížení)

Dílčí závěr

Z dlouhodobých ohybových zkoušek je patrné, že u vzorků s UHPC spojem nedochází k rozdílnému vývoji průhybu v čase oproti referenčnímu monolitickému prvku. Zkoušky povrzuji prakticky shodný průběh vývoje průhybu, u spoje šířky 140 mm se ukazuje mírné zvýšení tuhosti průřezu vlivem UHPC uprostřed zkušebního prvku. Rozložení trhlin je rovnoměrné u vzorků referenčních a u spoje šířky 140 mm. U spoje šířky 80 mm došlo k propagaci trhliny na rozhraní spoje a prefabrikátu, u vzorku je patrný mírně zvýšený průhyb. U všech vzorků dochází k postupnému ustálení vývoje průhybů.

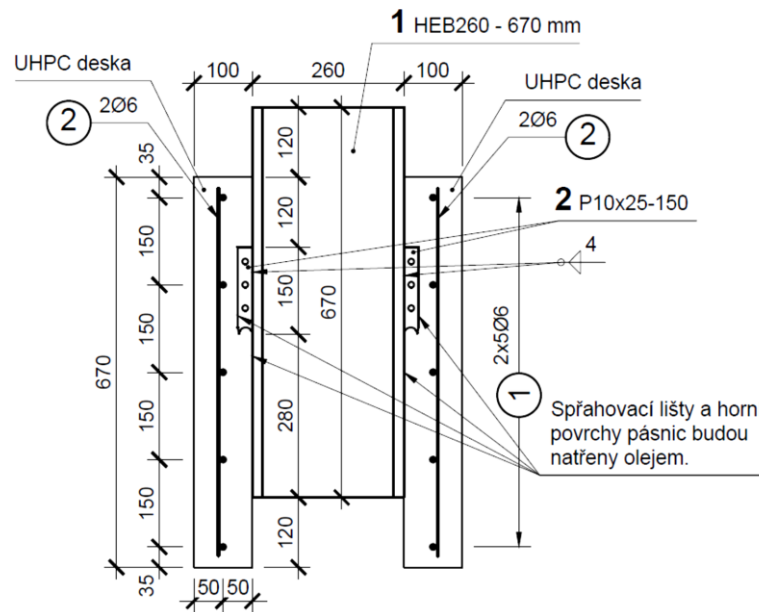
4.5 ZKOUŠKY SPŘAŽENÍ OCELOVÉHO NOSNÍKU A UHPC POMOCÍ LIŠTY

Pro komplexní experiment spřažených nosníků, které budou popsány v následující kapitole bylo využito inovativních spřahujících lišt jako alternativní náhrady za spřahovací trny. Detailní výpočet, návrh a posouzení únosnosti lišty v daném experimentu není součástí této práce. V následujících experimentech je úkolem popsána pouze únosnost a charakter porušení jako doplňující detail pro ucelený obraz o komplexním experimentu spřažených nosníků. V úvodní části experimentů byly navrženy a staticky odzkoušeny lišty tvaru zobrazeném na následujícím obrázku 120. Tvar lišty byl v návrhu optimalizován z hlediska eliminace míst s koncentrací napětí (kruhové náběhy). Otvory v liště nahrazují u běžně používaných spřahovacích trnů plochu nutnou pro přenos sil kolmo na nosník. Velikost navržené lišty a otvorů zohledňuje jemnozrnnost materiálu UHPC.

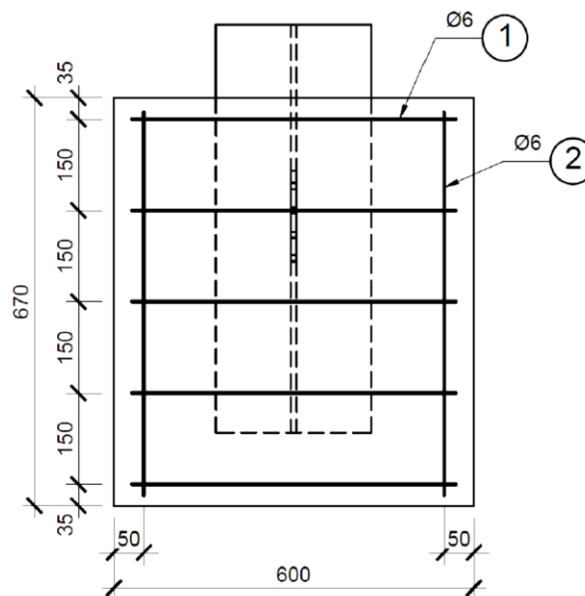


Obr. 120 Detail špřahovací lišty

Lišta byla přivařena na obě pásnice nosníku HEB 260. Tloušťka desky UHPC byla zvolena 100 mm. Experimentální vzorek byl zvolen v takovém poměru, aby se co nejvíce blížil reálným rozměrům a poměrům mezi hlavním ocelovým nosníkem a deskou mostovky. Schemata vzorků a uspořádání zkoušky je patrné z následujících obr. 121 a 122.



Obr. 121 Formy s připravenou výztuží

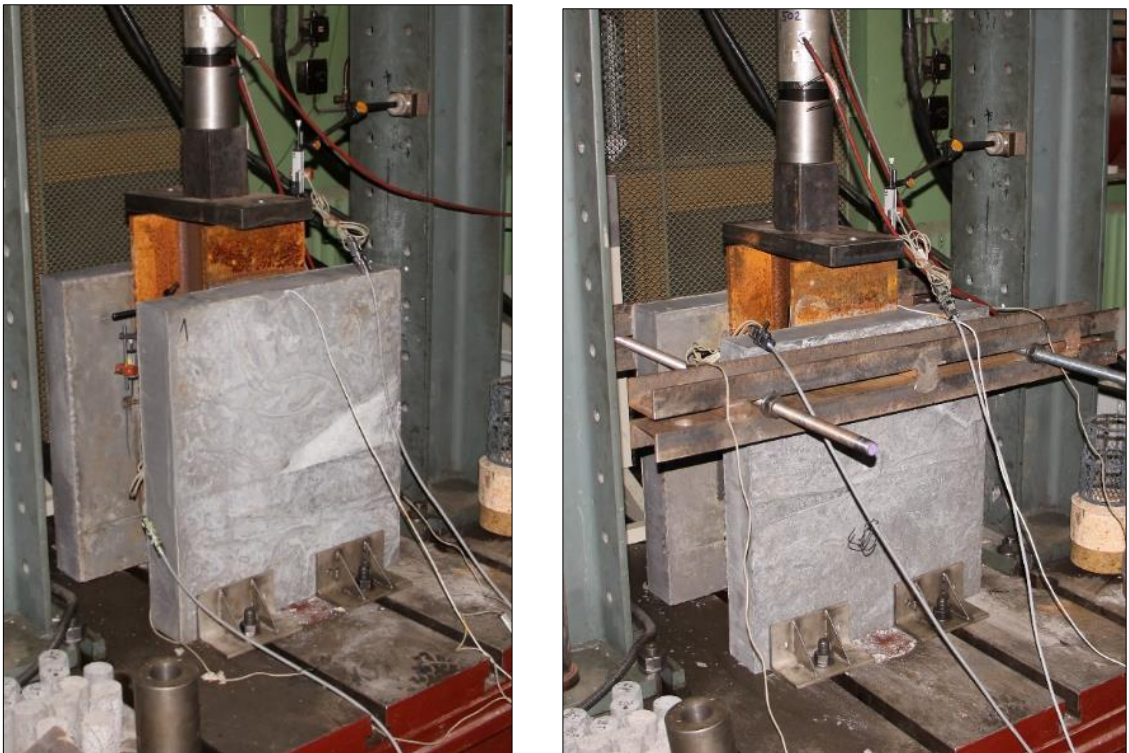


Obr. 122 Formy s připravenou výztuží

Pro experiment bylo vyrobeno 6 ks vzorků. 3 ks vzorků byly určeny na statické krátkodobé zkoušky ve zkušebně. Zbylé 3 vzorky byly určeny na únavové zkoušky. Ze zkušeností z dřívějších experimentů a dostupné literatury je nutné při betonáži zkušebních vzorků věnovat pozornost směru betonáže, který má fatální vliv na usměrnění rozptýlené výztuže. Vzorky byly vyráběny ve dvou dnech. V prvním dni byly vybetonovány desky na jedné straně.

4.5.1 Krátkodobé zkoušky spřahovací lišty

Krátkodobé statické zkoušky spřazené lišty v UHPC byly prováděny na zatěžovacím roštu pomocí hydraulického válce o maximální kapacitě 500 kN. Zatížení bylo řízeno v úvodním cyklování silou a poté po dotlačení všech částí zatěžovacího systému v závěrečné fázi zkoušky posunem. Při zkoušce byl monitorován vznik trhlin a vzájemný posun UHPC desek a ocelového profilu v místě spřahovací lišty. Výsledky hodnot maximálního zatížení jsou uvedeny v tabulce 3 společně s okrajovými podmínkami a charakterem porušení.



Obr. 123 Zkoušky spřahovací lišty (vlevo bez horního sepnutí, vpravo se sepnutím)

Tabulka 3: Výsledky zkoušek spřahovací lišty

Číslo vzorku:	Způsob uchycení:	Způsob porušení:	Maximální tlaková síla:
Vzorek 1	sepnutí ve spodní části vzorku	oddálení horní části desky	120 kN
Vzorek 2	sepnutí ve spodní a horní části vzorku	deformace lišty + trhlina v desce	381 kN
Vzorek 3	sepnutí ve spodní a horní části vzorku	deformace lišty	486 kN

Z charakteru porušení a dosažených hodnot je patrný velký význam zatěžovacího schématu zkoušky. V případě vzorku 1 byl vzorek postaven na zatěžovací rošt a zabezpečen proti vodorovnému posunu tak aby nedošlo k natočení a vylomení UHPC desek (obr. 123 vlevo). Drobné imperfekce při betonáži desek a uložení vzorku vedly k delaminaci jedné z desek od ocelového nosníku v horní části již při hodnotě 120 kN. Po delaminaci desky došlo k natočení prvku a tím nesymetrickému zatížení a vytržení lišty z UHPC desky.

U provedené zkoušky na vzorku 1 nedošlo k deformaci lišty ale pouze k vytržení kuželu UHPC a následnému příčnému porušení desky. Při zkoušce vzorku 2 bylo změněno zatěžovací schema tak, že v horní části desek byla umístěna vodorovná převázka. Pohled na vzorek je zobrazen na obr. 124 vpravo.



Obr. 124 Detaily deformace lišty

V případě zabránění vodorovných sil pomocí převázky z ocelových profilů a závitových tyčí v horní části vzorku nedošlo k delaminaci desky v úvodní části zatížení a byla zkoušena únosnost lišty jako takové. Převázka byla chycena pouze dotažením šroubů – nebyla vyvozována žádná síla, která by desky připínala k ocelovému profilu. Toto vodorovné zachycení sil reprezentuje přitížení desky vlastní vahou v reálném případě. Zkoumaným parametrem bych charakter a lokalizace porušení. Oproti vzorku 1, při kterém došlo pouze k lokální deformaci ve špičce lišty (obr. 124 vlevo) došlo zejména v u vzorku 3 k její úplné deformaci (obr. 124 vpravo). Při takovéto deformaci došlo k vylomení kužele UHPC a nalomení desky.

Zároveň došlo k usmyknutí betonu v místě kruhových otvorů. Při dalším zatěžování již za maximální dosaženou silou docházelo k významnější delaminaci desky s vytrženým kuželem UHPC. Deformovaná lišta svým tvarem v horní části podporovala vodorovné rozevírání a porušení desky ohybovou trhlinou. Postupným oddelaminováním desky došlo k úplnému vylomení kuželu viz obr. 125.



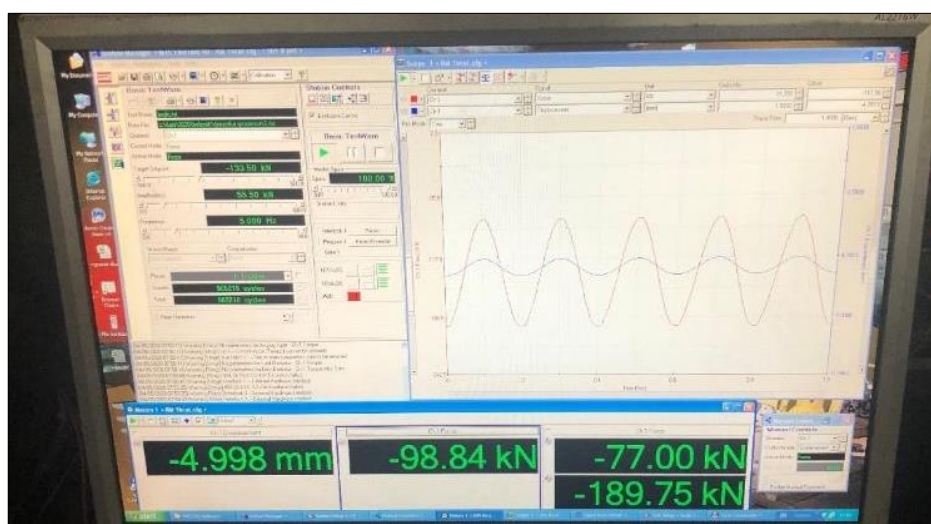
Obr. 125 Detail vytržení kuželu UHPC

Stejný charakter porušení byl patrný i u posledního vzorku, u kterého bylo dosaženo nejvyšší hodnoty zatížení. Tento fakt byl dán i celkovou přesností výroby vzorku. I přes podložení desek při zatěžování a roznosu zatížení přes kloub dochází při takto velkých zatížení k přerozdělování sil na základě drobných imperfekcí. U žádného vzorku nedošlo k porušení svaru lišty ani v jeho kraji u deformované špičky. Možná optimalizace lišty je tak možná z hlediska její délky. Většina zatížení je přenášena přední částí lišty a otvory.

Je ale nutné brát v potaz to, že v případě těchto zkoušek se jedná čistě o zatížení v kolmém směru reprezentující smykové síly působící na lištu. V případě spřažené konstrukce bude namáhání daného detailu komplexnější. Pro popsání vlivu možného únavového zatížení byly tři vzorky před statickou zkouškou zatěžovány cyklicky.

4.5.2 Únavové zkoušky spřahovací lišty

Druhá polovina vyrobených vzorků byla ponechána na únavové zkoušky v tlaku. Motivací zkoušky bylo zhodnocení, zda vysokocyklické zatěžování bude mít vliv na výslednou hodnotu maximálního zatížení přeseneného sřahovací lištou. Vzorky byly postupně umístěny za stejných okrajových podmínek jako v případě statických zkoušek pod zatěžovací hydraulický lis. Z předchozích zatěžovacích zkoušek byly odvozeny meze pro dolní a horní úroveň cyklického zatížení. Frekvence byla stanovena na 5 Hz. Celkový počet cyklů byl domluven z hlediska vytíženosti zařízení a časové náročnosti testu na 3,5 milionu cyklů. Průběh zatěžování byl zvolen jako sinusoida a zkouška byla řízeny silou. Zkoušky byly provedeny ve stáří vzorků cca 1 rok. Vzhledem k rozptylu hodnot maximálních dosažených sil při statických zkouškách byl pro první vzorek zvolen rozsah 0,2-0,8 hodnot jejich průměrných hodnot.



Obr. 126 Detail vytržení kuželu UHPC

Tabulka 4: Výsledky zkoušek spřahovací lišty po únavovém cyklování

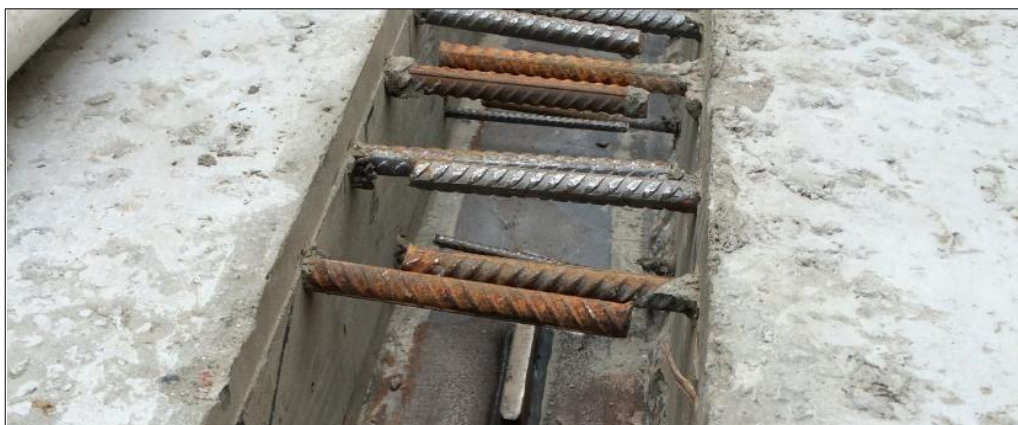
Číslo vzorku:	Rozsah cyklování	Způsob porušení:	Maximální tlaková síla:
Vzorek D1	77-308 kN	oddálení horní části desky	308 kN
Vzorek D2	77-190 kN, 3,5milionu cyklů	deformace lišty + trhlina v desce	760 kN
Vzorek D3	77-190 kN, 3,5milionu cyklů	deformace lišty + trhlina v desce	612 kN

U prvního vzorku došlo po cca 70 tisících cyklů k mírné delaminaci desky a tím i k postupné přerozdělení napětí v prvku. Při cyklování došlo k postupné deformaci místa spřažení a zkouška byla ukončena. U dalších dvou vzorků byla upravena horní zatěžovací síla. Vzorky vydržely cyklycké zatížení a zároveň byly dosaženy velmi vysoké hodnoty maximálních zatížení. Ty jsou uvedeny v tabulce 4.

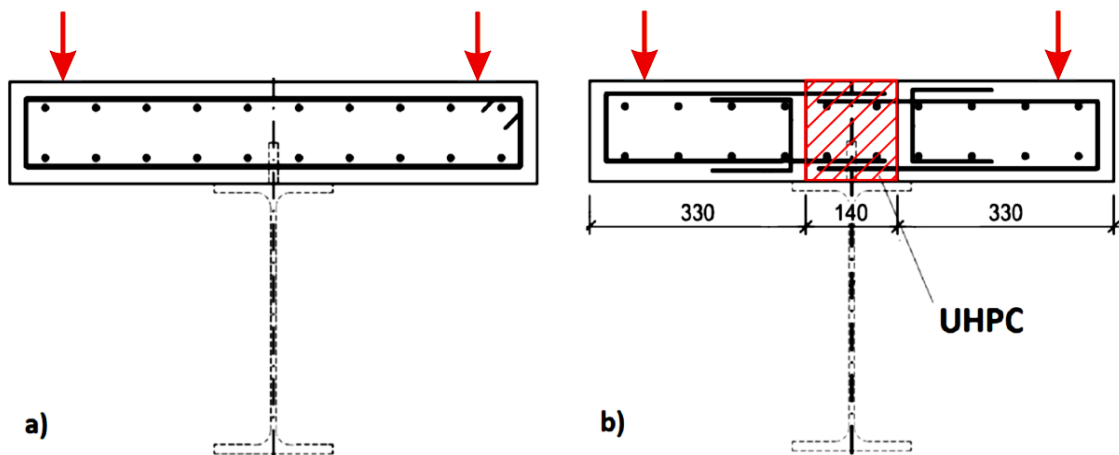
4.6 ANALÝZA SPŘAŽENÝCH OCELOBETONOVÝCH NOSNÍKŮ S UHPC SPOJEM

Experimentální ověření funkce spoje bylo provedeno na modelech ocelobetonových nosníků navržených a vyrobených u nás. Byl použit UHPC vyrobený v TBG Metrostav, s.r.o. s pevností v tlaku cca 145 MPa. V rámci výzkumu v ČR byla pro spřažení použita spřahovací lišta místo trnů. Zároveň experimenty ověřily, že spojitá spřahovací lišta používaná pro spřažení ocelového nosníku s betonem běžné pevnosti (v tomto případě C35/45) může být v případě použití v UHPC redukována a nemusí být nutně spojitá, ale pro přenos sil z betonu do oceli postačí lišta ze segmentů.

Vzhledem k výborným výsledkům ohybové únosnosti prefabrikovaných desek s UHPC spojem byl navržen experiment spřažených ocelobetonových nosníků. V místě spřažení byl použit UHPC. Cílem experimentu bylo komplexní ověření chování spoje z UHPC namáhaného zároveň ohybovým momentem působícím v příčném směru (samostatně zkoušené namáhání v předchozím experimentu) a i smykovými silami vyvolanými spřažením a podélným ohybem nosníku. Kombinace těchto namáhání byla vyvozena konzolovým zatěžováním nosníku pomocí dvou hydraulických lisů umístěných v příčném směru na krajích železobetonové desky. Byly navrženy a vyrobeny dvě varianty těchto nosníků, aby bylo možné porovnat funkčnost navrhovaného řešení s klasickým uspořádáním spřažení. První varianta představuje běžně uspořádání monolitické mostovky spřažené s ocelovým nosníkem (obr.128 a). Druhá varianta představuje prefabrikovanou variantu mostovky. Prefabrikované části jsou vzájemně spojeny pomocí UHPC (obr.128 b). Ve spoji je zároveň realizováno spřažení betonu s ocelovým nosníkem. Deska mostovky byla navržena z betonu C35/45 s maximální velikostí hrubého kameniva 16mm z důvodu čerpatelnosti směsi do bedně. Běžný beton i UHPC dosahující válcových pevností cca 145MPa byly dodány firmou TBG Metrostav s.r.o.



Obr. 127 Detail připraveného spoje před betonáží



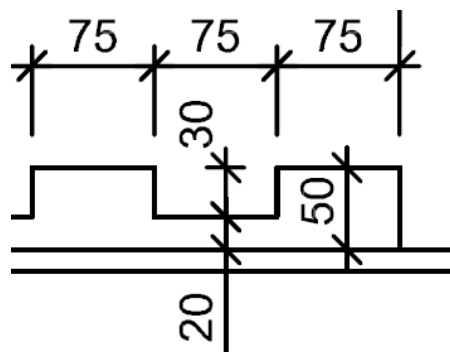
Obr. 128 Varianta 1 – spřažená monolitická mostovka (a), Varianta 2 – prefabrikovaná mostovka s UHPC spojem (b)

Ocelobetonové nosníky jsou 3,8m dlouhé (obr.129). Ocelový profil I400 spřažený s deskou tloušťky 150 mm představuje model části ocelobetonového mostu. Šířka desky mostovky byla zvolena 0,8m. Spřažení u ocelobetonových mostů je obvykle zajištěno pomocí spřahovacích ocelových trnů přivařených na pásnici ocelového nosníku. Použití stejných trnů v UHPC spoji jako u běžných betonů se jeví jako nevhodné a neekonomické. Trny jsou příliš dlouhé a jejich zakotvení do betonu velmi únosné. Slabým místem je tak v tomto případě přípoj trnu k ocelovému nosníku. Jako vhodnější varianta se jeví použití tlustých trnů, které se však běžně nevyrábějí, respektive jejich výroba není typizovaná. Proto bylo v tomto experimentu zvoleno spřažení pomocí perforované ocelové lišty přivařené k horní pásnici ocelového průřezu. Tato lišta byla navržena dle stejných požadavků na přenesení smykových sil jak v monolitické verzi ocelobetonových nosníků, tak ve verzi prefabrikované mostovky s UHPC spojem. U nosníků s monolitickou deskou byla navržena spojitá perforovaná lišta (Obr.130). U nosníků s prefabrikovanou deskou spojenou UHPC postačuje lišta podstatně kratší, (přerušovaná) složená z několika segmentů (obr. 131). Hřebenovitý tvar perforované lišty byl navržen i s ohledem na prostupující spodní výztuž desky mostovky. Od jednotlivých variant byly vyrobeny 3 ks nosníků (celkem tedy 6 ks spřažených nosníků). Uspořádání zkoušky bylo navrženo tak, že nosníky jsou zatěžovány na převislém konci tak, aby betonová deska byla v tažené oblasti navíc zatížena příčným ohybem a zároveň aby spřažení bylo zatíženo velkou smykovou silou.

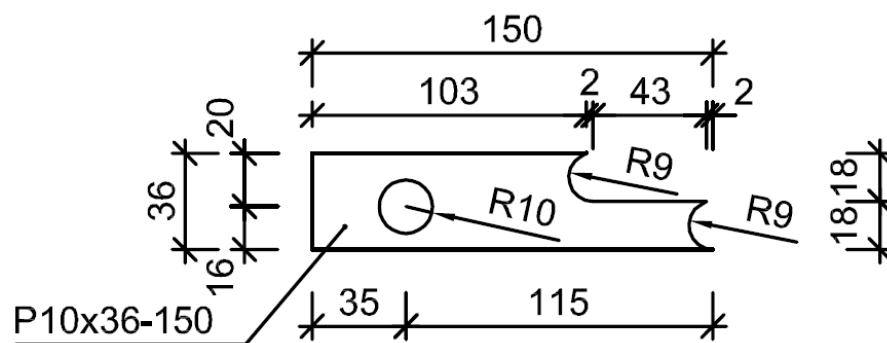
Ocelové nosníky s připravenými lištami byly dovezeny do Kloknerova ústavu, kde byly dále připravovány na dobetonování a zkoušky.



Obr. 129 Detail připravených nosníků s přivařenými lištami

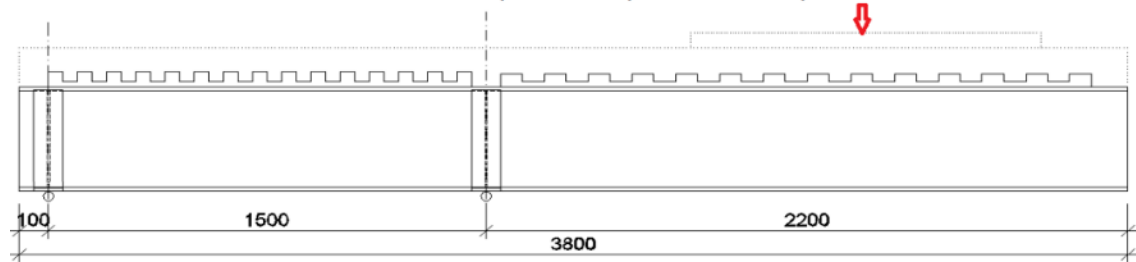


Obr. 130 Detail spřahovací lišty u varianty s monolitickou deskou

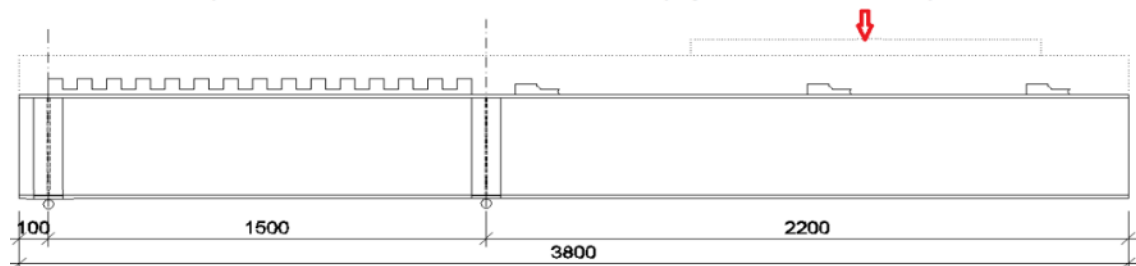


Obr. 131 Detail redukováné spřahovací lišty u varianty s UHPC spojem

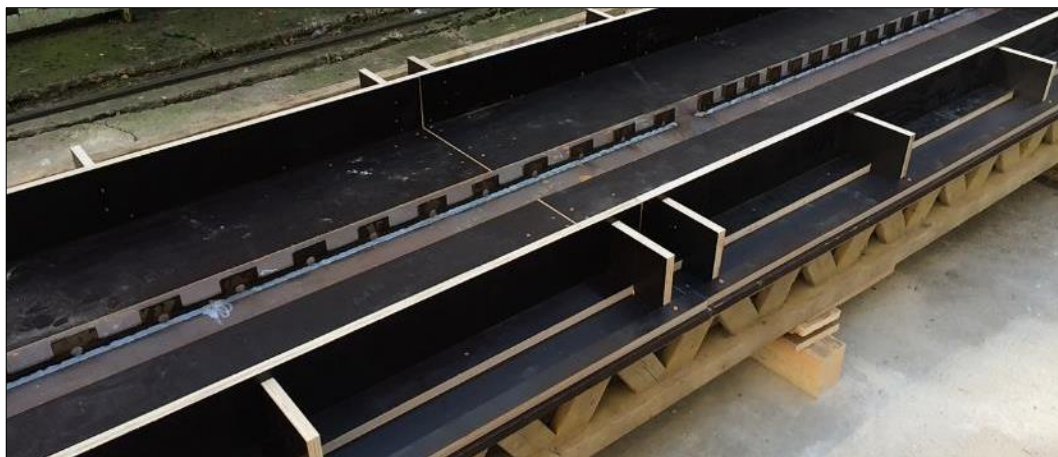
VARIANTA 1 - monolitická mostovka, průběžná perforovaná spřahovací lišta



VARIANTA 2 - prefabrikovaná mostovka s UHPC spojem, redukovaná spřahovací lišta



Obr. 132 Schema monolitického nosníku s kontinuální spřahovací lištou



Obr. 133 Připravené bednění na monolitickou variantu



Obr. 134 Připravené bednění na variantu nosníku s UHPC spojem

4.6.1 Výroba spřažených nosníků

Betonáž spřažených nosníků probíhala v prostředí Kloknerova ústavu. Ocelové nosníky se spřahovacími lištami, které byly dodány Div. 3 Metrostavu, byly osazeny odporovými tenzometry pro měření deformací, bednění železobetonové desky a výztuž byly dodány pracovníky Div. 6 Metrostavu. Beton dodalo TGB Metrostav a betonáž probíhala ve dvou fázích. V první fázi byly vybetonovány desky nosníků představující monolitickou desku a části desek u druhé sady nosníků představující prefabrikovanou mostovku z betonu C35/45. U druhé sady nosníků byl vynechán prostor nad horní pásnicí ocelového profilu. V druhé fázi byly betonovány vynechané úseky desek nad ocelovými nosníky (nosníky druhé sady) betonem UHPC a došlo ke vzájemnému spojení obou částí železobetonových desek a také ke spřažení desky s ocelovým nosníkem (obr. 135 a 136). V rámci obou fází betonáže byla vybetonována laboratorní tělesa pro ověření materiálových charakteristik běžného betonu mostovky i UHPC použitého ve spoji. Vlastnosti betonu byly použity do numerického modelu, který měl únosnost nosníků ověřit.



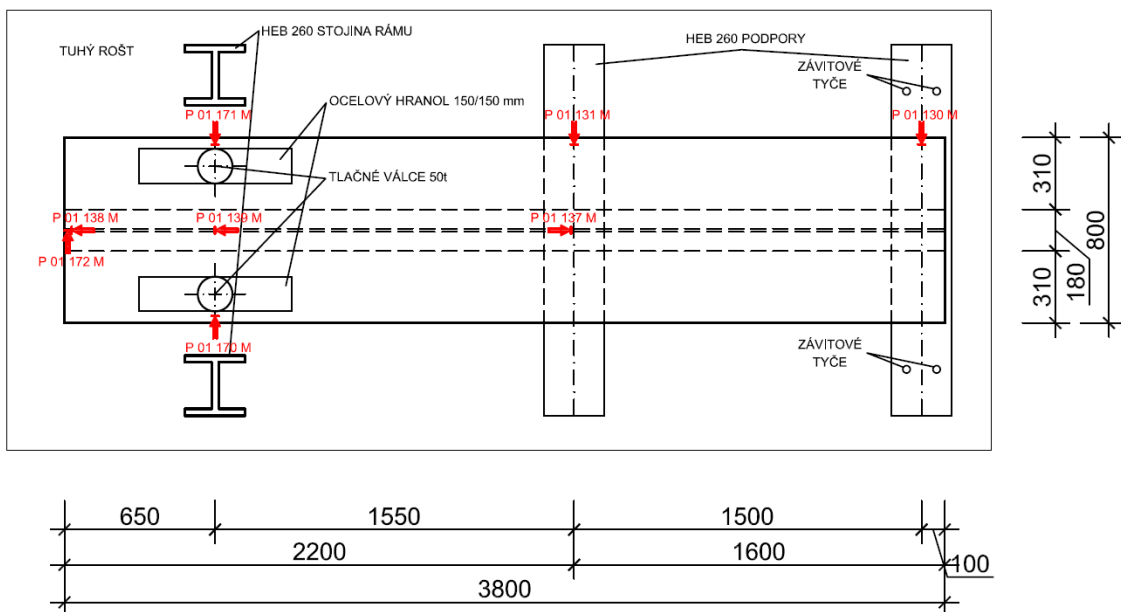
Obr. 135 Pohled na vyztužené vzorky před betonáží



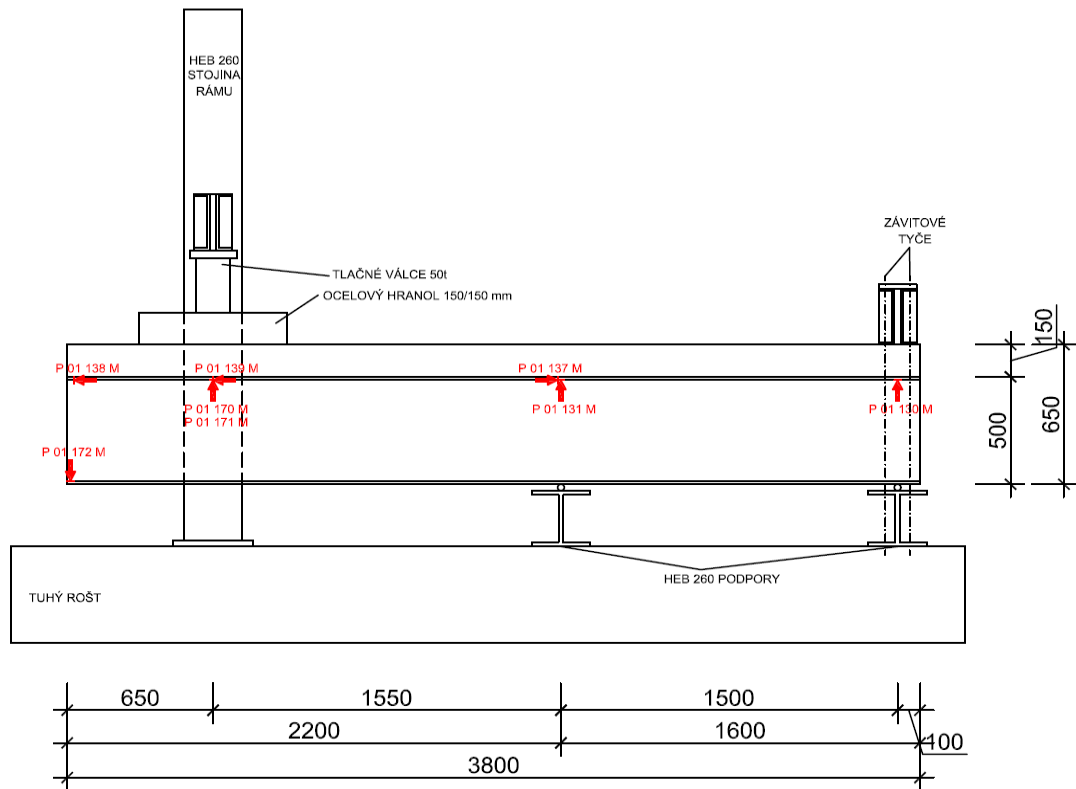
Obr. 136 Pohled na vyztužené vzorky před betonáží

4.6.2 Zkoušky spřažených nosníků

Podélné a půdorysné schéma zatížení nosníku je patrné z obr. 137 a 138. Tahová reakce byla zachycena závitovými tyčemi zakotvenými do podkladního rámu. Zatěžovací síla byla vyvozována na konzole ve vzdálenosti 1,3 m od středové podpory. Konzola byla zatížena dvěma silami umístěnými na okrajích železobetonové desky, které byly roznášeny na délku cca 1 m pomocí ocelových podkládků (obr. 140 a 141). Při zvyšování zatěžovací síly v obou válcích docházelo k příčnému ohybovému namáhání samotného spoje, podélnému namáhání celého spřaženého nosníku a smykovému namáhání perforované lišty mezi železobetonovou deskou a ocelovým nosníkem. Zatěžování bylo řízeno silou v hydraulických válcích. Byl monitorován a zaznamenáván celkový průhyb nosníku na konci konzoly na obou stranách železobetonové desky, dále průhyby pod oběma břemeny a vzájemný posun mezi deskou a ocelovým nosníkem ve třech místech podél zkoušené konzoly. Zároveň byl zaznamenáván rozvoj trhlin. Po úvodních testech monolitické varianty mostovky byla mírně vyztužena spodní pásnice ocelových nosníků u střední podpory, aby tam nedocházelo k předčasnému vytvoření plastického kloubu. Obě varianty spřažených nosníků připravených na zkoušku jsou zobrazeny na obr 140 a 141.



Obr. 137 Půdorysné uspořádání zkoušky



Obr. 138 Boční uspořádání zkoušky

Zatěžovací schéma vetknutého nosníku zatěžovaného na konzole vyžadovalo důkladné připnutí zadní části nosníku k podpoře 8 ks závitových tyčí tak aby byl celý systém, tuhý a nedocházelo k nadzvedávání a kroucení nosníku (obr.139).



Obr. 139 Přitažení vetknuté části nosníku závitovými tyčemi

Obě zkoušené varianty byly zatěžovány shodně na zatěžovacích roštích tak aby bylo možné porovnat varianty ve všech detailech. Po prvních zkouškách byly změněny zatěžovací hydraulické lisy z důvodu kapacity a to z původních 2x50 tun na 2x100 tun.



Obr. 140 Monolitická mostovka



Obr. 141 Prefabrikovaná mostovka s UHPC spojem

4.6.3 Výsledky experimentů

Výsledkem experimentů bylo porovnání působení obou variant uspořádání betonové desky při namáhání ohybem v podélném směru a příčném směru a při současném namáháním spřažení smykem.

Zkoušky prokázaly, že spřahovací lišta je funkční spřahovací element pro monolitický beton i pro UHPC. V obou případech byly naměřené posuny mezi deskou a ocelovým nosníkem zanedbatelně malé, dá se konstatovat, že až do ukončení zkoušky nedošlo k posunu. Působení desky bylo též podobné v případě monolitické i spojené prefabrikované varianty. Rozvoj trhlin byl podrobně sledován. Zatímco v běžném betonu (u obou variant) byly příčné trhliny (od podélného ohybu) rovnoměrně rozloženy, ve spoji z UHPC byl počet trhlin menší, jejich šířka se začala zvyšovat až při zatížení přesahujícím úroveň provozních zatížení.

Podélné trhliny (od příčného ohybu desky) byly pozorovány u nosníků s monolitickou deskou uprostřed nad pásnicí (v místě největšího momentu). U nosníků se spojem byly pozorovány trhliny pouze v běžném betonu podél spoje. Z grafu 36 a 37 je zřejmé, že působení obou variant je velmi podobné.



Obr. 142 Tvorba podélných trhliny mimo UHPC spoj



Obr. 143 Tvorba podélných trhlin v případě monolitické varianty



Obr. 144 Rozložení příčných trhlin před kolapsem nosníku s UHPC spojem

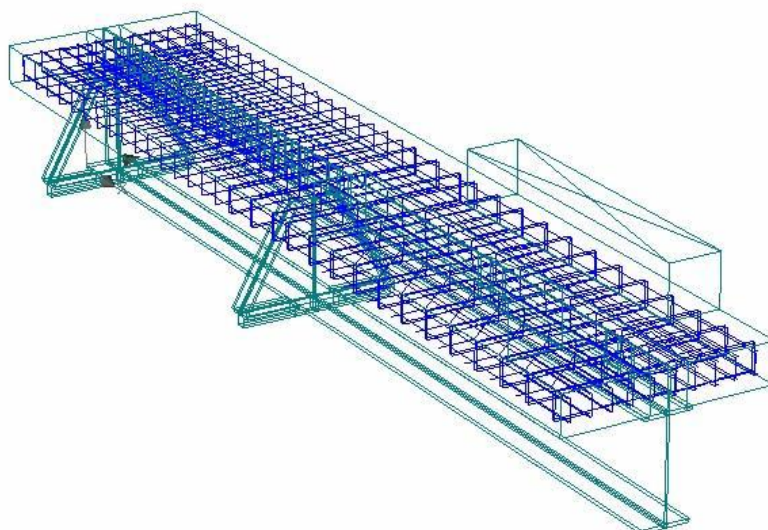


Obr. 145 Rozložení příčných trhlin před kolapsem nosníku s monolitickou deskou

Na základě těchto výsledků lze konstatovat, že spoj není příčinou žádné redukce tuhosti nebo únosnosti nosníků. Přestože rozsah spřahovací lišty je významně redukován, nedošlo k posunům mezi betonem mostovky a ocelovým nosníkem a k redukcii tuhosti nosníků.

4.6.4 Numerická analýza

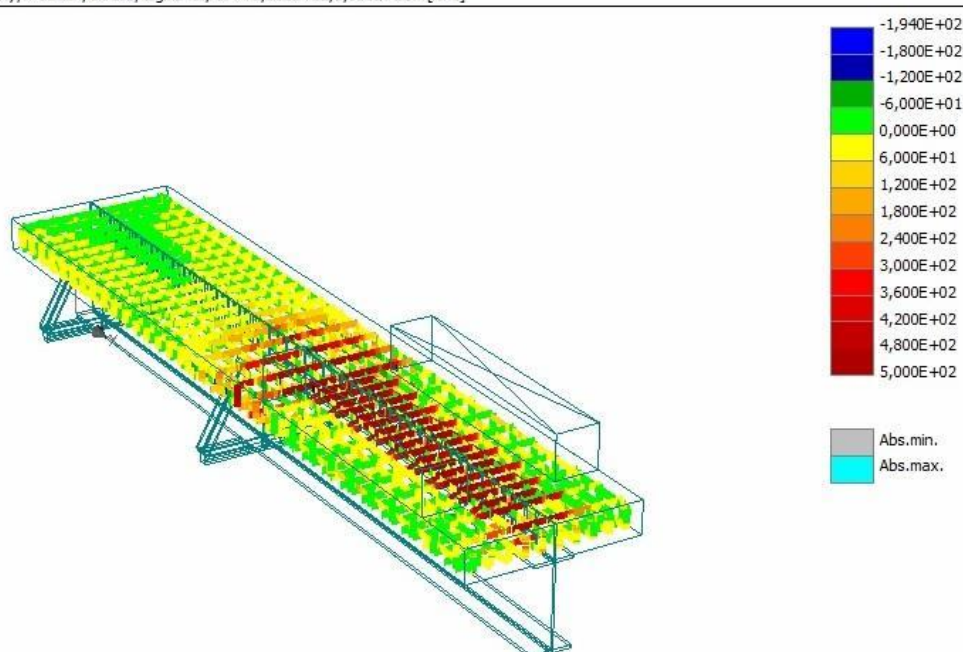
Výpočetní model byl sestaven v programu Atena 3D na základě podkladů z výrobních výkresů a návrhu zkušebních vzorků. Spoj ocel-beton byl pro první výpočty ponechán jako pevný. Materiálové charakteristiky betonu C35/45 byly zvoleny střední hodnotou pro obě varianty modelu. Charakteristiky UHPC byly zvoleny podle výsledků doprovodných materiálových testů. Pevnost betonářské výztuže a ocelových prvků jsou brány charakteristickou hodnotou 500, resp. 355 MPa. Konstrukce je zatěžována dvojicí vynucených posunů v místě předpokládaného vnášení zatížení při experimentu, v každém kroku je aplikován posun 0,1 mm. V průběhu výpočtu je měřený průhyb a síla potřebná pro jeho vyvolání v místě působení vynuceného posunu



Obr. 146 Modelovaný nosník

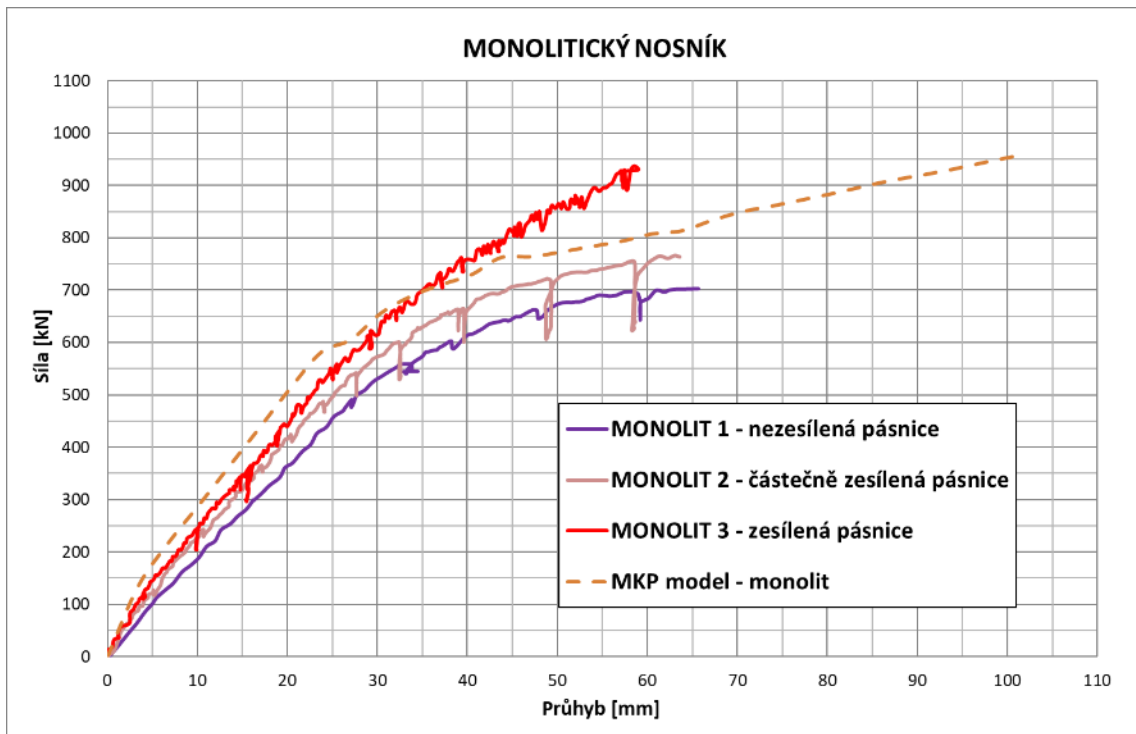
Na následujícím obrázku je zobrazeno namáhání výztuže v místě spoje UHPC. Výztuž je v tomto detailu namáhána jak v podélném tak v příčném směru. V případě nevyhovující kotevní délky výztuže vystupující z prefabrikátu by došlo odlomení horní vrstvy UHPC ve spoji a kolapsu vzorku. V tomto případě bylo ověřeno, že dimenze spoje a kotevní délky vydržely vyvolané namáhání. Za výpomoc s numerickou analýzou děkuji Ing. Petru Kněžovi.

Skaláry: kreslit isoplochy, v uzlech, Stress, Sigma xx, G. <-2,851E+02;5,000E+02> [MPa]

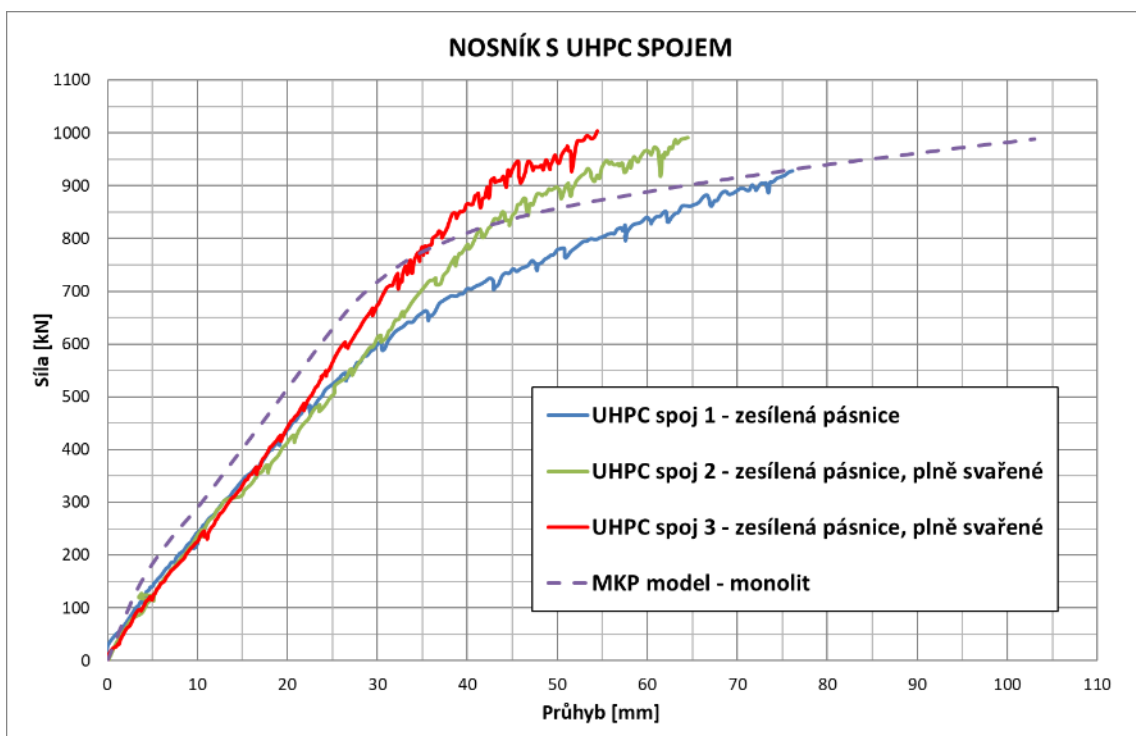


Obr. 147 Vykreslené namáhání prvku

V případě prvních zkoušek monolitických variant došlo u vzorku 2 a 3 k zesílení spodní pásnice nosníku nad podporou vzhledem k jeho plastizování před dosažením výraznějších porušení ve spřaženém nosníku.



Graf 36 Porovnání odezvy spřažených nosníků – monolitická varianta



Graf 37 Porovnání odezvy spřažených nosníků – varianta s UHPC spojem

Tabulka 5: Výsledky zkoušek spřažených nosníků

Varianta nosníku	Maximální síla [kN]	Průhyb na konci konzoly [mm]	Relativní vodorovný posun mezi betonem a ocelí [mm]
N1 - monolit	703,1	74,6	0,24
N2 - monolit	770,1	70,5	0,24
N3 - monolit	940,8	61,8	0,04
N1 – UHPC	930,8	76,4	0,62
N2 – UHPC	994,1	64,4	0,69
N3 – UHPC	1006,4	54,4	0,66

Dílčí závěr

UHPC jako vysokohodnotný materiál je vhodný pro spojování prefabrikovaných betonových prvků. Experimentální výzkum ověřil funkci spoje z UHPC na jednoduchém ohýbaném deskovém elementu. V druhé dílčí části byl spoj podroben složitějšímu namáhání kombinujícímu ohyb ve dvou směrech a smyk. Opět se prokázalo, že UHPC je schopen tomuto namáhání spolehlivě odolávat. Výsledky dosažené na klasických spřažených nosnících a na nosnících se spojem prokázaly, že spoj není slabým místem konstrukce. Vyšší mechanické parametry UHPC navíc umožňují úspěšně modifikovat spřahovací prvky. Podmínkou je však dodržení mechanických parametrů UHPC, což vyžaduje spolehlivý systém technologie řízení výroby UHPC. U varianty UHPC spoje a spřažení byly zaznamenány vyšší hodnoty relativního posunu mezi betonem a ocelí od smykového namáhání. Rozdíly v posunech byly patrné u zkoušených variant až za mezí použitelnosti a tedy z hlediska celkového zhodnocení mají informativní charakter a jsou podkladem pro numerické modelování a možnou optimalizaci spřahovací perforované lišty. Detailnější analýzy vzájemného posunu oceli a UHPC nebyly předmětem této práce.

5 SHRNU TÍ VÝSLEDKŮ DISERTAČNÍ PRÁCE

Zpracovaná disertační práce se komplexně věnuje materiálu UHPC jako materiálu vhodnému pro náročné a složité konstrukční detaily. V rámci výzkumu byly řešeny problematiky optimalizace samotné směsi UHPC pro konkrétní reálné aplikace v rámci České republiky, a to jak z hlediska technologie výroby, tak ukládání a zkoušení materiálu či realizace samotných konstrukcí. Zkušenosti z těchto praktických aplikací vedly k postupným dílčím úpravám zkoušek, modifikací návrhu zkušebních vzorků a využitím znalostí pro zhodnocení dílčích výsledků zkoušek. Z hlediska naplnění hlavních cílů práce byly stanoveny tyto závěry:

o V kapitole **soudržnost UHPC a betonářské výztuže** byly popsány základní mechanismy charakterizující zkoušení různých typů betonářské výztuže, různých průměrů, krycí vrstvy a kotevní délky. Mezi hlavní výsledky patří:

- Kotevní délka betonářské výztuže může být v UHPC výrazně snížena, zkouškami byla ověřena rovnováha mezi smykovým napětím a tahovou silou při kotevní délce žebříkové výztuže rovné jejímu 3x průměru. U části vzorků dojde k vytažení a části k porušení výztuže.
- Při vytahování žebříkové výztuže z bloku s krycí vrstvou UHPC o hodnotě 1x průměr nedošlo k poškození vzorku UHPC trhlinami a bylo dosaženo přetržení prutu – v komplexních detailech je možné velmi výrazně optimalizovat krycí vrstvu bez vlivu na snížení výsledné únosnosti. V případě kombinovaného namáhání, než je čistý tah je toto nutné zohlednit zvýšením kotevní délky a úpravy minimálního krytí výztuže.
- U hladkých výztuží, kde hlavní složkou smykového napětí v soudržnosti je složka tření bylo v případě UHPC naměřeny až 3násobně vyšší hodnoty. Maximální hodnoty průměrného smykového napětí u betonu C30/37 byly 4,9 MPa, oproti tomu průměrné smykové napětí u UHPC dosahovalo hodnot až 14,2 MPa. Navýšení hodnot smykových napětí v soudržnosti bylo sledováno u všech tří zkoumaných povrchů (hladký, vtisk a žebro).

- V případě zkoumání vlivu mosazného povlaku výztuže se u UHPC nepotvrdilo tak razantní snížení soudržnosti jako u běžného betonu. Hodnoty průměrného smykového napětí v soudržnosti UHPC s povlakovanou výztuží byly na úrovni cca 78% oproti nepovlakované výztuži (běžný beton cca 38%). V případě UHPC pravděpodobně není v počáteční fázi tuhnutí betonu pórový roztok natolik alkalický jako u běžného betonu, aby způsobil významnější korozní poškození. Nevzniká tak významná desintegrace povlaku vlivem korozních produktů a s ní spojená ztráta soudržnosti oceli. Tento fakt je velmi důležitý z hlediska využití rozptýlené ocelové výztuže s mosazným povlakem, která je v této době používána v nejvyšší míře.
- Zkoušky zinkovaných povlaků prokázaly obecně menší soudržnost oproti nepozinkovaným výztužím v obou typech materiálu běžného betonu i UHPC. V případě soudržnosti hladké výztuže, kde hlavní složkou soudržnosti je právě smykové napětí byla snížena maximální hodnota smykového napětí o cca 25% v případě UHPC (cca 40% u běžného betonu. Obdobné rozdíly byly patrné i u ostatních druhů výztuže.
- V kapitole **soudržnosti UHPC a předpínací výztuže** byly řešeny problematiky protikorozní ochrany, vystavení vzorkům extrémnímu namáhání či zkoušení rychlosti náběhů pevností v soudržnosti.
- Zkoušky UHPC vystavenému extrémním teplotám prokázaly, že chování UHPC v soudržnosti s ocelí za běžných teplot lze pro analýzu konstrukce uvažovat až do zahřátí či vystavení konstrukce teplotám do 200°C. Snížení hodnot materiálových vlastností a napětí v soudržnosti UHPC s ocelí se projeví při ohřátí UHPC na teploty cca 400 °C, 600 °C a vyšší obdobně jako u běžného betonu. Zatímco při zahřátí UHPC na teplotu 400 °C a následném ochlazení se krychelná pevnost sníží o cca 10 % hodnot ve srovnání s pevností krychlí při referenční teplotě a teplotě 200 °C, modul pružnosti se sníží o více než 50 %. Vzorek UHPC zahřátý na 600 °C vykázal pokles krychelné pevnosti 30 až 35 %, ale pokles hodnoty modulu pružnosti až cca 70 %. Pro konstrukce z UHPC vyztuženého předpínací výztuží vystavené teplotám vyšším než 200 °C se je vhodné pokles hodnot soudržnosti zahrnout do návrhu či tuto skutečnost řešit dalšími opatřeními.

- V další části experimentu byly vzorky před zkouškou vytažením vystaveny extrémnímu teplotnímu namáhání cyklováním mezi mrazem (-20°) a vodou (+20°). Tělesa z UHPC a také z běžného betonu C50/60 byla vystavena až 400 cyklům. U vzorků z běžného betonu docházelo k degradaci struktury betonu a hodnoty smykového napětí v soudržnosti měly klesající charakter. Naproti tomu u vzorků z UHPC nebyla zaznamenána žádná degradace materiálu a ve všech případech i po 400 cyklech byly naměřeny hodnoty smykového napětí stejné nebo vyšší než u referenčních vzorků.
 - Ze zkoušek rychlosti náběhů smykových napětí v soudržnosti u předpínací výztuže bylo zjištěno, že v čase 2 dnů je dosaženo již 60% výsledné soudržnosti stanovené v čase 28 dní, respektive 35 dní. Tento fakt lze zohlednit při urychlení procesu prefavýroby a zkrácení času předpínání.
 - U zkoušek protikorozní ochrany předpínací výztuže typu U byly stanoveny hodnoty při pokluzu 0,002 mm – 1% a 0,1 mm – 7% pro běžný beton a 10% a 10% pro UHPC. Ve všech případech byl u UHPC zaznamenán větší poměr hodnot průměrných smykových napětí v soudržnosti výztuže s protikorozní ochranou a neochráněným lanem než v případě běžného betonu (C40/50).
 - Normové vzorky vykazovaly konzervativnější hodnoty napětí v soudržnosti oproti vzorkům vyřezaným z předpjatých nosníků. Tento trend je dán předepnutím výztuže.
- **Vynikající výsledky soudržnosti UHPC a betonářské výtuže byly využity pro návrh prefabrikovaných panelů s UHPC spojem. Experimenty byly rozděleny na dva dílčí okruhy zkoušek spojů a zkoušky spřažení, ze kterých lze konstatovat:**
- Byly navrženy, vyrobeny a vyzkoušeny panely s UHPC spojem s rovnou výtuží a výtuží do smyčky při stejném uspořádání a rozložení výtuže ve spoji. Rozměr spoje byl 200 mm, kotevní délka výtuže 170 mm (11x průměr). Zkoušky v 3 – bodovém ohybu potvrdily únosnost optimalizovaného spoje. Porovnáním obou variant byla shledána shoda v MSÚ a spolehlivost daného řešení. Spoj s rovnou výtuží vykazoval vyšší hodnoty maximálního zatížení. Kotevní délka i rozměr spoje byly vyhovující.

- Na základě výsledků předešlých experimentů byly pro následující zkoušky navrženy prefabrikované panely s UHPC spojem o rozměru 140 mm s kotevní délkou 10x průměr výztuže (120mm) a UHPC spoj o rozměru 80 mm s kotevní délkou 5x průměr výztuže (60 mm). Zkoušky byly prováděny současně na referenčním panelu bez UHPC spoje. Výsledky zkoušek poukazují na velmi dobrou shodu z hlediska hodnot finálních zatížení. U spoje rozměru 80 mm dochází ve finální fázi zatěžování centralizaci rozvoje trhlin na rozhraní UHPC/železobeton a kolapsu propagací 1-2 hlavních trhlin. Rozložení trhlin u spoje 140 mm je blízké referenčnímu prvku. V žádném případě spoje nedochází k porušení ve spoji či lokálnímu vytažení výztuže. Výsledky poukazují na vynikající chování spoje i s extrémně malou kotevní délkou výztuže. Pro budoucí návrhy je doporučen návrh kotevní délky rovné 10x průměr výztuže.
- Statické zkoušky inovativní spřahovací lišty potvrdily předpoklady návrhu, a to že nedojde k porušení spřažení v UHPC. Lišta dokázala přenést násobně vyšší zatížení. Došlo k dosažení meze kluzu oceli a deformace čelní části lišty. Byla ověřena schopnost přenést pomocí UHPC centralizované namáhání ve spřažení a její možné aplikace pro experimenty spřažených nosníků.
- V rámci experimentálního programu byly odzkoušeny a porovnány nosníky s klasickou monolitickou deskou a s prefabrikovanou deskou se spojem z UHPC. Odezva obou typů nosníků byla téměř shodná, což potvrdilo, že konstrukce s prefabrikovanou deskou spojenou pomocí UHPC je realizovatelná a spolehlivě působí v obou mezních stavech MSU i MSP. Přitom byla odzkoušena a ověřena i varianta spřažení pomocí spřahovací lišty v alternativě pro běžný beton (kontinuální lišta) i pro UHPC (segmenty lišty).
- Dlouhodobé zkoušky potvrzují předpoklad vycházející z krátkodobých zkoušek, a to obdobný průběh závislosti průhybu na stálém zatížení v čase. U spoje šířky 140 mm se ukazuje mírné zvýšení tuhosti průřezu vlivem UHPC uprostřed zkušebního prvku. Rozložení trhlin je rovnoměrné u vzorků referenčních a u spoje šířky 140 mm. U spoje šířky 80 mm došlo k propagaci trhliny na rozhraní spoje a prefabrikátu, u vzorku je patrný mírně zvýšený průhyb. U všech vzorků dochází k postupnému ustálení vývoje průhybů. Po dvou letech měření nedochází k měřitelnému otevírání trhlin.

6 ZÁVĚR A CELKOVÉ ZHODNOCENÍ

Materiálu a konstrukcím z UHPC/UHPFRC se věnuji dlouhodobě. Ve své studijní, výzkumné a pracovní praxi jsem se věnoval mimo jiné základnímu vývoji UHPC receptur z lokálních surovin dostupných v ČR, zkoušení jak čerstvých materiálových vlastností, tak i zkouškám ztvrdlého UHPC ať už ve formě zkušebních těles či konstrukčních dílců a reálných konstrukcí. Spolupracoval jsem a stále spolupracuji na nejrůznějších výzkumných záměrech věnujících se nejen dílčím analýzám mechanicko-fyzikálních vlastností tohoto materiálu, ale i návrhu technologie výroby a použití UHPC, návrhu a reálného zhotovení většiny zejména mostních konstrukcí v České republice. Výsledky výzkumných projektů a popsaných experimentů jsem prezentoval na několika desítkách zahraničních i tuzemských konferencích, seminářích, školeních či workshopech. Díky těmto prezentačním aktivitám jsme navázali například několikaletou spolupráci s přední světovou firmou na poli vývoje a distribuce UHPC – firmou LafargeHolcim. Své dosavadní zkušenosti jsem uplatňoval a uplatňuji v propagaci materiálu UHPC nejen v České republice. Aktuálně spolupracuji na tvorbě metodik a doporučení pro běžné použití ve stavebnictví. Mým zájmem a zájmem byla a je praktická aplikace materiálu, jeho využití v reálné konstrukci. Rád bych na závěr této práce konstatoval podstatné závěry nejen z oblastí soudržnosti a spřažení UHPC, kterým se věnuje tato práce, ale zmínil i svou motivaci a směr, kterým bych se chtěl dále zabývat a jakým by se měl ubírat dle mého názoru i výzkum na poli UHPC.

V první řadě bych rád stručně shrnul praktické výhody cementového kompozitu UHPC tak jak je lze konstatovat z dosavadních zkušeností. Jako nejdůležitější faktor shledávám vynikající trvanlivostní a bezúdržbové parametry UHPC. Od materiálu přirovnávaného v některých vlastnostech oceli je právě trvanlivost, korozní odolnost a dlouhá životnost (mnohonásobně větší než běžného betonu) tím hlavním důležitých benefitem odlišující se a konkurující oceli. V aktuální době jsme svědky řešení problematických korozních stavů předpjatých mostních konstrukcí, konstrukcí s překročenou dobou životnosti, několika havárií mostních konstrukcí ve světě a právě proto je právě důraz na trvanlivost a bezúdržbovost na místě. Tématika týkající se UHPC spojů a spřažení využívající předností materiálu nejen ve zmiňované trvanlivosti, ale i rychlosti náběhu pevností. Tento fenomén považuji za velmi důležitý pro urychlení celého procesu výstavby ať už insitu betonovaných prvků (UHPC spoje) a tím snížení času dopravního omezení, zrychlení celého procesu výstavby ale i zrychlení a zkvalitnění procesu prefabrikace. Jak v prefabrikaci, tak při betonážích in situ dochází k významné redukci betonovaného objemu vlivem

optimalizace rozměrů prvků a tedy snížení hmotnosti a snižování nároků na transport a i spotřeby primárních surovin. Toto vše má významný pozitivní dopad na dnes velmi často diskutovaný life cycle stavebních konstrukcí vliv a v komplexním hodnocení i pozitivní dopad na uhlíkovou stopu. Samozřejmě je třeba tento efekt hodnotit individuálně dle typu konstrukce.

Nespornou a stále diskutovanou výhodou popisovaného cementového kompozitu je nahrazení běžné betonářské výztuže výztuží rozptýlenou. Eliminací betonářské výztuže dochází k otevření aplikačních možností pro složité architektonické konstrukce rozličných tvarů, tenkostěnné konstrukce, u kterých nelze zajistit požadované krytí výztuže, a především pro oblast extrémně namáhaných detailů. Do poslední zmiňované kategorie patří i zde popisované spoje a spřažení. Ve všech těchto detailech, ve kterých dochází k lokálnímu namáhání s předem obtížně predikovatelným průběhem napětí nebo kombinací namáhání je právě všesměrné vyztužení pomocí rozptýlené výztuže značným benefitem. I u tak razantních optimalizací kotevních délek a rozměrů spojů dochází k duktilnímu chování, při kterém je napětí spolehlivě přenášeno.

Rád bych také ale poukázal na některé aktuální „nevýhody“ tohoto materiálu. Obecně je UHPC stále považováno za drahý „beton“ ve srovnání s NSC. Složení směsi je složité z hlediska kvality vstupních surovin a dodržení jejich poměru, z hlediska technologii výroby a zpracování a ošetřování a mnoha dalších faktorech u běžných betonů ne tak citlivých. Jedná se o jemnozrnný cementový kompozit, jehož hlavní složkou směsi je cement a pečlivě vybrané příměsi a přísady. Jednotlivé složky mohou být nákladné, a to zejména v případě, že jsou dováženy ze zahraničí. Záměr výzkumných programů je tak vyvinout materiál z dostupných surovin v dané lokalitě. A tento výzkum je samozřejmě jak časově, tak i finančně náročný. V nynější době se díky větším zkušenostem, experimentálnímu vývoji, a i díky již zrealizovaným projektům materiál přibližuje nejen české veřejnosti a stává se dostupnějším. Odpadá tak v některých případech nutnost použití drahých pytlovaných směsí UHPC ze zahraničí. V Kloknerově ústavu jsem měl možnost se podílet pod záštitou několika projektů a ve spolupráci s průmyslovými partnery na vyvinutí směsi UHPC ze suchých složek, která splňuje požadované parametry pro UHPC. Směs je nyní dostupná v ČR a průmyslovými partnery je aplikována. I když je tato směs prefabrikována je nutná znalost materiálu i z hlediska aplikace a možnosti přizpůsobení směsi z hlediska konzistence, rychlostí náběhů nebo výsledných parametrů. Vynikající parametry materiálu lze dosáhnout pouze za přísného dodržení všech technologických postupů při míchání,

ukládání a ošetřování směsi. V první řadě je nutné obecné zavedení technologické kázně a seznámení veřejnosti s důsledky jejího nedodržení.

Jako velmi důležitou aktuální „nevýhodu“ UHPC shledávám absenci platných norem. Ve světě (Francie, Švýcarsko, USA, Japonsko atd.) lze nalézt množství dokumentů, doporučení či předpisů popisující návrh směsí, technologii výroby, návrh i realizaci konstrukcí z UHPC. Komplikovanou stránkou je však jejich vzájemná provázanost, která u většiny dokumentů chybí. V mnoha případech ani nelze tuto provázanost zaručit vzhledem k odlišnému pohledu na návrh konstrukce, využití pevnostních parametrů a chápání možností stále poměrně nového materiálu. Pro návrh konstrukce je tak nutné využití kombinace dostupných dokumentů a jejich verifikace v dané zemi či rozsáhlý experimentální výzkum pro validaci výpočetních modelů a návrhu konstrukce. Tento náročný proces je stále poslední fází náročného cyklu prosazení UHPC jako vhodného konstrukčního materiálu pro danou konstrukci. Aktuálně se pracuje na tvorbě nových metodik pro využití UHPC v ČR což hodnotím velmi kladně a snažím se maximálně přispět.

Velký význam v oblasti nových konstrukcí a materiálů hraje numerické modelování. Pomocí pokročilých technologií lze testovat a parametricky zadávat libovolnou konstrukci, zatížení a testovat tak model konstrukce do dosažení únosnosti. Pokud hovoříme o UHPC a zejména o UHPRFC ukazuje se, že samotný model materiálu je velmi složitý a ve většině případů je nejprve nutné model „nafitovat“ na experimentální výsledky. Ukazuje se, že zadání správných vstupních parametrů a jejich stanovení ze zkoušek je velmi komplikované.

Celkově lze konstatovat, že UHPC představuje velmi slibný materiál s rozsáhlým záběrem aplikačních možností, avšak pro jeho správné použití je zapotřebí zkušeností s danou problematikou a podporu norem. Jedině tak lze materiál rozšířit pro šikrou veřejnost. Materiál také stále skýtá možnosti dalšího vývoje a výzkumu, a to nejen na poli materiálovém, ale i návrhovém a v oblasti zmiňované numerické analýzy.

Velmi rád bych se v budoucnu věnoval vyhodnocování dlouhodobých zkouškách materiálu a konstrukcí, a to zejména z hlediska únavových cyklických namáhání a jeho vlivu na degradační procesy. Vzhledem k mému dalšímu zaměření do oblasti stavebně technických průzkumů mostních konstrukcí, bych se rád využil svých zkušeností a zaměřil se na metodiku nedestruktivních a destruktivních diagnostik UHPC konstrukcí. Tato oblast je doposud velmi málo probádána vzhledem k nízkému stáří konstrukcí ve světě a to cca 20-25 let. Dosavadní zkušenosti potvrzují velmi dobré vlastnosti UHPC a prakticky nulové degradační procesy na prvních UHPC konstrukcích zhotovených po roce 2001.

7 REFERENCE

- [1] Schmidt M., Teichmann T. Ultra-High Performance Concrete: Basis for Sustainable Structures. In. Proc. Central Europe towards Sustainable Building, CESB07, Prague, 2007.
- [2] Zhou, M.; Lu, W.; Song, J.; Lee, G.C. Application of ultra-high performance concrete in bridge engineering. *Constr. Build. Mater.* 2018, 186, 1256–1267
- [3] Abbas, S., Nehdi, M.L., Saleem, M.A.: Ultra – High Performance Concrete: Mechanical Performance, Durability, Sustainability and Implementation Challenges, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, Vol.10, No.3, pp. 271-295, September 2016
- [4] Ryohei Yanagida, Takuro Nakamura, Katsuya Kono and Junichiro Niwa, MECHANICAL PROPERTIES OF FIBER REINFORCED PORE FREE CONCRETE WITH HIGH STRENGTH MATRIX ABOVE 400 MPA, AFGC-ACI-fib-RILEM Int. Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete, UHPFRC 2017 – October 2-4, 2017, Montpellier, France
- [5] P. Hájek, C. Fiala, and A. Lupíšek, “High performance concrete for environmentally efficient building structures,” *Key Engineering Materials*, vol. 691, pp. 272–284, 2016.
- [6] Greg Holbrook, *Constructing the Future with Ultra-High Performance Concrete*, ASCE, 2016 [on-line]. [cit. 2020-11-19].
- [7] VÍTEK, J.L., COUFAL, R.: *Vysokopevnostní betony a UHPC*, Beton TKS, Betonové konstrukce 21.století – betony s přidanou hodnotou, Praha, 2012, str. 43-49
- [8] Tichý, Komanec, Slánský, Ševčík, Kolísko. Unikátní lávka pro pěší z UHPC v obci Čeperka, *Beton TKS*, číslo 4/2016, strana 21-25, ISSN 1213-3116.
- [9] Tej P., Čítek D. and Kolísko J.: – Design of thin-walled U-profile footbridge made of UHPC. UHPFRC 2017, Montpellier, France, Oct.2-4,2017
- [10] Marek, J.; Kolísko, J.; Tej, P.; Čítek, D. et al., *New UHPFRC bridges in the Czech Republic*, In: 10th International Conference Fibre Concrete 2019. Bristol: Institute of Physics Publishing, 2019. vol. 596. ISSN 1757-899X.
- [11] Kolísko, J.; Čítek, D.; Tej, P.; Marek, J.; Dobiáš, D.; Řeháček, S., *Design and production of a segmental prestressed UHPFRC bridge in Příbor*, In: Second International Interactive Symposium on Ultra-High Performance Concrete. Ames, Iowa: Iowa State University, 2019
- [12] Eugen Brühwiler, “Structural UHPFRC”: Welcome to the post-concrete era!, *First International Interactive Symposium on UHPC*, USA, 2016
- [13] Čítek, D.; Coufal, R.; Vítek, J.; Čítek, A., *Využití UHPC pro zesilování konstrukcí*, In: TECHNOLOGIE A PROVÁDĚNÍ 2019. Praha: ČBS - Česká betonářská společnost ČSSI, 2019. ISBN 978-80-906759-9-
- [14] C. Shi, Z. Wu, J. Xiao, D. Wang, Z. Huang, Z. Fang; Review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design, *Construction and Building Materials* 101, p. 741-751, 2015.

- [15] D. Wang, C. Shi, Z. Wu, J. Xiao, Z. Huang, Z. Fang; Review on ultra high performance concrete: Part II. Hydratation, microstructure and properties, *Construction and Building Mat.* 96, p. 368-377, 2015
- [16] SETRA/AFGC: Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes: Interim Recommendations. 01/2002
- [17] AFGC/SETRA: Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes, Recommendations. Paris CEDEX 06/2013.
- [18] Standard (Technical Leaflet) SIA 2052 UHPFRC – Materials, design and construction, March 2016, EPFL, Switzerland
- [19] Kolísko, Bouška, Čítek, Huňka, Rydval, Vokáč; Metodika 1, Metodika pro návrh UHPC a pro materiálové zkoušky, verze 2015.
- [20] Kalný M., Komanec J., Kvasnička V., Kolísko J., Tej P. Metodika 2, Metodika pro navrhování prvků z UHPC, verze 2015.
- [21] Tichý, Kolísko, Vokáč, Čítek, Trefil, Kalný. Metodika 3, Metodika pro výrobu prvků z UHPC a pro kontrolu jejich provedení, verze 2015.
- [22] Pagán Ortiz J. Ultra-High Performance Concrete: A State-Of-The-Art Report for The Bridge Community. In: U.S. Department of Transportation: Federal Highway Administration, June 2013, [on-line]
- [23] Bøhnsdalen Eide M., Hisdal J. M. Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC) – State of the art. ISSN 1891–1978 [on-line] ISBN 978-82-536-1298-0
- [24] Li, Victor C, Hwai-Chung WU. Conditions for Pseudo Strain-Hardening in Fiber Reinforced Brittle Matrix Composites. *Applied Mechanics Reviews.* 1992, 48(8), 390– 398, ISSN 0003-6900.
- [25] Noshiravani, T. 2012. “Structural Response of R-UHPFRC – RC Composite Members Subjected to Combined Bending and Shear.” EPFL PhD 5246.
- [26] Denarié E., Brühwiler E. Strain Hardening of Ultra-high Performance Fibre Reinforced Concrete: Deformability versus Strength Optimization, *International Journal for Restoration of Buildings and Monuments*, Aedificatio Publishers Freiburg Germany, 2011, Vol. 12, No 6, pp.397-410.
- [27] Wuest J. Structural behaviour in tension of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete in composite elements. Doctoral Thesis No. 3987, Swiss Federal Institute of Technology Lausanne (EPFL), 2007, (in French).
- [28] Duque, L.F.M, Varga,I., Graybeal, B.A.: Fiber Reinforcement Influence on the Tensile Response of UHPFRC, First International Interactive Symposium on UHPC -2016, Des Moines, IOWA, Jul.18 – 20, 2016
- [29] ČSN EN 14889-1 (72 3434) Vlákna do betonu - Část 1: Ocelová vlákna - Definice, specifikace a shoda. Praha: Český normalizační institut, 2007.

- [30] Bouška P., Hájek P., Vlach T., a kol. UHPC matrix for ultra-thin elements with non-conventional reinforcement. 1st edition 2017, ISBN 978-80-01-06120-6, 110 pages.
- [31] Ingrid Lande Larsen, Rein Terje Thorstensen, The influence of steel fibres on compressive and tensile strength of ultra high performance concrete: A review, *Construction and Building Materials*, Volume 256, 2020, 119459, ISSN 0950-0618,
- [32] EN 1992-1-1 Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings
- [33] Bažant Z. P., Baweja S. Creep and Shrinkage Prediction Model for Analysis Design of Concrete Structures: Model B3. ACI Special Publication Creep and Shrinkage of Concrete, A, Al-Manaseer, Editor, 2000.
- [34] Soška J., Vráblík L. Porovnání matematických modelů pro výpočet smrštění a dotvarování betonu. *BETON TKS* 6/2011, ISSN 1213-3116.
- [35] Slánský, Ševčík, Peška, Tichý, Panely mostního zábradlí z UHPC. *Časopis Materiály pro stavbu* [on-line].
- [36] J. Tichý, D. Čítek, J. Kolísko, J. Komanec, B. Slánský, M. Hubka, S. Řeháček, UHPC Footbridge over the Opatovický canal, *Solid State Phenomena* vol. 249 (2016), Pfafikon, Switzerland.
- [37] von Werder, J., Simon, S., Gardei, A. et al. Thermal and hydrothermal treatment of UHPC: influence of the process parameters on the phase composition of ultra-high performance concrete. *Mater Struct* **54**, 44 (2021). <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01633-w>
- [38] Kang, S. H., Lee, J. H., Hong, S. G., & Moon, J. (2017). Microstructural Investigation of Heat-Treated Ultra-High Performance Concrete for Optimum Production. *Materials* (Basel, Switzerland), 10(9), 1106. <https://doi.org/10.3390/ma10091106>
- [39] A. Cavdar, A study on the effects of high temperature on mechanical properties of fiber reinforced cementitious composites, *Composites* 43 (2012) 2452-2463.
- [40] ČSN EN 206+A1 Beton – Specifikace, výroba, vlastnosti a shoda. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
- [41] Collepardi, M. *Moderní beton*. 1st ed.; ČKAIT, Pelhřimov 2009.
- [42] Komanec, J. - Tej, P. - Marek, J., - Čítek, D., *BETON-technologie, konstrukce, sanace*. 2020, 20(118), 8-12. ISSN 1213-3116
- [43] Kolisko J. & Čítek D. & Tej P. & Marek J. & Dobias D. & Rehacek S., (2019) "Design and Production of a Segmental Prestressed UHPFRC Bridge in Pribor", *International Interactive Symposium on Ultra-High Performance Concrete* 2(1).
- [44] Marek, J.; Kolísko, J.; Tej, P.; Čítek, D. et al., New UHPFRC bridges in the Czech Republic, In: 10th International Conference Fibre Concrete 2019. Bristol: Institute of Physics Publishing, 2019. vol. 596. ISSN 1757-899X.

- [45] Tej P., Knez P., Mourek J., Císler O., Design of an experimental arch pedestrian bridge made of UHPC. IABSE Congress Stockholm, 2016: Challenges in Design and Construction of an Innovative and Sustainable Built Environment 2016, Pages 1352-1355.
- [46] ČSN EN 12350-5 (73 1301) Zkoušení čerstvého betonu - Část 5: Zkouška rozlitém. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [47] KOLÍSKO, J., ČÍTEK, D., TEJ, P., RYDVAL, M. Production of Footbridge with Double Curvature Made of UHPC. In: Fibre Concrete 2017. Bristol: IOP Publishing Ltd, 2017. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.Vol. 246. ISSN 1757-899X
- [48] Dobiáš, D.; Pernicová, R.; Mandlík, T. Water transport properties and depth of chloride penetration in ultra high performance concrete In: Concrete under Severe Conditions - Environment and Loading. Pfaffikon: Trans Tech Publications Inc., 2016. p. 137-142. Key Engineering Materials. ISSN 1013-9826. ISBN 978-3-03835-621-9.
- [49] Magdalena Rajczakowska, Self-Healing Concrete, Academic thesis, Lulea University of Technology, december 2019, ISSN 1402-1757
- [50] Granger, S., Loukili, A., Pijaudier-Cabot, G., Chanvillard, G. (2007). "Experimental Characterization of the Self-Healing of Cracks in an Ultra High Performance Cementitious Material: Mechanical Tests and Acoustic Emission Analysis." Cem. Concr. Res., 37(4), 519-527
- [51] J.F. Batoz, Behloul M. Uhpfrc, Development on the last two decades: an overview, Toutlemonde F, Resplendin, Int. Symp. UHPFRC. Marseille RILEM Publ. (2009), pp. 1-13
- [52] M. Rebenrost, G. Wight, Experience and Applications of Ultra-High Performance Concrete in Asia, Kassel University Press, Kassel, Germany (2008), pp. 19-30
- [53] Vítek, J.; Čítek, D., Bond of reinforcement and UHPC, In: 20. Betonářské dny 2013. Praha: Česká betonářská společnost ČSSI, 2013. pp. 270-275.
- [54] JENDELE, L., ČERVENKA, J.: Finite element modeling of reinforcement with bond, Computers and structures, Vol. 84, Issue 28, Nov. 2006, pp. 1780-1791
- [55] Mo Alkaysi, Sherif El-Tawil, Factors affecting bond development between Ultra High Performance Concrete (UHPC) and steel bar reinforcement, Construction and Building Materials, Volume 144, 2017, Pages 412-422, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.091>.
- [56] CEB-FIP Model Code 1990 - Final Draft - Vol. 1, London, 1993
- [57] Matthew Haskett, Deric John Oehlers, M.S. Mohamed Ali, Local and global bond characteristics of steel reinforcing bars, Engineering Structures, Volume 30, Issue 2, 2008, Pages 376-383, ISSN 0141-0296.
- [58] Huo, L.; Cheng, H.; Kong, Q.; Chen, X. Bond-Slip Monitoring of Concrete Structures Using Smart Sensors—A Review. Sensors 2019, 19, 1231.
- [59] Tepfers, R.: A Theory of bond applied to overlapped tensile reinforcement splices of deformed bars. Report 73-2, Chalmers University of Technology, Göteborg, 1973.

- [60] Laura Lemnitzer, Steffen Schrödera, Alexander Lindorfa, Manfred Curbacha, Bond behaviour between reinforcing steel and concrete under multiaxial loading conditions in concrete containments, 20th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 20) Espoo, Finland, August 9-14, 2009
- [61] E. Fehling, P. Lorenz, T. Leutbecher, Experimental Investigations on Anchorage of Rebars in UHPC, M. Schmidt, E. Fehling (Eds.), Proceedings of Hipermat 2012 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials (2012)
- [62] Silva, B. V., Barbosa, M. P., Silva Filho, L. C. P., & Lorrain, M. S.. (2013). Experimental investigation on the use of steel-concrete bond tests for estimating axial compressive strength of concrete: part 1. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 6(5), 715-736.
- [63] Chao, Shih-Ho & Naaman, Antoine & Parra-Montesinos, Gustavo. (2009). Bond Behavior of Reinforcing Bars in Tensile Strain-Hardening Fiber-Reinforced Cement Composites. *ACI Structural Journal*. 106. 897-906.
- [64] Gudonis, Eugenijus & Kačianauskas, Rimantas & Gribniak, Viktor & Weber, André & Jakubovskis, Ronaldas & Kaklauskas, Gintaris. (2014). Mechanical Properties of the Bond Between GFRP Reinforcing Bars and Concrete. *Mechanics of Composite Materials*. 50. 457-466. 10.1007/s11029-014-9432-0.
- [65] Amir A. Arab, Sameh S. Badie, Majid T. Manzari, A methodological approach for finite element modeling of pretensioned concrete members at the release of pretensioning, *Engineering Structures*, Volume 33, Issue 6, 2011, Pages 1918-1929, ISSN 0141-0296,
- [66] Briere, V., K. A. Harries, J. Kasan, and C. Hager. 2013. "Dilation Behavior of Seven-Wire Prestressing Strand – The Hoyer Effect." *Construction and Building Materials* 40: 650–658.
- [67] Cousins, T. E., M. H. Badeaux, and S. Moustafa. 1992. "Proposed Test for Determining Bond Characteristics of Prestressed Strand." *PCI Journal* 37 (1): 66–73.
- [68] ČSN 73 1328 Stanovení soudržnosti oceli s betonem, ČNI, Praha, 1971
- [69] RILEM RC5 Bond Test for Reinforcing Steel. 1. Beam test, Technical Recommendations for the Testing and Use of Construction Materials, London, E&FN Spon, 1994
- [70] RILEM. RC6 Bond test for reinforcement steel. 2. Pull-out test., Technical Recommendations for the Testing and Use of Construction Materials, London, E&FN Spon, 1994
- [71] Lanwer J-P, Oettel V, Empelmann M, Höper S, Kowalsky U, Dinkler D (2019) Bond behavior of micro steel fibers embedded in ultra-high performance concrete subjected to monotonic and cyclic loading. *Struct Concr* 20(4):1243–1253.
- [72] Rostásy F.S. & Hartwich K., Bond of deformed reinforcing bar embedded in steel fiber reinforced concrete, *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, Vol. 10, No. 3, 1988, pp.151-158

- [73] Harajli M.H., Local Bond-Slip Behavior of Reinforcing Bars Embedded in Fiber Reinforced Concrete, Proceedings of International Conference: Bond in Concrete – From Research to Practice, Riga, 1992, pp.7.87-7.97
- [74] De Bonte F., Hechtsterkte bij staalvezelbeton, MSc Thesis, Katholieke Universiteit Leuven, 2000, pp.140
- [75] DS 2082:1980, Steel for reinforced concrete - Test of bond ability
- [76] Aarup B. & Jensen B.Chr., Bond Properties of High Strength Fiber Reinforced Concrete, ACI Special Publication SP-180 - Bond and Development of Reinforcement, 1998, pp.459-472
- [77] Cattaneo S. & Rosati G., Bond and splitting in High Performance Fiber Reinforced Concrete, Proceedings of Fifth RILEM Symposium on Fiber-Reinforced Concretes (RC), Lyon, Ed. P.Rossi and G.Chanvillard, 2000
- [78] Plizzari G.A., Bond and splitting crack development in normal and high strength fiber reinforced concrete, Proceedings of 13th Eng. Mechanics Division Conference – EMD 99, Baltimore, 1999, pp. 6
- [79] Plizzari G.A., Deldossi M.A., Massimo S., Experimental study on anchored bars in RC elements with transverse reinforcement, Materials and Structures, Vol. 29, 1996, pp. 534-542
- [80] Hota S. & Naaman A.E., Bond Stress-Slip Response of Reinforcing Bars Embedded in FRC Matrices under Monotonic and Cyclic Loading, ACI Structural Journal, Vol. 94, No. 5, 1997, pp. 525-537
- [81] Samen Ezeldin A., Balaguru P.N., Bond Behavior of Normal and High-Strength Fiber Reinforced Concrete, ACI Materials Journal, Vol. 86, No. 5, 1989, pp. 515-524
- [82] Samen Ezeldin A., Balaguru P.N., Bond Performance of Reinforcing Bars Embedded in Fiber Reinforced Concrete and Subjected to Monotonic and Cyclic Loads, Proceedings of ASCE on Serviceability and Durability of Construction Materials, 1990, pp.145-154
- [83] Krstulovic-Opara N., Watson K.A & LaFave J.M., Effect of increased Tensile Strength and Toughness on Reinforcing Bar Bond Behavior, Cement & Concrete Composites, Vol. 16, 1994, pp. 129-141
- [84] Nielsen C.V., Presentation of cyclic load tests of rebars anchored in steel fiber reinforced high-strength composite, Fatigue of Concrete Structures (ed. L.P. Hansen), Department of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University, Aalborg, Denmark, 1993, pp.65-71
- [85] Rostásy F.S. & Hartwich K., Bond of deformed reinforcing bar embedded in steel fiber reinforced concrete, The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, Vol. 10, No. 3, 1988, pp.151-158
- [86] ČSN 73 1333 Zkoušení soudržnosti předpínací výztuže s betonem, ČNI, Praha, 1989

- [87] ASTM A1081/A1081M. Standard test method for evaluating bond of sevenwire steel prestressing strand, 2015 Edition, 2015
- [88] Canh N. Dang, Cameron D. Murray, Royce W. Floyd, W. Micah Hale, J.R. Martí-Vargas, Analysis of bond stress distribution for prestressing strand by Standard Test for Strand Bond, Engineering Structures, Volume 72, 2014, Pages 152-159,
- [89] Lee, N.; Koh, K.; Park, S.; Ryu, G. Microstructural investigation of calcium aluminate cement-based ultra-high performance concrete (UHPC) exposed to high temperatures. Cem. Concr. Res. 2017, 102, 109–118
- [90] Kang, S.-H.; Lee, J.-H.; Hong, S.-G.; Moon, J. Microstructural investigation of heat-treated ultra-high performance concrete for optimum production. Materials 2017, 10, 1106
- [91] Pavlík, Z.; Fořt, J.; Pavlíková, M.; Zemanová, L.; Pokorný, J.; Trník, A.; Čítek, D.; Černý, R., Properties of high-performance fiber-reinforced concrete after thermal treatment at high temperatures, Materials and Technology. 2019, 53(4), 481-487. ISSN 1580-2949.
- [92] P. Kalifa, G. Chene, C. Galle, High-temperature behavior of HPC with polypropylene fibres- from spalling to microstructure. Cem. Concr. Res. 31 (2001) 1487–99.
- [93] E. Vejmelková, P. Konvalinka, P. Padevět, L. Kopecký, M. Keppert, R. Černý, Mechanical, Hygric, and Thermal Properties of Cement-Based Composite with Hybrid Fiber Reinforcement Subjected to High Temperatures Int. J. Thermophys. 30 (2009) 1310-1322.
- [94] Pokorný P, Kolísko J, Čítek D, Kostelecká M. Effect of Elevated Temperature on the Bond Strength of Prestressing Reinforcement in UHPC. Materials (Basel). 2020 Nov 5;13(21):4990
- [95] Bertolini, L.: Corrosion of Steel in Concrete (Prevention, Diagnosis, Repair). WILEY-VCH Verlag GmbH and Co. KGaA, Weinheim 2004.
- [96] Böhni, H.: Corrosion in reinforced concrete structures. Woodhead Publishing and CRC Press, London 2005.
- [97] Bowsher, B.: Corrosion protection of reinforcing steels. Technical report fib-Bulletin 49, IFSC, Lousanne 2009.
- [98] Tuutti, K.: Corrosion of steel in concrete. CBI-forskning/research, Swedisch Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, 1982.
- [99] Pokorný, P., Dobiáš, D., Vokáč, M., Kouřil M., Kubásek, J.: The assessment of the impact of corrosion of galvanized steel on bond strength of plain bars with „NSC“ concrete. Koroze a ochrana materiálu, 2015, vol. 59, No. 2, pp. 53-65.
- [100] P. Pokorný. "Vliv koroze zinkované oceli na soudržnost s betonem / The influence of galvanized steel on bond strength with concrete" Koroze a ochrana materialu, vol. 56, no. 4, 2013.
- [101] Laco, J., Borzovič, V., Pažma, P.: Investigation of bond influence of seven wire strands on behaviour of post-tensioned two span girders. Concrete – Technology, Construction and Rehabilitation, (Beton TKS), Vol. 15, 2/2015, 55-59

- [102] Vitek, J.L., Čítek, D., 2016. Effect of Reduced Bond of Prestressed Strands. SSP 249, 296–300
- [103] Graybeal B., Design and Construction of Field-Cast UHPC Connections, FHWA Publication No: FHWA-HRT-14-084, USA, 2014
- [104] Graybeal, B., *Construction of Field-Cast Ultra-High Performance Concrete Connections*, FHWA-HRT-12-038, McLean, VA, April 2012.
- [105] Sritharan, Sri & Aaleti, Sriram & Honarvar, Ebadollah & Rouse, Jon & Wipf, Terry. (2014). Structural Characterization of UHPC Waffle Bridge Deck and Connections.
- [106] Jaber Jahromi A, Valikhani A, Mantawy IM and Azizinamini A (2020) Service Life Design of Deck Closure Joints in ABC Bridges: Guidelines and Practical Implementation. *Front. Built Environ.* 5:152.
- [107] Tim Peruchini, John Stanton, Paolo Calvi, Investigation of Ultra-High Performance Concrete for Longitudinal Joints in Deck Bulb Tee Bridge Girders, University of Washington Seattle, WA 98195
- [108] Tim Peruchini, John Stanton, Paolo Calvi Use of UHPC for Longitudinal Joints in Deck Bulb Tee Bridge Girders, online https://abc-utc.fiu.edu/wp-content/uploads/sites/52/2019/09/2019-Module-6_UHPC-Stanton-Peruchini-2019.09.10.pdf
- [109] Vic H. Perry, M.A.Sc., P.Eng., Wade F. Young, M.Eng., and Brent I. Archibald, P.Eng. Whitemans Creek Bridge: Accelerating construction with UHPC and FRP, online: <https://www.constructioncanada.net/whitemans-creek-bridge-accelerating-construction-with-uhpc-and-frp/>
- [110] McDonagh M. D. & Foden A. J., (2019) “UHPC Joint Fill Construction Problems and Solutions on the Pulaski Skyway”, *International Interactive Symposium on Ultra-High Performance Concrete* 2(1)
- [111] PROJECT CASE STUDY REHABILITATION OF THE PULASKI SKYWAY ULTRA-HIGH PERFORMANCE CONCRETE CONNECTIONS, FHWA, 2018
- [112] McDonagh, M.D. and Foden, A.J., “Benefits of Ultra-High Performance Concrete for the Rehabilitation of the Pulaski Skyway,” Proceedings of the First International Interactive Symposium on UHPC, Des Moines, IA, July 18-20, 2016

8 SEZNAM DOSAVADNÍCH PUBLIKACÍ DOKTORANDA

Seznam dosavadních publikací autora byl přejet ze systému V3S (www.v3s.cvut.cz). K 12/2020 je autorství nebo spoluautorství vedeno celkem u 259 záznamů. Dle značení V3S se jedná o příspěvky typu: STA, ABS, CLA, KNI, UZV, FVZ, PAT, VZP). Ve významných databázích je aktuálně uveden tento počet publikací:

WoS: 28 publikací (H - Index 3)

Scopus: 72 publikací (H -Index 5)

V souhrnu níže jsou uvedeny pouze vybrané výstupy k tématu disertační práce a spojené s UHPC typu články, stať ve sborníku, kniha a abstrakt publikované na tuzemských a zahraničních konferencích a časopisech.

- [1] Marek, J.; Kolísko, J.; Tej, P.; Čítek, D. et al., New UHPFRC bridges in the Czech Republic, In: 10th International Conference Fibre Concrete 2019. Bristol: Institute of Physics Publishing, 2019. vol. 596. ISSN 1757-899X.
- [2] Čítek, D.; Coufal, R.; Vítek, J.; Čítek, A., Využití UHPC pro zesilování konstrukcí, In: TECHNOLOGIE A PROVÁDĚNÍ 2019. Praha: ČBS - Česká betonářská společnost ČSSI, 2019. ISBN 978-80-906759-9-5.
- [3] Čítek, D.; Kolísko, J.; Kratochvíle, L., Temperature impact on bond between steel and ultra high performance, In: Proceedings of 177th ISERD International Conference. Institute for Technology and Research, 2019. p. 52-55. ISBN 978-93-89469-86-8.
- [4] Čítek, D.; Kolísko, J.; Řeháček, S.; Kryštof, M., Delayed casting of UHPFRC elements, In: Key Engineering Materials. Durnten-Zurich: Trans Tech Publications Ltd, 2019. p. 424-429. vol. 801. ISSN 1013-9826. ISBN 978-3-0357-1491-3.
- [5] Čítek, D.; Řeháček, S.; Kolísko, J., Bond strength between steel and UHPFRC after elevated temperature exposition, In: Proceedings of the 3rd ACF Symposium on Assessment and Intervention of Existing Structures. Asian Concrete Federation, 2019.
- [6] Čítek, D.; Kryštof, M.; Čítek, A.; Kolísko, J., Load bearing capacity tests of thin walled structures made from UHPFRC, In: CONCRETE Innovations in Materials, Design and Structures - Proceedings of the fib Symposium 2019. Lausanne: Fédération Internationale du Béton, 2019. p. 373-379. ISSN 2617-4820. ISBN 978-2-940643-00-4.
- [7] Čítek, D.; Záleská, M.; Pavlík, Z.; Kryštof, M.; Řeháček, S., Properties of lightweight concrete with waste scrap tire rubber aggregate at elevated temperature, In: 9th International Conference On Concrete Under Severe Conditions - Environment and Loading - proceedings. Porto Alegre: Unisinos - Avenida Doutor Nilo Peçanha - Boa Vista, 2019. ISBN 978-65-80633-00-5.

- [8] Vítek, J.; Čítek, D.; Coufal, R.; Kolísko, J.; Marek, J., UHPC a jeho aplikace v České republice, *BETON-technologie, konstrukce, sanace*. 2019, 19(4), 98-111. ISSN 1213-3116.
- [9] Čítek, D.; Kolísko, J.; Řeháček, S.; Dobiáš, D., New perspective in design of innovative UHPFRC structures, In: 9th International Conference On Concrete Under Severe Conditions - Environment and Loading. Porto Alegre: Unisinos University, 2019.
- [10] Kolísko, J.; Tej, P.; Vráblík, L.; Marek, J.; Čítek, D.; Mourek, J.; Blank, M., Návrh a výroba segmentové předepnuté lávky z UHPC v Příboře, *BETON-technologie, konstrukce, sanace*. 2019, 19(4), 3-10. ISSN 1213-3116.
- [11] Čítek, D.; Kolísko, J.; Pokorný, P., Teplotní namáhání UHPC - vliv na soudržnost předpínací výztuže, *BETON-technologie, konstrukce, sanace*. 2019, 2019(6), 60-61. ISSN 1213-3116.
- [12] Kolísko, J.; Čítek, D.; Tej, P.; Marek, J.; Dobiáš, D.; Řeháček, S., Design and production of a segmental prestressed UHPFRC bridge in Příbor, In: Second International Interactive Symposium on Ultra-High Performance Concrete. Ames, Iowa: Iowa State University, 2019.
- [13] Čítek, D.; Vítek, J.; Coufal, R.; Čítek, A.; Kryštov, M.; Kudrnáčová, L., Experimental verification of concrete elements strengthened with UHPFRC, In: Second International Interactive Symposium on Ultra-High Performance Concrete. Ames, Iowa: Iowa State University, 2019.
- [14] Kryštov, M.; Čítek, A.; Čítek, D.; Kolísko, J.; Řeháček, S., Experimentální ověřování zesílených betonových panelů vrstvou UHPFRC, In: *BETÓN 2019*. Bratislava: Jaga group, s.r.o., 2019. p. 236-243. ISBN 978-80-8076-138-7.
- [15] Pokorný, P.; Mandlík, T.; Čítek, D.; Vokáč, M., Souhrnné zhodnocení možnosti použití žárově zinkované výztuže do betonu – část II: Zkoušky soudržnosti s betonem, *BETON-technologie, konstrukce, sanace*. 2018, 5 61-65. ISSN 1213-3116.
- [16] Pokorný, P.; Mandlík, T.; Čítek, D.; Vokáč, M., Souhrnné zhodnocení možnosti použití žárově zinkované výztuže DO betonu – část I: Elektrochemické korozní zkoušky, *Beton-technologie, konstrukce, sanace*. 2018, 5 56-60.
- [17] Řeháček, S.; Dobiáš, D.; Čítek, D.; Kolísko, J., Concrete resistance against low-pH environment, In: 9th International Conference On Concrete Under Severe Conditions - Environment and Loading. Porto Alegre: Unisinos University, 2019.
- [18] Řeháček, S.; Bouška, P.; Čítek, D.; Kolísko, J., Damage investigation of pre-stressed cables in segmental box girder concrete bridge ev. No. 324-018 in Pardubice, Czech Republic, In: 7th Global Conference on Materials Science and Engineering. Bristol: Institute of Physics Publishing, 2019. ISSN 1757-8981.
- [19] Dobiáš, D.; Čítek, D.; Pokorný, P.; Kolísko, J., Resistance of concrete modified with styrene-acrylate based admixture to aggressive environment, In: 19th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2019. Sofia: STEF92 Technology Ltd., 2019. p. 247-254. vol. 19. ISSN 1314-2704. ISBN 978-619-7408-89-8.

- [20] Pavlík, Z.; Fořt, J.; Pavlíková, M.; Zemanová, L.; Pokorný, J.; Trník, A.; Čítek, D.; Černý, R., Properties of high-performance fiber-reinforced concrete after thermal treatment at high temperatures, *Materials and Technology*. 2019, 53(4), 481-487. ISSN 1580-2949.
- [21] Záleská, M.; Pavlík, Z.; Čítek, D.; Jankovský, O.; Pavlíková, M., Eco-friendly concrete with scrap-tyre-rubber-based aggregate - Properties and thermal stability, *Construction and Building Materials*. 2019, 225 709-722. ISSN 0950-0618.
- [22] Záleská, M.; Čítek, D.; Pavlíková, M.; Bazgier, V.; Pavlík, Z., Scrap tire rubber-based aggregate in lightweight concrete, In: *Interdependence between Structural Engineering and Construction Management*. Fargo: ISEC Press, 2019. p. MAT-06-1-MAT-06-6. vol. 6. ISSN 2644-108X. ISBN 978-0-9960437-6-2.
- [23] Kolísko, J.; Čítek, D.; Císler, O.; Tej, P.; Marek, J., Unikátní tenkostěnná oblouková lávka z UHPFRC, *Beton v architektuře*. 2018, 18(02), 34-38. ISSN 1213-3116.
- [24] Jursík, P.; Vítek, J.L.; Čítek, D., Analysis of performance of local puzzle sheet in a joint made of UHPC, In: *Solid State Phenomena*. Uetikon-Zurich: Trans Tech Publications, 2018. p. 141-146. vol. 272. ISSN 1662-9779. ISBN 978-3-0357-1284-1.
- [25] Záleská, M.; Pavlíková, M.; Pokorný, J.; Čítek, D.; Jankovský, O.; Pavlík, Z., Lehký beton s využitím odpadního expandovaného polypropylenu a syntetické koagulované amorfnní siliky, *BETON-technologie, konstrukce, sanace*. 2019, 19(1), 48-55. ISSN 1213-3116.
- [26] Holý, M.; Čítek, D.; Tej, P.; Vráblík, L., Flexural Strength of Thin Slabs Made of UHPFRC, In: *25th Concrete Days 2018*. Curich: Trans Tech Publications, 2019. p. 224-229. *Solid State Phenomena*. vol. 292. ISSN 1662-9779. ISBN 978-3-0357-1459-3.
- [27] Tichý, J.; Čítek, D.; Kolísko, J.; Komanec, J.; Řeháček, S. et al., UHPC Footbridge over the Opatovický Canal, In: *Proceedings of International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*. Sofia: International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM, 2016. p. 320-324. ISSN 1314-2704.
- [28] Řeháček, S.; Čítek, D.; Kolísko, J., Quality Control of the Concrete of the Supporting Structure of Bridge Reg. No. 333-003 over the Elbe in Přelouč, In: *Special Concrete and Composites 2017*. Zürich: Transtech Publications, 2018. p. 278-285. *Key Engineering Materials*. vol. 760. ISSN 1013-9826. ISBN 978-3-0357-1240-7.
- [29] Vítek, J.L.; Čítek, D.; Kolísko, J.; Coufal, R.; Jursík, P., Application of UHPC Joints in Precast Structures, In: *Proceedings of International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*. Sofia: International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM, 2016. p. 267-272. ISSN 1314-2704.
- [30] Čítek, D.; Záleská, M.; Pavlík, Z.; Kryštov, M.; Řeháček, S., Lightweight Concrete with Waste Tire Rubber Based Aggregate – Material and Thermal Properties, In: *The 8th International Conference of Asian Concrete Federation*. Thailand Concrete Association, 2018. p. 173-178. ISBN 978-616-91987-6-5.

- [31] Čítek, D.; Řeháček, S.; Tej, P.; Kolísko, J., COLD JOINTS OF THIN-WALLED UHPFRC STRUCTURES, In: Proceedings of the 2nd International Conference on UHPC Materials and Structures UHPC 2018 - China. Bagnaux: Rilem Publications s.a.r.l., 2018. p. 739-746. ISBN 978-2-35158-219-0.
- [32] Čítek, D.; Marek, J.; Řeháček, S.; Dobiáš, D.; Kolísko, J.; Tej, P., Innovative Elements and Structures Made From Ultra High – Performance Fibre Reinforced Concrete, In: Fib Congress 2018, Better, Smarter, Stronger. Lausanne: Fib - fédération internationale du béton, 2018. p. 1999-2006. ISBN 978-1-877040-14-6.
- [33] Holý, M.; Čítek, D.; Tej, P.; Vráblík, L., Ohybová pevnost tenkých desek z UHPFRC, In: 25. betonářské dny. Praha: ČBS - Česká betonářská společnost ČSSI, 2018. p. 1-7. ISBN 978-80-906759-6-4.
- [34] Rydval, M.; Čítek, D.; Kolísko, J.; Pavlík, Z., UHPC Reinforced by Hybrid Fibers and its Resistance to High Temperature Loading, In: 24th Concrete Days 2017. Curich: Trans Tech Publications, 2018. p. 209-213. Solid State Phenomena. vol. 272. ISSN 1012-0394. ISBN 978-3-0357-1284-1.
- [35] Řeháček, S.; Dobiáš, D.; Pokorný, P.; Čítek, D.; Kolísko, J., Issues of Concrete in Silage Pits, In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Bristol: IOP Publishing Ltd, 2018. vol. 324. ISSN 1757-8981.
- [36] Dobiáš, D.; Řeháček, S.; Pokorný, P.; Čítek, D.; Kolísko, J., Experimental Verification of Concrete Resistance Against Effect of Low pH, In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Bristol: IOP Publishing Ltd, 2018. vol. 324. ISSN 1757-8981.
- [37] Řeháček, S.; Čítek, D.; Kolísko, J., Quality control of the concrete of the bridge reg. No. M117 in Pardubice, In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. London: Institute of Physics Publishing, 2018. p. 1-6. vol. 385. ISSN 1757-899X.
- [38] Řeháček, S.; Čítek, D.; Bouška, P.; Kolísko, J., Bridge ev. no. 324-018 in Pardubice, Damage Investigation of prestress cables in Segmental Box Girder Concrete Bridge, In: CMSE 2018 Abstract Proceedings. School of Materials Science and Chemical Engineering, 2018. pp. 103.
- [39] Řeháček, S.; Dobiáš, D.; Kolísko, J.; Čítek, D., Experimental Verification of Concrete Resistance Against Low-Ph Environment, In: Fib Congress 2018, Better, Smarter, Stronger. Lausanne: Fib - fédération internationale du béton, 2018. p. 346-347. ISBN 978-1-877040-14-6.
- [40] Dobiáš, D.; Řeháček, S.; Čítek, D.; Kolísko, J.; Pokorný, P., Resistance of Concrete With Styrene-Acrylate Additive in Low-Ph Environment, In: Fib Congress 2018, Better, Smarter, Stronger. Lausanne: Fib - fédération internationale du béton, 2018. p. 452-453. ISBN 978-1-877040-14-6.

- [41] Čítek, D.; Řeháček, S.; Pavlík, Z.; Kolísko, J.; Dobiáš, D.; Pavlíková, M., Application of Glass Fiber Waste Polypropylene Aggregate in Lightweight Concrete – thermal properties, In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Bristol: IOP Publishing Ltd, 2018. vol. 324. ISSN 1757-8981.
- [42] Holý, M.; Čítek, D.; Tej, P.; Vráblík, L., Material Properties of Thin UHPC Slabs Used for Timber-Concrete Composite Bridge, In: The 10th International Conference on Short and Medium Span Bridges (SMSB 2018). Montreal: Canadian Society for Civil Engineering, 2019.
- [43] Rydval, M.; Čítek, D.; Kolísko, J., UHPC IN EXTREME CONDITIONS AND TEMPERATURE LOADING, In: UHPFRC 2017 Designing and Building with UHPFRC: New large-scale implementations, recent technical advances, experience and standards. Bagnaux: Rilem Publications s.a.r.l., 2017. p. 271-280. ISBN 978-2-35158-166-7.
- [44] Jursík, P.; Vítek, J.; Čítek, D., Analýza působení lokální spřahovací lišty při použití ve spoji z UHPC, In: 24. Betonářské dny 2017 - Sborník příspěvků. Praha: ČBS - Česká betonářská společnost ČSSI, 2017. ISBN 978-80-906759-0-2.
- [45] Vítek, J.; Čítek, D.; Coufal, R., Precast structural elements made of UHPC, In: UHPFRC 2017 Designing and Building with UHPFRC: New large-scale implementations, recent technical advances, experience and standards. Bagnaux: Rilem Publications s.a.r.l., 2017. p. 115-124. ISBN 978-2-35158-166-7.
- [46] Vítek, J.; Kohoutek, Š.; Čítek, D.; Coufal, R., Experimental investigation of hollow core slabs made of UHPC - fibres orientation, In: High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet. Cham: Springer International Publishing, 2017. p. 2415-2422. ISBN 978-3-319-59470-5.
- [47] Čítek, D.; Kolísko, J.; Tej, P.; Mandlík, T.; Řeháček, S., Prefabrication of the thin-walled U-profile UHPFRC footbridge, In: Special Concrete and Composites 2017. Zürich: Transtech Publications, 2018. p. 152-157. Key Engineering Materials. vol. 760. ISSN 1013-9826. ISBN 978-3-0357-1240-7.
- [48] Kolísko, J.; Čítek, D.; Tej, P.; Marek, J., NÁVRH A VÝROBA UNIKÁTNÍ TENKOSTĚNNÉ OBLOUKOVÉ LÁVKY Z UHPFRC, In: 24. Betonářské dny 2017 - Sborník příspěvků. Praha: ČBS - Česká betonářská společnost ČSSI, 2017. ISBN 978-80-906759-0-2.
- [49] Čítek, D.; Záleská, M.; Pavlík, Z.; Pavlíková, M.; Kolísko, J., MATERIÁLOVÉ A TEPELNÉ VLASTNOSTI LEHKÉHO BETONU S ODPADNÍM POLYPROPYLENEM, In: 24. Betonářské dny 2017 - Sborník příspěvků. Praha: ČBS - Česká betonářská společnost ČSSI, 2017. p. 1-8. ISBN 978-80-906759-0-2.

- [50] Čítek, D.; Slánský, B.; Kolísko, J.; Řeháček, S.; Huňka, P., DESIGN, INSTALLATION AND LONG TERM MONITORING OF UHPC FOOTBRIDGE OVER OPATOVICKY CHANNEL, In: UHPFRC 2017 Designing and Building with UHPFRC: New large-scale implementations, recent technical advances, experience and standards. Bagnex: Rilem Publications s.a.r.l., 2017. p. 755-764. ISBN 978-2-35158-166-7.
- [51] Kolísko, J.; Čítek, D.; Tej, P.; Rydval, M., THIN-WALLED U-PROFILE UHPFRC FOOTBRIDGE, In: UHPFRC 2017 Designing and Building with UHPFRC: New large-scale implementations, recent technical advances, experience and standards. Bagnex: Rilem Publications s.a.r.l., 2017. p. 745-754. ISBN 978-2-35158-166-7.
- [52] Tapsoba, N.; Čítek, D.; Dobruský, S.; Kolísko, J., FATIGUE BEHAVIOR OF ULTRA-HIGH PERFORMANCE CONCRETE (UHPC) UNDER COMPRESSIVE LOADING, In: UHPFRC 2017 Designing and Building with UHPFRC: New large-scale implementations, recent technical advances, experience and standards. Bagnex: Rilem Publications s.a.r.l., 2017. p. 291-300. ISBN 978-2-35158-166-7.
- [53] Kolísko, J.; Čítek, D.; Tej, P., TECHNOLOGIE VÝROBY TENKOSTĚNNÉ OBLOUKOVÉ DVOJITĚ ZAKŘIVENÉ LÁVKY Z UHPFRC, In: Technologie 2017. Praha 1: Česká betonářská společnost ČSSI, 2017. ISBN 978-80-906097-9-2.
- [54] Čítek, D.; Pokorný, P.; Kolísko, J., KOROZNÍ VLIVY ŽÁROVĚ POVLAKOVANÉ VÝZTUŽE MOSAZÍ NA SOUDRŽNOST S BETONEM, In: Technologie 2017. Praha 1: Česká betonářská společnost ČSSI, 2017. ISBN 978-80-906097-9-2.
- [55] Kolísko, J.; Čítek, D.; Tej, P.; Rydval, M., EXPERIMENTAL PEDESTRIAN THIN WALLED DOUBLE CURVATURE ARCH FOOTBRIDGE MADE OF UHPFRC, In: INNOVATIVE MATERIALS AND TECHNOLOGIES FOR CONCRETE STRUCTURES. Budapest: Budapest University of Technology and Economics, 2017. p. 94-101. ISBN 978-963-12-9651-8.
- [56] Čítek, D.; Rydval, M.; Fořt, J.; Pokorný, P.; Pavlík, Z.; Kolísko, J., Residual material properties of high strength fibre reinforced concrete exposed to elevated temperatures, In: 23rd Concrete Days 2016. Curich: Trans Tech Publications, 2017. p. 85-89. Solid State Phenomena. vol. 259. ISSN 1662-9779. ISBN 978-3-0357-1105-9.
- [57] Vítek, J.; Čítek, D.; Coufal, R., Joints of Precast Structures Using UHPC, In: 23rd Concrete Days 2016. Curich: Trans Tech Publications, 2017. p. 164-169. Solid State Phenomena. vol. 259. ISSN 1662-9779. ISBN 978-3-0357-1105-9.
- [58] Vítek, J.; Čítek, D.; Coufal, R., Experiments on fibre orientation in UHPC, In: Building up Efficient and Sustainable Transport Infrastructure 2017 (BESTInfra2017). Bristol: IOP Publishing Ltd, 2017. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. vol. 236. ISSN 1757-8981.

- [59] Čítek, D.; Fořt, J.; Kolísko, J., Experimental investigation on Material Properties of Ultra - High Performance Fiber Reinforced Concrete in Extreme Conditions, In: Proceedings of the 3rd Annual International Conference on Advanced Material Engineering (AME 2017). Paris: Atlantis Press, 2017. p. 390-396. 110. ISSN 2352-5401. ISBN 978-94-6252-336-4.
- [60] Tichý, J.; Čítek, D.; Slánský, B.; Ševčík, S., Long-term monitoring of a UHPC footbridge, In: 23rd Concrete Days 2016. Curich: Trans Tech Publications, 2017. p. 119-124. Solid State Phenomena. vol. 259. ISSN 1662-9779. ISBN 978-3-0357-1105-9.
- [61] Čítek, D.; Pokorný, P.; Kolísko, J., INFLUENCE OF CORROSION OF BRASS METALIZED PLAIN STEEL BARS ON BOND STRENGTH WITH CONCRETE, In: Book of Abstracts of 3rd International Symposium on Connections between Steel and Concrete. Stuttgart: University of Stuttgart, 2017. p. 140-141. ISBN 978-3-945773-06-2.
- [62] Rydval, M.; Čítek, D.; Bittner, T.; Nenadálová, Š.; Kolísko, J., Mechanical Properties of Functionally Double Layered Thin Slabs, IJSCER. 2017, 2017(6), 164-167. ISSN 2319-6009.
- [63] Rydval, M.; Čítek, D.; Kolísko, J.; Nenadálová, Š.; Bittner, T., Functionally layered thin slabs made from UHPC and ECC composites, In: 23rd Concrete Days 2016. Curich: Trans Tech Publications, 2017. p. 90-96. Solid State Phenomena. vol. 259. ISSN 1012-0394. ISBN 978-3-0357-1105-9.
- [64] Řeháček, S.; Čítek, D.; Kolísko, J., Kontrola kvality betonu nosné konstrukce mostu ev. č. 333-003 přes Labe v Přelouči, Zpravodaj WTA CZ. 2017,(3-4), 23-26. ISSN 1213-7308.
- [65] Fořt, J.; Čítek, D.; Pavlíková, M.; Pavlík, Z., The Effect of High Temperature Exposure on Properties of Hybrid Fiber Reinforced UHPC, In: Materials Science Forum. Zürich: Transtech Publications, 2017. p. 275-279. vol. 909. ISSN 1662-9752. ISBN 978-3-0357-1291-9.
- [66] Řeháček, S.; Čítek, D.; Kolísko, J., UHPC and NSFR in Severe Environmental Conditions, In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Bristol: IOP Publishing Ltd, 2017. vol. 251. ISSN 1757-899X.
- [67] Kněž, P.; Tej, P.; Čítek, D.; Kolísko, J., Design of Footbridge with Double Curvature Made of UHPC, In: Fibre Concrete 2017. Bristol: IOP Publishing Ltd, 2017. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. vol. 246. ISSN 1757-899X.
- [68] Kolísko, J.; Čítek, D.; Tej, P.; Rydval, M., Production of Footbridge with Double Curvature Made of UHPC, In: Fibre Concrete 2017. Bristol: IOP Publishing Ltd, 2017. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. vol. 246. ISSN 1757-899X.
- [69] Fořt, J.; Čítek, D.; Pavlíková, M.; Pokorný, J.; Záleská, M.; Pavlík, Z.; Černý, R., Steel and PVA Fibres Reinforced UHPC Exposed to High Temperatures - Analysis of Residual Properties, In: Materials Science Forum. Zurich: TRANS TECH PUBLICATIONS LTD, 2017. p. 26-32. vol. 902. ISBN 978-3-0357-1112-7.

- [70] Pavlík, Z.; Fořt, J.; Pavlíková, M.; Pokorný, J.; Trník, A.; Čítek, D.; Kolísko, J.; Černý, R., Residuální vlastnosti vysokohodnotného vláknobetonu po vystavení vysokým teplotám, *BETON-technologie, konstrukce, sanace*. 2017, 17(2), 16-21. ISSN 1213-3116.
- [71] Řeháček, S.; Šimůnek, I.; Kolísko, J.; Čítek, D., Cementitious Composites in Severe Environmental Conditions - First phase of Dynamic Loading, Ultrasonic Measurement and Resistance to Deicing Agents, In: *MANUFACTURING, DESIGN SCIENCE AND INFORMATION ENGINEERING, VOLS I AND II*. Lancaster, Pennsylvania: DEStech Publications, Inc., 2015. pp. 1032-1041. ISBN 978-1-60595-300-7.
- [72] Čítek, D.; Rydval, M.; Fořt, J.; Zemanová, A.; Kolísko, J., Materiálové charakteristiky vysokohodnotných betonů vystavených extrémním teplotám, In: 23. Betonářské dny 2016. Praha: ČBS - Česká betonářská společnost ČSSI, 2016. ISBN 978-80-906097-6-1.
- [73] Rydval, M.; Kolísko, J.; Bittner, T.; Čítek, D., LEHKÉ BETONY ZA VYSOKÉ TEPLoty, In: Doktorandská konference k 95. výročí Kloknerova ústavu. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2016. pp. 99-105. ISBN 978-80-01-06006-3.
- [74] Tej, P.; Blank, M.; Čítek, D.; Kněž, P.; Kolísko, J., Experimental analysis of bond behavior between steel reinforcement and Ultra High Performance Concrete (UHPC), In: *Grand Challenges in Construction Materials*. Los Angeles: Grand Challenges in Construction Materials, 2016. pp. 1-6.
- [75] Rydval, M.; Čítek, D.; Kolísko, J.; Nenadálová, Š.; Bittner, T., FUNKČNĚ VRSTVENÉ DESKY Z UHPC A ECC, In: 23. Betonářské dny 2016. Praha: ČBS - Česká betonářská společnost ČSSI, 2016. ISBN 978-80-906097-6-1.
- [76] Kolísko, J.; Rydval, M.; Čítek, D.; Mandlík, T.; Nenadálová, Š., Mechanical Properties of Functionally Layered Thin Slabs, In: *Proceedings of HiPerMat 2016 - 4th International Symposium on Ultra-High Performance Concrete and High Performance Construction Materials*. Kassel: Kassel University Press GmbH, 2016. ISBN 978-3-7376-0094-1.
- [77] Rydval, M.; Bittner, T.; Čítek, D.; Nenadálová, Š., ZKOUŠKY PEVNOSTI LEHKÝCH BETONŮ V TLAKU ZA VYSOKÉ TEPLoty, In: *Zkoušení a jakost ve stavebnictví 2016 - Sborník recenzovaných příspěvků*. Brno: VUT v Brně, 2016. pp. 141-150. ISBN 978-80-214-5341-8.
- [78] Rydval, M.; Kolísko, J.; Mandlík, T.; Čítek, D., MECHANICAL PROPERTIES OF FUNCTIONALLY GRADED THIN SLABS MADE FROM ECC AND UHPC, In: *Central Europe towards Sustainable Building 2016 - Innovations for Sustainable Future*. Praha: GRADA PUBLISHING, 2016. pp. 1272-1279. 1st edition, Prague, June 2016, Complete edition - printed version + Flash disk with full paper version. ISBN 978-80-271-0248-8.
- [79] Bittner, T.; Bouška, P.; Nenadálová, Š.; Rydval, M.; Čítek, D., Experimental Tests of I Profile Made from UHPC Reinforced with Textile Glass Fibres, In: *Proceedings from 22nd Czech Concrete Day 2015 (print)*. Pfaffikon: Trans Tech Publications Ltd., 2016. p. 261-266. *Solid State Phenomena*. ISSN 1662-9779. ISBN 978-3-03835-675-2.

- [80] Řeháček, S.; Šimůnek, I.; Čítek, D.; Kolísko, J., UHPC and FRC in Severe Environmental Conditions, In: Concrete under Severe Conditions - Environment and Loading. Pfaffikon: Trans Tech Publications Inc., 2016. p. 412-419. Key Engineering Materials. ISSN 1013-9826. ISBN 978-3-03835-621-9.
- [81] Čítek, D.; Kolísko, J.; Mandlík, T.; Vítek, J., Vliv protikorozní ochrany předpínací výztuže na její soudržnost s UHPC, Strojírenská technologie. 2016, 21(1), 5-10. ISSN 1211-4162.
- [82] Čítek, D.; Vítek, J.; Kolísko, J.; Coufal, R., Experimental testing of UHPC Joints of precast concrete bridge deck, In: Collection of papers and extended abstracts 2015 National Accelerated Bridge Construction conference. Miami: Florida International University, 2016. pp. 545-556.
- [83] Vítek, J.; Čítek, D.; Kolísko, J.; Rydval, M.; Coufal, R.; Jursík, P., Application of UHPC Joints in Bridge Construction – Experimental Testing, In: Proceedings of HiPerMat 2016 - 4th International Symposium on Ultra-High Performance Concrete and High Performance Construction Materials. Kassel: Kassel University Press GmbH, 2016. pp. 183-184. ISBN 978-3-7376-0094-1.
- [84] Čítek, D.; Kolísko, J.; Rydval, M.; Vítek, J., Zkoušení vybraných materiálových vlastností prvků z UHPC, In: Doktorandská konference k 95. výročí Kloknerova ústavu. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2016. pp. 14-22. ISBN 978-80-01-06006-3.
- [85] Čítek, D.; Kolísko, J.; Vítek, J., Ultra-high performance concrete – experimental testing of bond behavior in variable condition, In: Proceedings of the 11th fib International PhD Symposium in Civil Engineering. Tokyo: The University of Tokyo, 2016. pp. 21-27. ISBN 978-4-9909148-0-6.
- [86] Vítek, J.; Čítek, D., Spoje prefabrikovaných konstrukcí s použitím UHPC, In: Betonářské dni 2016 Zborník prednášok. Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2016. pp. 175-180. ISBN 978-80-227-4622-9.
- [87] Vítek, J.; Kolísko, J.; Čítek, D.; Řeháček, S.; Coufal, R., UHPC Connection of Precast Bridge Deck, In: 1st International Interactive Conference on Ultra-High Performance Concrete. Ames, Iowa: Iowa State University, 2016.
- [88] Čítek, D.; Rydval, M.; Řeháček, S.; Kolísko, J., Material Properties of Ultra - High Performance Concrete in Extreme Conditions, In: Concrete under Severe Conditions - Environment and Loading. Pfaffikon: Trans Tech Publications Inc., 2016. p. 157-162. Key Engineering Materials. ISSN 1013-9826. ISBN 978-3-03835-621-9.
- [89] Čítek, D.; Kolísko, J.; Řeháček, S.; Mandlík, T., Concrete Cover Effect on Bond Behaviour of UHPC, In: Proceedings from 22nd Czech Concrete Day 2015. Pfaffikon: Trans Tech Publications Inc., 2016. p. 273-277. Solid State Phenomena - Proceedings from 22nd Czech Concrete Day 2015. ISSN 1662-9779. ISBN 9783038356752.

- [90] Tichý, J.; Čítek, D.; Kolísko, J.; Komanec, J.; Slánský, B.; Hubka, M.; Řeháček, S., UHPC Footbridge over the Opatovický canal, In: Proceedings from 22nd Czech Concrete Day 2015. Pfaffikon: Trans Tech Publications Inc., 2016. p. 320-324. Solid State Phenomena - Proceedings from 22nd Czech Concrete Day 2015. ISSN 1662-9779. ISBN 9783038356752.
- [91] Pokorný, P.; Dobiáš, D.; Čítek, D., The influence of corrosion of zinc powder on mechanical properties of concrete, *Ceramics - Silikáty*. 2016, 60(3), 195-199. ISSN 0862-5468.
- [92] Řeháček, S.; Čítek, D.; Kolísko, J.; Huňka, P., Assessment of concrete quality of load-bearing structure of the bridge across Otava river No. 121-006 near Zvikov after fifty years of operation in severe environmental conditions, In: *Special Concrete and Composites 2016*. Curich: Trans Tech Publications, 2017. p. 72-78. *Key Engineering Materials*. ISSN 1013-9826. ISBN 978-3-0357-1079-3.
- [93] Řeháček, S.; Čítek, D.; Kolísko, J., Kontrola provedené rekonstrukce a kvality betonu nosné konstrukce mostu ev. č. 121-006, most přes Otavu u Zvíkova, In: *Doktorandská konference k 95. výročí Kloknerova ústavu*. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2016. pp. 106-115. ISBN 978-80-01-06006-3.
- [94] Řeháček, S.; Čítek, D.; Kolísko, J.; Šimůnek, I., Inspection of quality of concrete of load-bearing structure, bridge no. 121-007 across Vltava River at Zvikov, In: *Bridges in Danube Basin*. Žilina: EDIS - Publishing Institution of the University of Zilina, 2016. p. 137-138. ISBN 978-80-554-1249-8.
- [95] Řeháček, S.; Šimůnek, I.; Kolísko, J.; Čítek, D., UHPC and FRC in Severe Environmental Conditions, Resistance Against Freeze-thaw Cycles, Aggressive Chemical Agents and Dynamic Loading, In: *1st International Interactive Conference on Ultra-High Performance Concrete*. Ames, Iowa: Iowa State University, 2016.
- [96] Fořt, J.; Trník, A.; Čítek, D.; Pavlík, Z., Residual Mechanical Properties of Hybrid Fiber Reinforced HPC Exposed to High Temperatures, In: *Special Concrete and Composites 2016*. Curich: Trans Tech Publications, 2017. p. 52-58. *Key Engineering Materials*. ISSN 1013-9826. ISBN 978-3-0357-1079-3.
- [97] Pavlík, Z.; Fořt, J.; Pavlíková, M.; Pokorný, J.; Trník, A.; Studnička, J.; Čítek, D.; Kolísko, J. et al., High Temperature Exposure of HPC-Experimental Analysis of Residual Properties and Thermal Response, In: *International Conference on Mechatronics, Manufacturing and Materials Engineering 2016 (MMME 2016)*. Les Ulis Cedex A: EDP Sciences - Web of Conferences, 2016. *MATEC Web of Conferences*. vol. Volume 63. ISSN 2261-236X.
- [98] Fořt, J.; Vejmelková, E.; Pavlíková, M.; Trník, A.; Čítek, D.; Kolísko, J.; Černý, R.; Pavlík, Z., High-temperature testing of high performance fiber reinforced concrete, In: *PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON NUMERICAL ANALYSIS AND APPLIED MATHEMATICS 2014 (ICNAAM-2015)*. New York: AIP Conference Proceedings, 2016. *AIP Conference Proceedings*. ISSN 0094-243X. ISBN 978-0-7354-1392-4.

- [99] Korecký, T.; Pokorný, J.; Fořt, J.; Čítek, D.; Pavlík, Z., Porosity of UHPFRC exposed to high temperatures determined by different techniques, In: THERMOPHYSICS 2016: 21ST INTERNATIONAL MEETING. Melville, NY: AIP Publishing, APL, the American Institute of Physics, 2016. AIP Conference Proceeding. ISSN 0094-243X. ISBN 978-0-7354-1410-5.
- [100] Trník, A.; Fořt, J.; Pavlíková, M.; Čáchová, M.; Čítek, D.; Kolísko, J.; Černý, R.; Pavlík, Z., UHPFRC at high temperatures – Simultaneous thermal analysis and thermodilatometry, In: THERMOPHYSICS 2016: 21ST INTERNATIONAL MEETING. Melville, NY: AIP Publishing, APL, the American Institute of Physics, 2016. AIP Conference Proceeding. ISSN 0094-243X. ISBN 978-0-7354-1410-5.
- [101] Vítek, J.; Čítek, D., Effect of reduced bond of prestressed strands, In: Proceedings from 22nd Czech Concrete Day 2015 (print). Pfaffikon: Trans Tech Publications Ltd., 2016. p. 296-300. Solid State Phenomena. ISSN 1662-9779. ISBN 978-3-03835-675-2.
- [102] Vítek, J.; Jursík, P.; Čítek, D.; Kolísko, J.; Coufal, R., Application of UHPC joints in precast structures, In: Proceedings from 22nd Czech Concrete Day 2015 (print). Pfaffikon: Trans Tech Publications Ltd., 2016. p. 267-272. Solid State Phenomena. ISSN 1662-9779. ISBN 978-3-03835-675-2.
- [103] Bittner, T.; Bouška, P.; Nenadálová, Š.; Rydval, M.; Čítek, D., EXPERIMENTÁLNÍ ZKOUŠKY I PROFILU Z UHPC VYZTUŽENÉHO TEXTILNÍ SKLENĚNOU VÝZTUŽÍ, In: 22. Betonářské dny 2015 - Sborník příspěvků konference. Praha: Česká betonářská společnost ČSSI, 2015. 1. vydání. ISBN 978-80-906097-0-9.
- [104] Vítek, J.; Čítek, D., Vliv snížení soudržnosti předpínací výztuže, In: 22. Betonářské dny 2015 - Sborník příspěvků konference. Praha: Česká betonářská společnost ČSSI, 2015. 1. vydání. ISBN 978-80-906097-0-9.
- [105] Vítek, J.; Čítek, D.; Kolísko, J.; Jursík, P.; Coufal, R., Aplikace UHPC ve spojích prefabrikovaných konstrukcí, In: 22. Betonářské dny 2015 - Sborník příspěvků konference. Praha: Česká betonářská společnost ČSSI, 2015. 1. vydání. ISBN 978-80-906097-0-9.
- [106] Čítek, D.; Řeháček, S., Vliv různých okrajových podmínek na soudržnost výztuže a UHPC, In: CONSTRUMAT 2015. Brno: Brno University, 2015. ISBN 978-80-214-5205-3.
- [107] Čítek, D.; Rydval, M.; Řeháček, S.; Kolísko, J., Stanovení objemových změn matrice velmi vysokohodnotného betonu, In: Experimentální a výpočtové metody v inženýrství. Ústí nad Labem: UJEP v Ústí nad labem, Fakulta výrobních technologií a managementu, 2015. pp. 15. ISBN 978-80-7414-922-1.
- [108] Čítek, D.; Kolísko, J.; Mandlík, T.; Vítek, J., Vliv protikorozní ochrany předpínací výztuže na její soudržnost s UHPC, In: Experimentální a výpočtové metody v inženýrství. Ústí nad Labem: UJEP v Ústí nad labem, Fakulta výrobních technologií a managementu, 2015. pp. 16. ISBN 978-80-7414-922-1.

- [109] Čítek, D.; Rydval, M.; Řeháček, S.; Kolísko, J., Stanovení objemových změn matrice velmi vysokohodnotného, In: Experimentální a výpočtové metody v inženýrství. Ústí nad Labem: UJEP v Ústí nad labem, Fakulta výrobních technologií a managementu, 2015. ISBN 978-80-7414-922-1.
- [110] Čítek, D.; Kolísko, J.; Mandlík, T.; Vítek, J., Vliv protikorozní ochrany předpínací výztuže na její soudržnost s UHPC, In: EXPERIMENTÁLNÍ A VÝPOČTOVÉ METODY V INŽENÝRSTVÍ. Ústí nad Labem: FVTM,UJEP, 2015. FVTM UJEP 2015. ISBN 978-80-7414-913-9.
- [111] Vítek, J.; Čítek, D., Consequences of reduced bond of prestressing strands, In: Innovative Concrete Technology in Practice. Vienna: Austrian Society For Construction Technology, 2015. p. 20-24.
- [112] Čítek, D.; Vítek, J.; Kolísko, J., Bond of prestressing steel in UHPC under variable conditions, In: Innovative Concrete Technology in Practice. Vienna: Austrian Society For Construction Technology, 2015. pp. 82-85.
- [113] Čítek, D.; Vítek, J.; Řeháček, S.; Kolísko, J., Soudržnost UHPC v extrémních podmínkách, In: 13. konference Technologie betonu 2015. Praha: Česká betonářská společnost ČSSI, 2015. ISBN 978-80-903806-8-4.
- [114] Vítek, J.; Čítek, D.; Tej, P., Experimental Research of Shrinkage in Thick Concrete Elements, In: Proceedings from 21st Czech Concrete Day 2014. Pfaffikon: Trans Tech Publications Ltd., 2015. pp. 122-127. Advanced Materials Research. ISSN 1022-6680. ISBN 978-3-03835-474-1.
- [115] Čítek, D.; Mandlík, T.; Kolísko, J.; Řeháček, S., Comparison of Bond Behaviour between Reinforcement and UHPC and Ordinary Concrete in Extreme Conditions, In: Ecological and New Building Materials and Products 2015. Zurich: TRANS TECH PUBLICATIONS LTD, 2015. pp. 319-324. ISBN 978-3-03835-587-8.
- [116] Řeháček, S.; Šimůnek, I.; Čítek, D.; Kolísko, J., Beton v náročných podmínkách prostředí, dynamické testy a ultrazvukové měření, In: Experimentální a výpočtové metody v inženýrství. Ústí nad Labem: UJEP v Ústí nad labem, Fakulta výrobních technologií a managementu, 2015. pp. 10. ISBN 978-80-7414-922-1.
- [117] Čítek, D.; Rydval, M.; Kolísko, J., Determination of volumetric changes of the UHPC matrix, In: Experimental Stress Analysis 2015. Praha: Czech Technical University in Prague, 2015. p. 60-65. ISBN 978-80-01-05734-6.
- [118] Vítek, J.; Čítek, D.; Jursík, P.; Kolísko, J.; Coufal, R., Application of UHPC joints of concrete elements, In: Fibre Concrete 2015 - Technology, Design, Application. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, 2015. pp. 484-489. ISSN 2336-338X. ISBN 978-80-01-05683-7.

- [119] Řeháček, S.; Šimůnek, I.; Čítek, D.; Kolísko, J., Cementitious Composites in Severe Environmental Conditions - Dynamic Loading, In: Ecological and New Building Materials and Products 2015. Zurich: TRANS TECH PUBLICATIONS LTD, 2015. pp. 69-75. ISBN 978-3-03835-587-8.
- [120] Fořt, J.; Pokorný, J.; Čítek, D.; Kolísko, J.; Pavlík, Z., The effect of elevated temperature on high performance fiber reinforced concrete, In: 7th International Conference on Building Materials. Uetikon-Zurich: Trans Tech Publications, 2015. p. 191-195. Materials Science Forum. ISSN 0255-5476. ISBN 978-3-03835-509-0.
- [121] Bouška, P.; Bittner, T.; Tej, P.; Čítek, D.; Vokáč, M., EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF A STRUCTURAL ELEMENT MADE FROM HIGH-PERFORMANCE TEXTILE CONCRETE LOADED BY THE BENDING MOMENT, In: Fibre Concrete 2015 - Technology, Design, Application. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, 2015. ISSN 2336-338X. ISBN 978-80-01-05683-7.
- [122] Vítek, J.; Čítek, D.; Tej, P., Experimentální výzkum smršťování v tlustých betonových prvcích, In: 21. Betonářské dny 2014. Praha: Česká betonářská společnost ČSSI, 2014. ISBN 978-80-903806-7-7.
- [123] Čítek, D.; Vítek, J.; Kolísko, J., Experimentální zkoušky soudržnosti výztuže a UHPC, Strojírenská technologie. 2014, 19(3,4), 157-162. ISSN 1211-4162.
- [124] Čítek, D.; Mandlík, T.; Vítek, J.; Kolísko, J.; Řeháček, S., The influence of age and temperature on the bond behaviour between prestressing strands and UHPC, In: Proceedings from 21st Czech Concrete Day 2014. Pfaffikon: Trans Tech Publications Ltd., 2015. pp. 25-28. Advanced Materials Research. ISSN 1022-6680. ISBN 978-3-03835-474-1.
- [125] Čítek, D.; Řeháček, S., Soudržnost výztuže a UHPC, In: Construmat 2014. Ostrava: VŠB - Technical University of Ostrava, 2014. ISBN 978-80-248-3381-1.
- [126] Čítek, D.; Mandlík, T.; Kolísko, J.; Vítek, J., Soudržnost betonářské a předpínací výztuže s UHPC, In: BETONÁRSKÉ DNI 2014 a 5.post kongresové kolokvium SNK fib - Zborník prednášok. Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2014. pp. 207-212. ISBN 978-80-8076-114-1.
- [127] Čítek, D.; Mandlík, T.; Kolísko, J.; Vítek, J.; Řeháček, S., Vliv stáří a teplotního namáhání na soudržnost předpínací výztuže a UHPC, In: 21. Betonářské dny 2014. Praha: Česká betonářská společnost ČSSI, 2014. pp. 1-9. ISBN 978-80-903806-7-7.
- [128] Čítek, D.; Huňka, P.; Řeháček, S.; Mandlík, T.; Kolísko, J., Testing of Bond Behavior of UHPC, In: Special Concrete and Composites 2014. Uetikon-Zurich: Trans Tech Publications, 2014. pp. 95-98. Advanced Materials Research. ISSN 1022-6680. ISBN 978-3-03835-317-1.
- [129] Řeháček, S.; Huňka, P.; Čítek, D.; Kolísko, J.; Šimůnek, I., Impact Resistance of Fibre-reinforced Concrete, In: Special Concrete and Composites 2014. Uetikon-Zurich: Trans Tech Publications, 2014. p. 48-53. Advanced Materials Research. ISSN 1022-6680. ISBN 978-3-03835-317-1.

- [130] Řeháček, S.; Huňka, P.; Čítek, D.; Šimůnek, I., Impact Resistance of steel fibre reinforced Thin-Walled Shell Structures, In: Ecology and New Building Materials and Products 2014. Brno: Výzkumný ústav stavebních hmot, a.s., 2014. pp. 203-206. ISSN 1022-6680. ISBN 978-3-03835-188-7.
- [131] Čítek, D.; Vítek, J.; Kolísko, J.; Huňka, P.; Řeháček, S., Assessment of Bond Behavior of UHPC and Prestressing Strands, In: Ecology and New Building Materials and Products 2014. Brno: Výzkumný ústav stavebních hmot, a.s., 2014. pp. 247-250. ISSN 1022-6680. ISBN 978-3-03835-188-7.
- [132] Čítek, D.; Huňka, P.; Řeháček, S.; Kolísko, J., Investigation of the bond behavior of UHPC, In: Proceedings of the 6th International Scientific Conference on Dynamics of Civil Engineering and Transport Structures and Wind Engineering. Žilina: EDIS - Publishing Institution of the University of Zilina, 2014. ISBN 978-80-554-0844-6.
- [133] Čítek, D.; Huňka, P.; Řeháček, S.; Kolísko, J., Investigation of the Bond Behavior of UHPC, In: Applied Mechanics and Materials. Durnten-Zurich: Trans Tech Publications Ltd, 2014. p. 225-228. ISSN 1660-9336. ISBN 978-3-03835-197-9.
- [134] Čítek, D.; Kolísko, J.; Vítek, J.; Huňka, P., Vliv kotevní délky na soudržnost předpínací výztuže a UHPC, In: Technologie betonu 2014. Praha: ČBS - Česká betonářská společnost ČSSI, 2014. pp. 66-71. ISBN 978-80-903806-4-6.
- [135] Čítek, D.; Kolísko, J.; Vítek, J., Bond of Reinforcement embedded in UHPC - experimental testing, In: Experimentální a výpočtové metody v inženýrství. Ústí nad Labem: UJEP, 2014. pp. 12. ISBN 978-80-7414-724-1.
- [136] Čítek, D.; Kolísko, J.; Vítek, J., Experimentální zkoušky soudržnosti výztuže a UHPC, In: Experimentální a výpočtové metody v inženýrství. Ústí nad Labem: UJEP, 2014. ISBN 978-80-7414-725-8.
- [137] Vítek, J.; Čítek, D.; Coufal, R., UHPC joints of precast elements, In: Fibre Concrete .2013 - Technology, Design, Application. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, 2013. pp. 407-414. ISSN 2336-338X. ISBN 978-80-01-05240-2.
- [138] Vítek, J.; Čítek, D., Soudržnost betonářské výztuže a UHPC, In: Technologie betonu 2013. Praha: ČBS Servis, s.r.o., 2013. pp. 87-92. ISBN 978-80-87158-33-3.
- [139] Vítek, J.; Čítek, D., Bond of reinforcement and UHPC, In: 20. Betonářské dny 2013. Praha: Česká betonářská společnost ČSSI, 2013. pp. 270-275. ISBN 978-80-87158-34-0.
- [140] Vítek, J.; Coufal, R.; Čítek, D., UHPC - Development and testing on structural elements, In: Concrete and Concrete Structures 2013. Žilina: University of Žilina, 2013. p. 218-223. ISSN 1877-7058.
- [141] Vítek, J.; Coufal, R.; Staš, M.; Čítek, D.; Kolísko, J., UHPC Laboratory and Field Tests, In: CCC 2013 - Concrete Structures in Urban Areas. Wrocław: Dolnoslaskie wydawnictwo edukacyjne, 2013. pp. 70-73. ISBN 978-83-7125-229-7.