

HOCHTIEF CZ, a.s. ČVUT - FAKULTA STAVEBNÍ

Zkušební laboratoř č. 1048 akreditovaná ČIA



METODIKA

komplexního řešení prvků stavebních konstrukcí s využitím UHPC

2023



Autorský kolektiv:

Ing. Šárka Pešková, PhD., Ing. Petr Vítek, Ph.D.,

Prof. Ing. Vít Šmilauer, PhD., DrSc., Doc. Ing. Jiří Litoš, PhD., Ing. Robert Coufal, PhD., Ing.

Jan Valentin, PhD., Ing. Marcel Jogl, PhD.,

Ing. Pavel Horák,

Prof. Ing. Petr Konvalinka, CSc., FEng.

Název metodiky: Metodika komplexního řešení prvků stavebních konstrukcí s využitím UHPC

Zpracovatel: HOCHTIEF CZ a. s., Plzeňská 3217/16, Praha 5, 15000, ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Thákurova 7, 166 29 Praha 6.

Oponenti: Prof. Ing. Jiří Stráský, DSc - Vysoké učení technické v Brně, Ing. Milan Komínek – konsultant pro mosty, inženýrské a dopravní stavby (OSVČ).

Výstup projektu: TAČR CK02000047 – Optimalizace výstavby a trvanlivosti mostů, s využitím nového kompozitního řešení pro aplikaci UHPC a běžných betonů, mineralizovaných příměsí a druhotných materiálů, programu: DOPRAVA 2020+, 2. veřejná soutěž.

Aplikace metodiky: Metodika je aplikovatelná pro navrhování a experimentální ověřování předpjatých skořepinových nosníků a předpjatých i nepředpjatých sloupů z UHPC, kde výplň tvoří betony běžných pevností

Autorský kolektiv: Ing. Šárka Pešková, PhD., Ing. Petr Vítek, Ph.D., Prof. Ing. Vít Šmilauer, PhD., DrSc., Doc. Ing. Jiří Litoš, PhD., Ing. Robert Coufal, PhD., Ing. Jan Valentin, PhD., Ing. Marcel Jogl, PhD., Ing. Pavel Horák, Prof. Ing. Petr Konvalinka, CSc., FEng.

Poděkování: Prof. Ing. Miroslav Petrtýl, DrSc.

ABSTRAKT:

V rámci zvyšování únosnosti a trvanlivosti mostních konstrukcí v ČR a při současném zvyšování ekonomické efektivity aplikovaných betonů běžných pevností byly formulovány a experimentálně ověřeny metodiky návrhu nových konstrukčních skořepinových prvků z UHPC. Konkrétně se jednalo o návrh nových mostních nosníků a sloupů, který byl zaměřen na minimalizaci jejich hmotností, na usnadnění manipulace při jejich výrobě, na jejich méně náročný transport a osazování, na využití vnější obalové (skořepinové) konstrukční části jako ztraceného bednění a na úspory materiálu se zřetelem k předpětí nosníků. Pozornost byla věnována zvýšení únosnosti konstrukcí, multifunkčnosti nosníků z UHPC se zřetelem ke tvarovým variantám vnější obalové předpjaté části a také snížení počtu pracovníků na stavbě. Speciální pozornost byla zaměřena na karbonataci a na pronikání chloridů k ocelové výztuži nosníků a sloupů, při nichž dochází často ke korozi oceli. Realizované statické zatěžovací zkoušky nosníků a sloupů z UHPC v kombinaci s betonem běžných pevností a s použitím síranovápenatého pojiva SORFIX prokázaly efektivnost experimentálně ověřované metodiky. Návrh a výběr prvních experimentálně ověřovaných multifunkčních kompozitních nosníků a sloupů v autorizované laboratoři Fakulty stavební ČVUT v Praze a v Kloknerově ústavu v Praze ve spolupráci s firmou HOCHTIEF CZ, a.s. prokázal funkční, časovou, optimálně ekonomickou a energetickou efektivnost z hlediska jejich výroby a využitelnosti v

praxi. Aplikace skořepin z UHPC s variacemi výplní z cementových materiálů umožňuje předem efektivně regulovat (inovovat) dosud používané předpjaté a nepředpjaté prvky.

Klíčová slova: skořepina, UHPC, nosník, sloup, únosnost, kompozity, karbonatace, chloridy.

Legislativní rámec

S dotčenou problematikou úzce souvisejí následující legislativní normy a podklady:

- **ČSN EN 206+A2** Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda, 2021
- **TKP 18** Betonové konstrukce a mosty, 2016
- **TP ČBS 07** Ultra vysokohodnotný beton, 2022
- **ČSN P 73 2404** Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda - Doplnující informace, 2022
- **ČSN 73 2030** Statické zatěžovací zkoušky stavebních konstrukcí, 2019

Certifikační orgán: Ministerstvo dopravy České republiky

OBSAH

1. Úvod k modernizaci a inovaci kompozitních konstrukčních prvků v mostním stavitelství ...	6
1.1. Současný stav	6
1.2. Aktuální rozvojové záměry EU v oblasti stavebnictví	7
1.3. Obecné znaky UHPC	7
2. Cíle metodiky pro návrh a ověření nových nosníků a sloupů pro mostní konstrukce	8
2.1. Konstrukční modely nových nosníků a sloupů	8
2.2. Složení nových kompozitních nosníků a sloupů	9
3. Srovnání novosti postupů	9
4. Mock-up testy kompozitních prvků	10
4.1. Složení UHPC prvků a materiálové vlastnosti	10
4.2. Technologie výroby nosníků a sloupů s UHPC	11
4.3. Technologie dávkování komponent a míchání betonových směsí	14
4.4. Omezení karbonatace a šíření chloridů	15
4.5. Experimenty na nosníku	18
4.5.1. Ověření předpětí tenzometry	18
4.5.2. Uspořádání experimentu a výsledky	18
5. Numerický model nosníku a výsledky	28
5.1. Geometrie, síť konečných prvků, materiálový model	28
5.2. Validace konečněprvkového modelu	30
6. Experimenty na sloupu v prostém tlaku	33
6.1. Uspořádání experimentu a výsledky	33
6.2. Numerický model a výsledky	35
7. Uplatnění v praxi	37
7.1. Ekonomické aspekty	37
8. Literatura	39
9. Použité definice a zkratky	40

1. Úvod k modernizaci a inovaci kompozitních konstrukčních prvků v mostním stavitelství

1.1. Současný stav

Rozvoj předpjatého betonu byl v českých zemích (zhruba od roku 1950) charakterizován dominancí podélných prefabrikací. Většina mostů se stavěla z jednotlivých nosníků, které se většinou betonovaly na staveništi a poté se jednotlivě dopravovaly na místo finálního uložení. V 80. letech počala převládat technologie příčné prefabrikace k vytváření jednotlivých segmentů a podélná prefabrikace se omezila jen na malá rozpětí.

V 90. letech se možnosti ve stavebnictví výrazně změnily. Byla ukončena typizace a začal se klást velký důraz na dlouhodobou spolehlivost a trvanlivost konstrukcí. Při návrhu konstrukcí docházelo ke snižování počtu spár a k omezování diskontinuit, kterými do konstrukce vnikala voda. Spáry a různé diskontinuity byly potenciální zdroje pro inicializaci poruch. Důsledkem intenzivního rozvoje bednicích technologií docházelo k usnadnění staveb z monolitického betonu a mosty, které aplikovaly tuto technologii, postupně převládly.

Prefabrikace a typizace mostních konstrukcí jsou limitovány jejich rozměry a hmotností. Rozměry a hmotnosti konstrukcí mohou omezovat jak dopravu, tak i montáž. Prefabrikace se v mnohých případech stanou velmi výhodné, neboť budou směřovat k eliminaci nutnosti výstavby skruže a bednění, což vede k úspoře času, místa a finančních nákladů. To aktuálně platí za předpokladu permanentního dodržování požadované kvality.

V současné době dochází (a v blízké budoucnosti bude více docházet) ke zdražování lidské práce. Lze předpokládat, že nastane situace kritického nedostatku kvalifikovaných dělníků přímo na stavbě. Důsledkem a řešením bude prefabrikovaná výroba koncentrovaná v prefabrikátech. Prefabrikace v závodech navíc umožní větší míru automatizace, mechatronizace a robotizace ve stabilních podmínkách.

Kompozitní konstrukce se užívají zcela běžně a v hojné míře. Jedná se o spřažené konstrukce ve variantě ocel – beton a beton – beton. Typické jsou nosníky se spřaženou deskou.

Výzkum se v současnosti soustřeďuje na možnost dalšího snížení hmotnosti prefabrikovaných dílců, kdy se prefabrikovaný dílec maximálně vylehčí, což má pozitivní vliv na manipulaci a logistické nároky. Tento způsob vede k potřebě snižování tloušťky stěn a desek prvků. Jako vhodný tvar nosníku se pak jeví „korýtko“ (tvary U, omega a další), které se následně vyplní druhým materiálem – transportbetonem – přímo na stavbě. Obecně řečeno, aby se zajistila dostatečná tuhost a únosnost „korýtko“ je třeba pro prefabrikáty aplikovat materiály o vysoké pevnosti s drátkovou výztuží (UHPC – Ultra High Performance Concrete). Materiály UHPC

mají vyšší pevnost a duktilitu než má vysokohodnotný beton HPC (High-Performance Concrete). Vlastnosti a označení UHPC jsou popisovány v souladu s TP ČBS 07 [13].

Ve hledání ustálené komplexní metodické platformy pro navrhování a využívání UHPC došlo v České republice k metodickému zkvalitnění metodických přístupů. V rámci projektu TAČR TA01010269 „Aplikovaný výzkum ultravysokohodnotného betonu“ [3], byly předchozí metodiky pro prefabrikované prvky sjednoceny, a to tak, že projekt TAČR navázal na metodiky nazvané „METODIKA 2 - Metodika pro návrh UHPC a pro materiálové zkoušky“ [4] a „METODIKA 3 - Metodika pro navrhování prvků z UHPC“ [5].

Únosnost a životnost kompozitních prvků a konstrukcí je velmi ovlivněna interakcemi mezi jejich komponenty. Betonové nosníky se často spřahují s betonovou deskou pomocí betonářské ocelové výztuže. V současné době je dostatečně prozkoumáno spřažení pomocí ocelových spřahovacích prvků mezi nosníkem a monolitickou betonovou deskou. U ocelových nosníků se užívají přivařené spřahovací trny nebo profilované lišty. Spřahování na svislých nebo pseudosvislých plochách pomocí výztuže je nepraktické, neboť výztuž má procházet bedněním či být spojována, což je časově náročné a neekonomické. U ověřovaných nosníků bylo spřažení provedeno pomocí výztuže pouze na horním povrchu UHPC. Ostatní povrchy se spřahly prostřednictvím výstupků, které se vytvořily otiskem nopové fólie.

1.2. Aktuální rozvojové záměry EU v oblasti stavebnictví

Soudobé trendy ve stavebnictví jsou obecně zaměřeny na zkvalitňování metodologií výstavby, na využívání nových kompozitních materiálů, na snižování hmotnosti staveb, na zvyšování jejich životnosti, na ekonomické efektivnosti konstrukcí, na ověřování stavu, na robotizaci a také na estetická a funkční uspokojování uživatelů staveb.

1.3. Obecné znaky UHPC

Materiál UHPC tvoří relativně novou třídu pokročilých cementových materiálů, které u nových kompozitních konstrukcí (svými regulovatelnými mechanickými vlastnostmi) přispívají ke zkvalitnění nosných stavebních prvků a tím i komplexních stavebních konstrukcí.

Hlavní materiálové vlastnosti a chování konstrukčních prvků, například nosníků a sloupů, obsahujících UHPC s vhodnými přísadami, mají:

- (a) funkčně vhodné pevnosti, s vyváženou a experimentálně ověřenou recepturou,

- (b) optimální snížené hmotnosti, které usnadňují transportní a osazovací manipulace, na příklad za velmi omezených dispozičních podmínek,
- (c) malé vodní součinitele,
- (d) zvýšené množství cementu,
- (e) definované limity velikostí zrn kameniva,
- (f) vysokou mírou autogenního smrštění, které probíhá velmi rychle a krátce po startu hydratačního procesu,
- (g) zbytky nehydratovaných cementů, které tvoří rezervu pro hojení trhlinek

2. Cíle metodiky pro návrh a ověření nových nosníků a sloupů pro mostní konstrukce

Vědeckovýzkumné týmy z ČVUT v Praze, Fakulty stavební – Zkušební laboratoře č. 1048 akreditované ČIA, a z Kloknerova ústavu ČVUT v Praze, ve spolupráci s odborným týmem firmy HOCHTIEF CZ a.s. se zaměřily na:

- (A) metodický výběr základních vlastností a chování nových předpjatých nosníků a sloupových podpor komponovaných z UHPC a variantně s náhradou částí cementu pojivem SORFIX;
- (B) experimentální ověření nových základních vlastností a chování předpjatých nosníků a sloupových podpor komponovaných z UHPC, variantně s náhradou částí cementu pojivem SORFIX.

2.1. Konstrukční modely nových nosníků a sloupů

Předpjaté nosníky z UHPC

Předmětem návrhu a ověření byly dva nosníky, z nichž každý byl komponován z vnější (obalové, skořepinové, tenkostěnné) části UHPC a z vnitřní části (jádra). Vnější část je tvořena předpjatým betonem UHPC, vnitřní část je tvořena běžným betonem, kde u druhého nosníku byla použita směs pojiv 50% CEM I 42,5 R Radotín a 50% síranovápenatého pojiva SORFIX.

Z hlediska porovnání výše uvedených dvou základních konstrukčních částí v nosnících je zřejmé, že nosníky s vylehčeným jádrem mají menší hmotnost, a tím jsou většinou snadněji zhotovitelné (přímo na místě stavby), jsou snadněji manipulovatelné a snadno transportovatelné.

Sloupy z UHPC

Předmětem návrhu a ověření byly nové konstrukce sloupů komponované obalovým (tenkostěnným) materiálem s drátkovou výztuží v betonu UHPC s materiálem jádra z běžného betonu s náhradnou částí cementu SORFIXem.

2.2. Složení nových kompozitních nosníků a sloupů

Materiály UHPC obsahují kromě vysoké dávky cementu ($600 - 1000 \text{ kg/m}^3$) běžně pouze jemnozrnné kamenivo (zrnitost do 4 mm), vlákna (mikrovlákna s průměrem do 0,3 mm a délky do 20 mm), mikroplniva (příměsi) a vysoké dávky přísad (superplatifikátory a další). Vyznačují se nízkou hodnotou vodního součinitele ($v/c \leq 0,25$) a vysokým obsahem kovových nebo polymerních vláken (o obsahu 1,5 – 3 % objemu směsi). Materiály mají jemnozrnnou strukturu a dosahují vysoké pevnosti v tlaku přes 110 MPa.

3. Srovnání novosti postupů

Materiál UHPC se významně liší od běžného betonu. Důsledkem spojení dvou základních konstrukčních částí v každém nosníku a sloupu, tj. části vnější (skořepinové, obalové) a části vnitřní (jádrové) z běžného betonu + příměsí, dochází:

- (a) k usnadnění manipulace s nosníkem a jeho transportu do místa osazení,
- (b) k minimalizování hmotností nosníků z UHPC,
- (c) k využití obalové konstrukční části jako ztraceného bednění,
- (d) k úspoře materiálu aplikací předpětí,
- (e) ke snížení počtu pracovníků,
- (f) ke zvýšení únosnosti konstrukce,
- (g) ke zvýšení ohybové tuhosti nosníků a její regulovatelnosti použitím materiálových variant jádra nosníku (aplikace kompozitních materiálů),
- (h) k multifunkčnosti nosníků s tvarovou růzností vnější obalové předpjeté části (na příklad ve tvaru Ω nebo U),
- (i) k prodloužení životnosti konstrukce eliminací nebo časovým oddálením karbonatace,
- (j) k prodloužení životnosti konstrukce eliminací nebo časovým oddálením pronikání chloridů k výztuži.

Uvedené přednosti navržených nosníků z UHPC spolu s výsledky jejich experimentálních ověření objektivně prokazují strukturální a materiálové priority jejich výběru, ve srovnání s klasickými nosníky.

Vývoj a používání UHPC bylo v posledních letech velmi intenzivně rozvíjeno v mnoha zemích [14]. Dosud však nedošlo k vytvoření obecně ustálené a plně akceptované komplexní metodické platformy pro navrhování a využívání UHPC. Aplikace UHPC jsou zatím zaměřeny na netypizované stavební projekty, u nichž se většinou zohledňují místní podmínky.

Je zřejmé, že z hlediska výše uvedeného srovnání novosti postupů je nalezení efektivní metodiky návrhu a použití nových stavebních prvků (ve zvolené terénní lokalitě) velmi závislé na:

- I. velikosti (rozměrech) stavebních prvků a snížení jejich hmotností,
- II. volbě druhu nejvhodnějšího stavebního materiálu,
- III. prostorovém konstrukčním uspořádání nosných, případně výplňových materiálů,
- IV. únosnosti jednotlivých dílčích komponent v konstrukci,
- V. velikosti užitého zatížení dané konstrukce, dle stavebních norem ČR, resp. EU.

4. Mock-up testy kompozitních prvků

4.1. Složení UHPC prvků a materiálové vlastnosti

Vývoj a používání UHPC je v posledních letech velmi intenzivně rozvíjeno v řadě zemí celého světa. Dosud však nedošlo k vytvoření obecně ustálené a plně akceptované komplexní metodické platformy pro jejich navrhování a využívání. Aplikace UHPC jsou dosud zaměřeny na netypizované stavební konstrukce, u nichž se většinou zohledňují místní podmínky.

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 [3]. Hodnota vodního součinitele u tohoto materiálu se pohybuje obvykle pod hranicí 0,25. Vhodně navržená cementem propojená matrice dosahuje vysokých hodnot pevnosti v tlaku, ale stává se křehkou. Pro vyztužení pevné, ale křehké matrice a pro zvýšení tahových (lomových) vlastností tohoto materiálu je nutné do směsí přidávat nekonvenční rozptýlenou vláknovou výztuž.

Pro dosažení duktilního chování jsou nejvhodnější vlákna kovová (ocelová), která jsou schopna při dostatečném dávkování zajistit tzv. tahové zpevnění „strain-hardening“ a tím také zajistit přenos namáhá í v tahu i po vzniku trhlin. V případě, kdy je vyčerpána tahová kapacita

samotné matrice nebo matrice vyztužené rozptýlenou výztuží, dochází k jevu, který je označován jako tahové změkčení „strain-softening“. Pozn.: zajištění duktilního chování (bez tradiční betonářské výztuže) je možné aplikací přibližně dvou objemových procent kovových vláken (viz doporučení AFGC [2]). Vysoký obsah pojiva eliminuje kapilární poréznost vedoucí k dobré odolnosti vláken [1].

V této souvislosti lze poznamenat, že 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 tomu odpovídají například vlákna PVA (polyvinilalkoholová), případně uhlíková. Dávkování vláken se obvykle pohybuje v rozmezí 1,5 – 3 % objemu a je předmětem optimalizace receptury, aby bylo dosaženo tahového zpevnění „strain-hardening“.

Tab. 1. Vlastnosti betonů.

Označení	UHPC	Výplň C45/55	Výplň C45/55-SORFIX
CEM I 42,5 R - Radotín (kg/m ³)	630	410	205
Sorfix (kg/m ³)	-	-	205
Mikrosilika (kg/m ³)	Ano	Ne	Ne
Vodní součinitel	0,13	0,33	0,37
Dmax	8 mm	22 mm	22 mm
Konzistence	SF2	S4	S4
Ocelová vlákna (kg/m ³)	120	Ne	Ne
Objemová hmotnost (kg/m ³)	2454	2350	2267
Průměrná válcová pevnost ve 28 dnech (MPa)	145,8	64,3	52,8

4.2. Technologie výroby nosníků a sloupů s UHPC

Pro výrobu UHPC, je třeba použít takové materiálové složky (kompozitní elementy), které optimálním způsobem spolehlivě zabezpečují jeho požadované vlastnosti: (I.) vysokou pevnost, (II.) duktilitu, (III.) trvanlivost, (IV.) těsnost, (V.) modul pružnosti.

Základní vstupní suroviny pro UHPC jsou:

- 1. CEMENT** na bázi portlandského slínku. Obvyklý je typ CEM I 52,5 a 42,5 R (i když ostatní typy kvalitních cementů nejsou vyloučeny). Cement musí vyhovovat aktuálně platným předpisům, tj. ČSN EN 197-1 [6]. Typ a dávkování cementu vyplývá z návrhu a optimalizace receptury a není nijak omezen. Oproti běžným

betonům je však dávkování výrazně vyšší a pohybuje se dle zkušeností v rozmezí 600-1000 kg/m³.

2. **KAMENIVO** tvoří nosnou kostru UHPC. S ohledem na vysokopevnostní charakter je nezbytné, aby bylo toto kamenivo vysoce jakostní s vysokou pevností a s minimem interních poruch. Protože výroba UHPC vyžaduje daleko větší nároky na kvalitu vstupních surovin a přesnost dávkování, je vhodné doporučit používat tříděné písky z pevných hornin (vyvřelé horniny, nebo např. křemičitý sklářský či slévárenský písek), který se pak mísí ve vhodném poměru tak, aby bylo dosaženo požadované křivky zrnitosti podle výsledků laboratorních zkoušek a rozboru čar zrnitosti, s ohledem na minimální mezerovitost. Kamenivo musí vyhovět požadavkům ČSN EN 12620+A1 [7].
3. **PŘÍMĚSI – MIKROFILERY** jsou jemnozrnné anorganické práškové materiály s maximální velikostí zrn do 0,25 mm. Technologickým cílem je zajistit co největší hutnost a minimalizovat mezerovitost (v rámci granulometrické skladby). Příměsi přispívají k ovlivnění reologických vlastností čerstvé směsi. Ve smyslu ČSN EN 206, [1] rozlišujeme dva typy příměsí. Typ I je téměř inertní příměs (mletý křemen, kamenná moučka, vápenec) a typ II latentně hydraulická příměs (křemičitý úlet, popílek, vysokopecní granulovaná struska apod.), která je schopna podílet se na hydratační reakci.
4. **PŘÍMĚSI TYPU I – INERTNÍ PŘÍMĚSI** slouží primárně jako mikroplnivo pro optimalizaci granulometrie, případně pro úpravu reologických vlastností. Patří sem mletý křemen, kamenné moučky jiného typu, mletý vápenec atd. Příměsi musí splňovat požadavky ČSN EN 12620+A1 [7] na filery do betonu. Požadavky na mleté vápence jsou uvedeny také v ČSN 72 1220 [10]. Typ a dávkování vyplývá z návrhu a optimalizace receptury.
5. **PŘÍMĚSI TYPU II – LATENTNĚ HYDRAULICKÉ.** V současné době neexistují jasné informace, jak příměsi typu II uvažovat ve směsi UHPC vzhledem k vyjádření vodního součinitele. Principy k-hodnoty uvedené v ČSN EN 206, [1] lze využít pouze jako informativní.
6. **KŘEMIČITÝ ÚLET (MIKROSILIKA).** Použití křemičitého úletu splňujícího parametry dle ČSN EN 13263-1+A1, [8] je primárně mikroplnivo vyplňující mikrostruktury. Dle

zkušeností [2] se projeví latentní hydraulická mikrosiliky zejména při teplotním ošetřování UHPC při teplotách 80-90 °C v době tvrdnutí. Typ a dávkování vyplývá z návrhu a z optimalizace receptury. Velký měrný povrch mikrosiliky zvyšuje požadavek na dávkování vody a na použití superplastifikátoru.

7. VYSOKOPECNÍ STRUSKA. Struska také slouží primárně jako mikroplnivo, případně pro úpravu reologických vlastností. Struska musí odpovídat a splňovat parametry ČSN EN 15167-1 [9]. Typ a dávkování vyplývá z návrhu a optimalizace receptury.

8. PŘÍSADY – PLASTIFIKÁTORY. Pro dosažení dostatečné redukce vody a získání vhodné zpracovatelnosti je nutné použít velmi účinné plastifikátory. Tomuto vyhovují nejlépe přísady na bázi polykarboxylátů (PCE). Typ a dávkování vyplývá z návrhu a optimalizace receptury.

9. VLÁKNA. Pro zajištění houževnatosti a vysoké duktility materiálu UHPC je nezbytné vyztužit matici všesměrně orientovanou vláknovou výztuží. Dávkování musí být provedeno v dostatečném množství. Obvyklé dávkování je v rozmezí 1-3 % objemu. Ze zkušenosti vyplývá, že jako vhodná se jeví vysokopevnostní ocelová mikrovlákná (ČSN EN14889-1 [11]) s průměrem do max. 0,3 mm v délce do cca 20 mm (štíhlostní poměr 60 a více).

Vyztužením lze ovlivnit konečné chování materiálu z hlediska přenosu napětí i po vzniku trhliny. Vyčerpáním tahové únosnosti matrice dochází k aktivaci rozptýlené vlákně ve vzniklé trhlíně. Typ a dávkování vláken vyplývá z návrhu a optimalizace receptury ve vztahu k mechanickým požadavkům na materiál pro konkrétní prvek.

Obr. 1 dokumentuje výrobu nosníku. V této fázi je vybetonována skořepina z UHPC a je připravena výztuž výplňového betonu včetně kanálku pro dodatečné předpětí. Na vnitřní stěně skořepiny z UHPC je patrná textura vytvořená obtiskem nopové folie. Nosník je už v této fázi také osazen tenzometry pro analýzu chování při statické zatěžovací zkoušce.



Obr. 1. Příprava betonáže výplně po usazení kanálku pro dodatečné předpětí.

4.3. Technologie dávkování komponent a míchání betonových směsí

Kvalitní výroba konstrukčních prvků, tj. nosníků a sloupů, vyžaduje precizní výrobní postupy, které jsou výsledkem poloprovozních a ověřovacích zkoušek reálného konstrukčního prvku. Proces dávkování a míchání UHPC je výrazně složitější než u běžného betonu. Je velmi náročnější na přesnost dávek a dob míchání jednotlivých technologických intervalů. Dávkování komponent se provádí s přesností ± 1 % hmotnosti dávkovaného množství.

Proces míchání a přípravy vyžaduje s ohledem na množství komponent rozdílnou zrnitost (ve srovnání s běžným betonem) a jiné reologické vlastnosti čerstvé směsi. Výsledné chování v čerstvém stavu a v zatvrdlém stavu je ovlivněno procesem míchání a je nezbytné mít tuto technologii zvládnutou.

Z tuzemských i ze zahraničních zkušeností vyplývá, že UHPC je třeba míchat v míchačce s nuceným mícháním, které jsou používány v klasických míchacích centrech betonáren. Je však třeba vzít v úvahu, že UHPC má v porovnání s konvenčním betonem zcela jiné reologické chování a složení. Dostatečné zamíchání vyžaduje výrazně vyšší energii. Je nutno počítat s tím, že čas míchání bude prodloužen. Nejvhodnější pro výrobu UHPC jsou specializované vysokootáčkové míchačky s nuceným mícháním. Použije-li se míchací centrum běžně pro výrobu standardního betonu, je nutno počítat s tím, že doba míchání může být výrazně vyšší

(cca 2 až 6 x) než u výroby běžných betonů vzhledem k výrazně viskóznějšímu chování materiálu UHPC. Vhodný typ míchacího zařízení je nutno prověřit a případně zvolit vhodnou míchačku s intenzivním nuceným způsobem míchání (např. planetová).

Dávkování a míchání UHPC pro výrobu dílců vychází z laboratorních zkoušek. Při nich se odzkouší, jaké pořadí vstupních materiálů a doby míchání jednotlivých intervalů je potřebné, aby čerstvý UHPC byl homogenní s vhodnou konzistencí pro výrobu hotových dílců. Rozdílnost intenzit míchání mezi laboratorními zařízeními a reálnými míchačkami může být velmi výrazná. Proto je nutné prověřit způsoby míchání na předpokládaném výrobním zařízení a na něm stanovit postupy dávkování a míchací doby pro dosažení vhodné konzistence a homogenity. Konkrétní proceduru míchání navržené receptury je nutno odzkoušet a modifikovat tak, aby byla v použitém zařízení proveditelná.

Doba míchání může být výrazně ovlivněna také např. zvýšením rychlosti míchání. S ohledem na možnost vyrábět z UHPC subtilní prvky lze předpokládat, že spotřeba materiálu nebude tak významná. Z toho vyplývá, že i s relativně malým míchacím zařízením bude možno vyrábět velké prvky. Pro menší objemy výroby lze použít i menších přenosných míchač k s objemem výroby např. 0,1-0,2 m³. Avšak, vždy musí být použito zařízení s nuceným mícháním. Efektivita výroby musí být prověřena praktickými zkouškami. Vlákna se obvykle dávkují na závěr. S ohledem na relativně vysokou dávku (120 kg/m³ a více) se musí dávkovat postupně, při míchání všech složek UHPC, aby nevznikaly shluky spojených vláken. Po vsypání všech vláken do míchačky se celý obsah míchá ještě stanovenou dobu (v souladu s ověřovacími testy).

UHPC je velmi citlivý na dávkování záměsové vody. Kontrolu dávky vody lze obtížně dosáhnout při dávkování kameniva s přirozenou vlhkostí, např. z běžných otevřených skládek. Sledování vlhkosti dávkovaného kameniva není běžné a není také zcela jednoduché. Proto je výhodné používat kamenivo vysušené nebo uložené ve stabilních podmínkách, bez přímého působení klimatu, např. deště. Významnou roli při výrobě hraje i teplota dávkovaných složek. Lze doporučit ověření vlivu teploty (zejména teploty dávkovaných složek) na výsledné reologické chování a mechanické vlastnosti. Praktické zkušenosti ukázaly, že nižší teploty složek nemusí být na závadu výsledných vlastností čerstvého i ztvrdlého UHPC.

4.4. Omezení karbonatace a šíření chloridů

Karbonatace betonu je přirozený proces. Postupně dochází ke snižování alkalinity betonu a ke korozi konstrukční a nosné výztuže. Výztuž se v důsledku koroze objemově zvětšuje a dochází k radiálnímu tlaku na krycí beton, který se odštěpuje.

Neméně škodlivým iniciátorem koroze konstrukčních výztuží (nosných lan, prutů atp.) jsou chloridy. Pro ilustraci chování karbonatace a chloridů byl analyzován a metodicky využit karbonatační model formulovaný Papadakisem a model pro šíření chloridů dle Kwona [15].

Bylo zjištěno, že šířka trhliny 0,3 mm zkracuje indukční dobu přibližně pětkrát, ve srovnání s betonem bez trhlin. Validace na vzorcích in situ ukazuje dobré předpovědi pro profily chloridů [15].

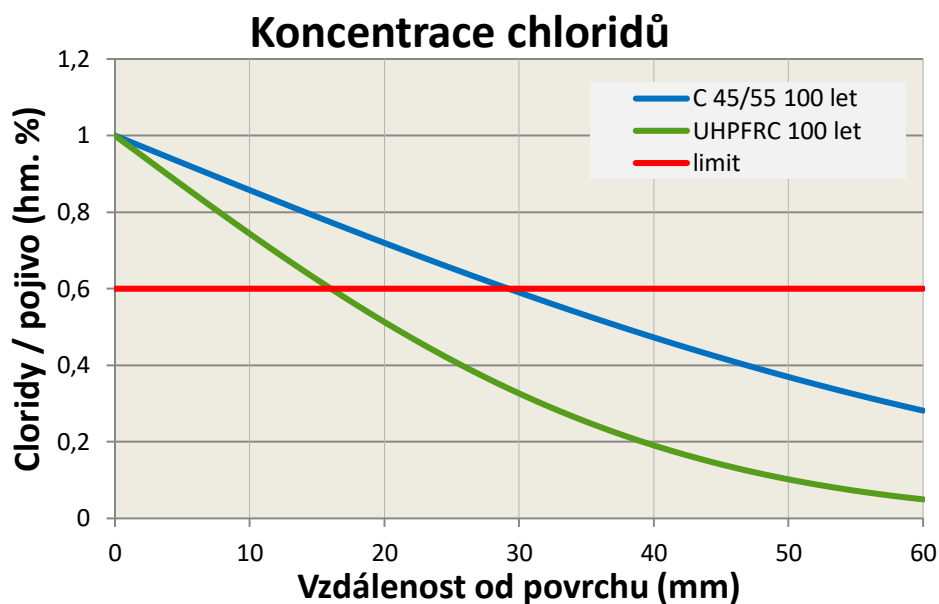
Se zřetelem k výše uvedeným destrukčním chemickým procesům, které svojí agresivitou snižují životnost (a kvalitu) betonů, byly metodicky zvoleny dvě verze:

- (I.) verze standartní C45/55;
- (II.) verze vysokopevnostní C110.

Šířka trhliny byla uvažována 0,30 mm, relativní vlhkost vzduchu 50 %. Povrchová koncentrace chloridů byla odhadnuta jako 1 %, limit pro korozi je 0,6 %. Z materiálových parametrů bylo zjištěno, že spotřeba cementu u vysokopevnostní verze C110 je cca 1,7 krát větší než u standartního betonu C45/55. Kulovité křemičité ultra jemné částice byly plně zahrnuty ve variantě z UHPC (viz Tab. 2). Nutná krytí armatury nosníků betonem pevnostní třídy C45/55 a pevnostní třídy C110 při účincích čela venkovní karbonatace a při účincích chloridů ve 100 a ve 200 letech jsou patrné z Tab. 3.

Tab. 2. Složení betonů pro porovnání karbonatace a šíření chloridů

Složky	C45/55	C110-UHPC
Cement CEM II-A/S (15 % strusky) (kg/cm ³)	450	x
Cement CEM I 52,5 N (kg/m ³)	x	771
Křemičitý úlet (v kg/m ³)	x	193
Voda (v kg/m ³)	170	193
Voda/pojivo	0,38	0,20



Obr. 2. Závislost koncentrace chloridů na vzdálenosti od exponovaného povrchu nosníku.

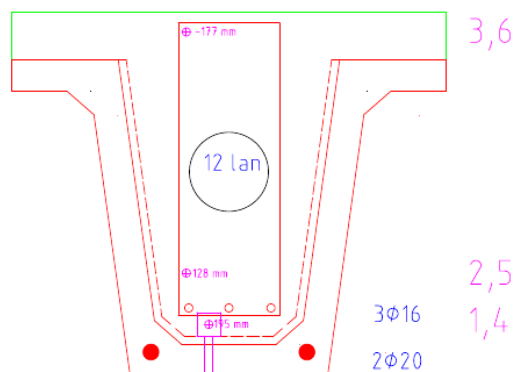
Tab. 3. Porovnání nutných krytí výztuže betonem při karbonataci a při účincích chloridů ve 100 a 200 letech při šířce trhliny 0,3 mm.

Krytí	C45/55	C110 – UHPC
Nutné krytí pro karbonataci ve 100 letech (mm)	39	1
Nutné krytí pro chloridy ve 100 letech (mm)	29	16
Nutné krytí pro karbonataci ve 200 letech (mm)	55	1
Nutné krytí pro chloridy ve 200 letech (mm)	38	22

4.5. Experimenty na nosníku

4.5.1. Ověření předpětí tenzometry

Pro ověření hodnoty předpětí byly do každého nosníku osazeny 3 strunové tenzometry typu 0VK4200VC00 od výrobce SISGEO, viz Obr. 3. Instrumentovaný průřez je 2,0 m od podpory nosníku.



Obr. 3. Osazené strunové tenzometry v nosnících a poloha tenzometrů na příčném řezu.

Na obou nosnících byla změřena relativní deformace od vnesení předpětí. Při předpokladu efektivního modulu pružnosti 35 GPa průřezu vychází vnesené napětí -9,5 až -19,8 MPa. Nerovnoměrné napětí vzniká díky excentricitě předpínací síly, která se zpětnou analýzou určila jako max. 25 mm nad střednicí. Tím dochází k většímu tlaku u horní strany nosníku. Na nosníku se standardním cementem je v těžišti napětí -14,2 MPa a se Sorfixem -14,9 MPa. Při návrhu nosníku bylo uvažováno rovnoměrné napětí -13,8 MPa, které přibližně odpovídá změřeným hodnotám.

4.5.2. Uspořádání experimentu a výsledky

Dílní metodické cíle (v rozsahu experimentálního měření):

- (I.) Navrhnout a ověřit metodiku experimentálního ověřování únosnosti předpjatých nosníků.
- (II.) Zpřesnit, aktualizovat a inovovat postupy pro provádění měření únosností nosníků a jejich interakce s betonem majícím běžné pevnosti.
- (III.) Provést statické zatěžovací zkoušky předpjatých nosníků v kombinaci s betonem běžných pevností a s použitím síranovápenatého pojiva SORFIX.

Experimentální zkoušky ohybu byly provedeny 21. a 22.07.2022 na dvou dodatečně předpjatých nosnících komponovaných v obalové části UHPC (s drátkovou výztuží o délce 17

mm) a v jádrové části prvního nosníku běžným betonem C45/55 a v jádrové části druhého nosníku ve variantě C45/55-SORFIX.

Na dvou předpjatých nosnících byly provedeny statické zatěžovací zkoušky (viz dále). Dodavatelem obou nosníků byla firma **Hochtief CZ a.s.** Skořepiny nosníků byly vyrobeny 14.10.2021 a jádrové (výplňové) betony 23.5.2022.

Použité přístroje a vybavení

V rámci **SZZ** (statická zatěžovací zkouška) byly **metodicky použity následující přístroje a vybavení** laboratoří stavební fakulty ČVUT:

- Zkušební lámací dráha.
- Hydraulický zatěžovací systém Inova.
- Hydraulický zatěžovací válec Inova 630 kN.
- Měřící ústředna Dewetron DEWE 5000.
- Teploměr Almemo 2290-2.
- Potenciometrické snímače dráhy.
- Induktivní snímače dráhy LVDT.
- Logovací ústředna DataTaker DT80G
- Strunové tenzometry SISGEO 0VK4200VC00

Místo experimentálních verifikačních měření

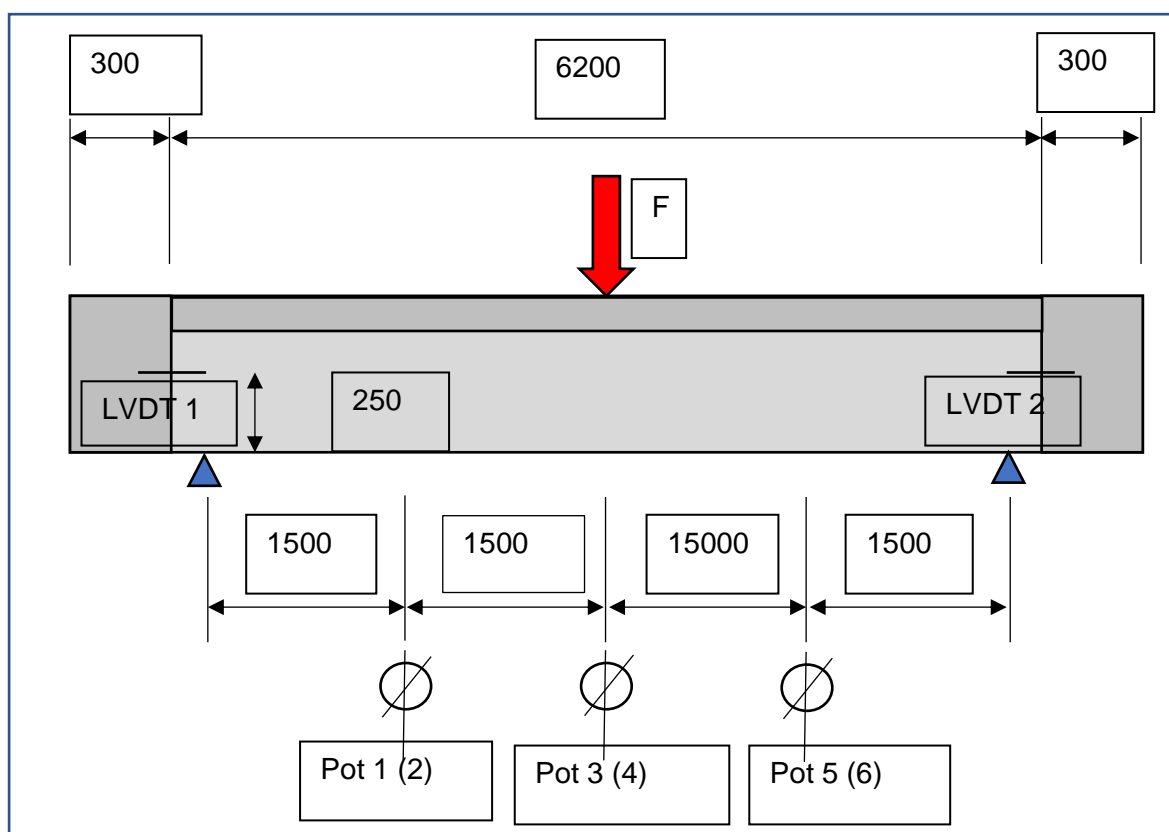
Navrhovaná měření byla provedena ve Zkušební laboratoři ČVUT v Praze na Fakultě stavební - OL 181, která je určena pro statické a dynamické zatěžovací zkoušky. Laboratoř má akreditaci ČIA č. 1048, podle ČSN EN ISO/IEC 17025:2018.

Statické zatěžovací zkoušky

Statické zatěžovací zkoušky byly provedeny na dvou nosnících (Obr. 4), a to dle ČSN 73 2030. Při zkouškách, dle daného zatěžovacího schématu, byly sledovány průhyby nosníků, a to ve čtvrtinách a v polovině rozpětí, viz. Obr. 5 a Obr. 6. Současně byly sledovány parametry pro případný vzájemný posun obou použitých typů betonu.



Obr. 4. Statické zatěžovací zkoušky ve zkušební laboratoři č. 1048 akreditované v ČIA.

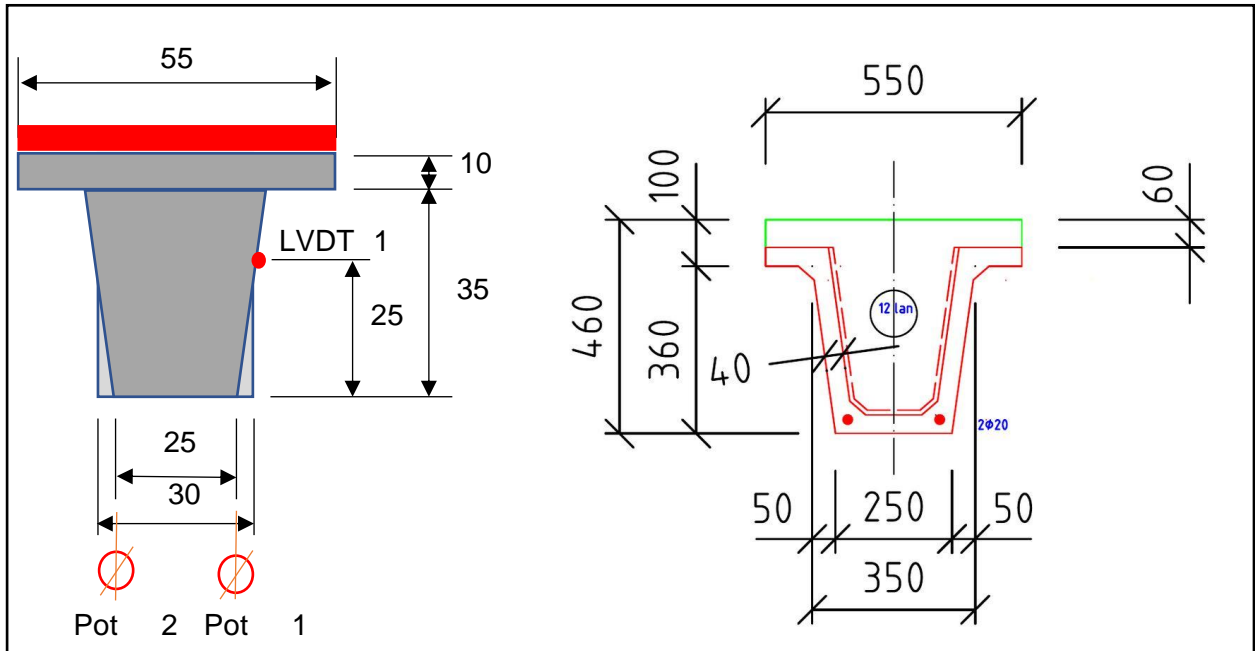


Obr. 5. Schéma statické zatěžovací zkoušky předpjatých nosníků.

Spolupůsobení vnější předepjaté skořepiny s jádrovým betonem běžných pevností bylo docíleno použitím nopové fólie. Po celou dobu zkoušek byla monitorována teplota v prostředí laboratoře. Pohybovala se v rozmezí od 19,7°C do 20,9°C.

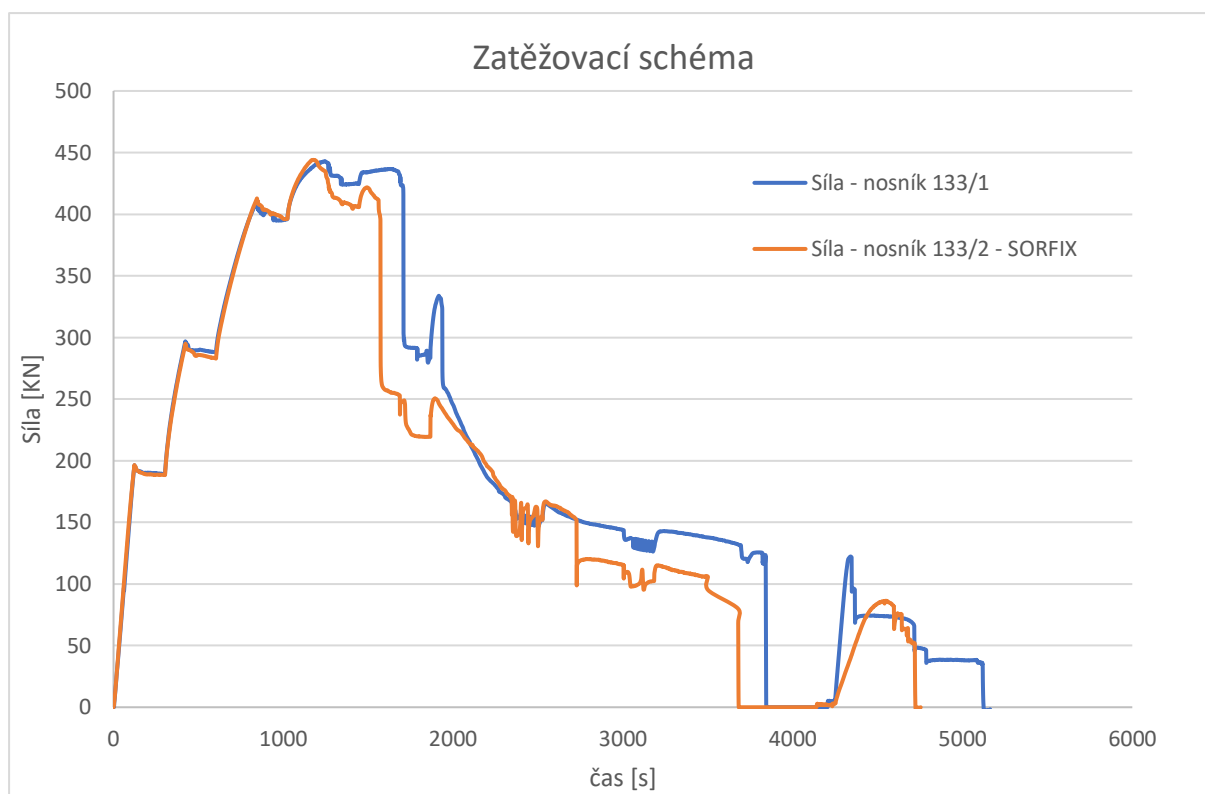
Zatěžování bylo příčně liniové, uprostřed rozpětí nosníků, a bylo řízeno nárůstem deformace na zatěžovacím válci (dle zatěžovacího schématu uvedeného na Obr. 7). Rychlost zatěžování

byla 5 mm/min. Při každém zatěžovacím kroku bylo zatížení udržováno po dobu 180 s. Zatěžovací stupně byly zvoleny takto: 10, 20, 40, 60, 80, 160, 240 mm. Dalším stupněm byly nosníky zatěžovány až do limitu zatěžovacího válce. V dalším kroku následovalo odtížení nosníků a nastavení zatěžovacího válce. Posledním krokem bylo zatěžování nosníků rychlostí 20 mm/min až do zastavení zkoušky.



Obr. 6. Příčný řez nosníků z UHPC.

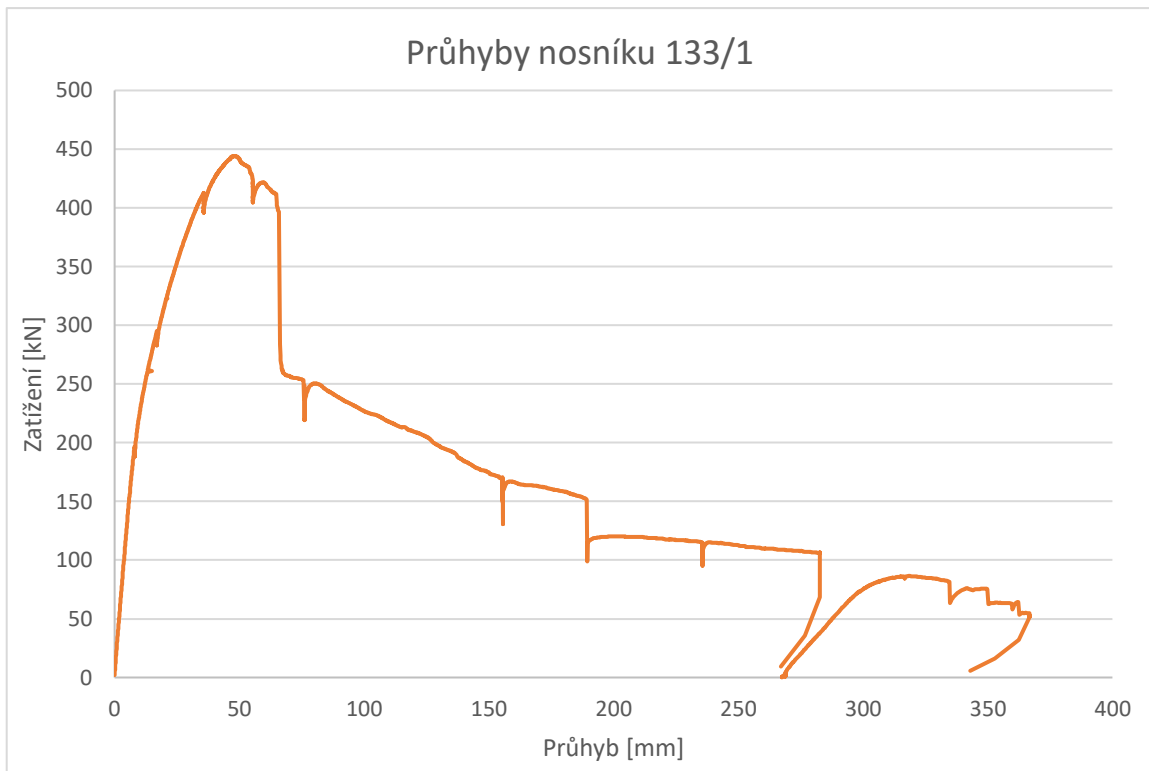
Nosníky byly zatěžovány hydraulickým zatěžovacím válcem Inova 630 (0 – 630 kN) s maximálním výsuvem válce 300 mm. Průhyby byly měřeny pomocí potenciometrických kladičkových snímačů, kde je posuv převáděn na pohyb jezdce po odporové dráze. Snímače označené Pot 1, 2, 5 a 6 mají rozsah 0 – 100 mm a snímače s označením Pot 3 a 4 mají rozsah 0 – 180 mm. Vodorovný posun hlavic byl měřen pomocí snímačů LVDT s rozsahem měření 0 – 5 mm. Všechny snímače byly připojeny k měřicí ústředně Dewetron DEWE 5000, která byla během měření řízena počítačem. Na tomto počítači se také během zatěžování ukládala naměřená data.



Obr. 7. Průběhy zatěžování nosníků z UHPC.

Nosník z UHPC v kombinaci s výplní C45/55

Dne 20.6.2022 byla provedena statická zatěžovací zkouška dodatečně předepnutého nosníku z UHPC v kombinaci s výplňovým betonem běžných pevností ze standardních surovin C45/55. Rozměry jsou uvedeny na Obr. 6. Zatěžování probíhalo v předem daných krocích až do dosažení maximálního výsuvu zatěžovacího válce. V tento okamžik byl nosník odtížen a byly zaznamenány jeho trvalé deformace. Poté došlo k nastavení zatěžovacího válce k dosažení většího průhybu. Následovalo další zatěžování nosníku, až do zastavení zkoušky. Průběh zatěžovací síly a průhyb nosníku ukazuje graf na Obr. 8. Průhyb v polovině rozpětí je v první části uveden až do okamžiku ztráty kontaktu měřící struny od nosníku a v další části je průhyb uváděn z dráhy válce, která byla redukována o deformaci zatěžovacího rámu na základě jeho vypočtené tuhosti. K porušení došlo v horní tlačené oblasti nosníku uprostřed jeho rozpětí, a to drcením betonu viz Obr. 9. Maximální zatížení zkoušeného nosníku bylo 444 kN, při průhybu 47,9 mm v polovině rozpětí. Součástí zkoušek bylo také měření vzájemného posunu hlavice nosníku z betonu běžných pevností a střední části nosníku z UHPC. Během SZZ nedošlo v těchto bodech k téměř žádným deformacím.



Obr. 8. Průhyb ve středu rozpětí nosníku z UHPC č. 133/1 v závislosti na jeho zatížení.



Obr. 9. Porušení nosníku z UHPC č. 133/1.

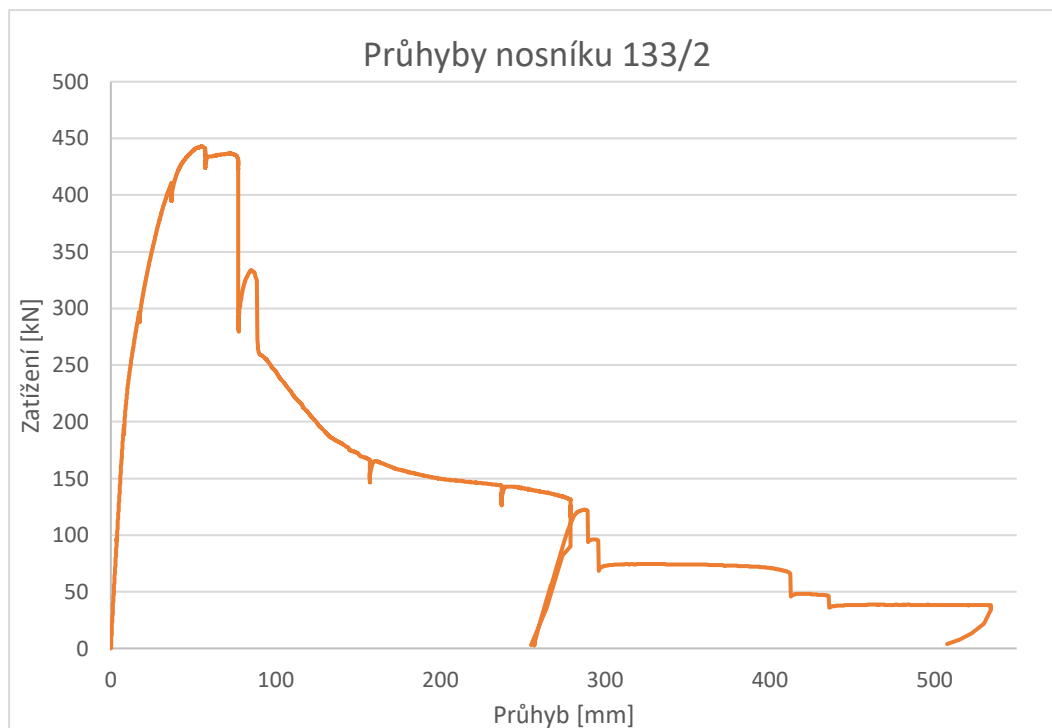
Nosník z UHPC v kombinaci s výplní C45/55-SORFIX

Dne 21.6.2022 byla provedena statická zatěžovací zkouška dodatečně předepnutého nosníku z UHPC v kombinaci se síranovápenatým pojivem SORFIX. Měřené body a rozměry nosníku jsou uvedeny na Obr. 6. Zatěžování probíhalo v předem daných krocích až do dosažení maximálního výsuvu zatěžovacího válce. V tento okamžik byl nosník odtížen a byly zaznamenány jeho trvalé deformace. Poté došlo k nastavení zatěžovacího válce k dosažení většího průhybu. Následovalo další zatěžování nosníku až do zastavení zkoušky, kdy hlavním parametrem zastavení zkoušky byla bezpečnost obsluhy a riziko poškození měřicího zařízení.

Průběh zatěžovací síly a průhybu nosníku ukazuje graf na Obr. 10. Průhyby ve čtvrtinách rozpětí nosníku jsou uváděny až do okamžiku odpadnutí snímačů. Průhyb v polovině rozpětí je v první části uveden až do okamžiku ztráty kontaktu měřicí struny od nosníku a v další části je průhyb uváděn z dráhy válce, která byla redukována o deformaci zatěžovacího rámu, na základě jeho vypočtené tuhosti. K porušení došlo v horní tlačené oblasti nosníku uprostřed jeho rozpětí, a to drcením betonu viz Obr. 11.

Maximální zatěžovací síla, působící na nosník z UHPC s běžným výplňovým betonem v jeho jádru (č.133/1) dosáhla hodnoty 444 kN při průhybu středu 47,9 mm. Pro nosník z C45/55-SORFIX(č.133/2) dosáhla hodnoty 443 kN při průhybu středu 55,3 mm.

Součástí zkoušek bylo také měření vzájemného posunu hlavice nosníku z betonu běžných pevností a střední části nosníku z UHPC. Během SZZ nedošlo v těchto bodech k téměř žádným deformacím.




Obr. 10. Průhyby středu nosníku č. 133/2 v závislosti na jeho zatížení.




Obr. 11. Porušení nosníku č. 133/2.

Tab. 4. Přehled experimentálních měření nosníku z UHPC č. 133/1.

Název zkoušky	SZZ nosníku 133/1	
Označení prvku	133/1	
Datum Zkoušky	20.6.2022	
Zatěžovací schéma	viz Obr. 7	
Válcová pevnost v tlaku UHPC	145,8 MPa	
Válcová pevnost v tlaku výplňového betonu	64,3 MPa	
Max zatížení	$F = 444 \text{ kN}$	
Průhyb v $\frac{1}{2}$ rozpětí při max. zatížení	$P = 47,9 \text{ mm}$	

Tab. 5. Přehled experimentálních měření nosníku z UHPC č. 133/2-SORFIX.

Název zkoušky	SZZ nosníku 133/2 - SORFIX	
Označení prvku	133/2	
Datum Zkoušky	21.6.2022	
Zatěžovací schéma	viz Obr. 7	
Válcová pevnost v tlaku UHPC	145,8 MPa	
Válcová pevnost v tlaku výplňového betonu	52,8 MPa	
Max zatížení	$F = 443 \text{ kN}$	
Průhyb v $\frac{1}{2}$ rozpětí při max. zatížení	$P = 55,3 \text{ mm}$	

Z provedených experimentálních a výpočetních ověření nosníků lze uvést následující přehledné závěry:

1. Multifunkční kompozitní nosníky a sloupy, projektované z UHPC a obsahující ověřené příměsi, mohou efektivně zajistit požadovanou únosnost, dodržením pokynů v této metodické příručce.
2. Experimentálně bylo prokázáno, že rozdíl v zatížení nosníků z UHPC (na úrovni jejich únosnosti) s materiálem jádra C45/55 či C45/55-SORFIX je pouze 1 kN, viz Tab. 4 a Tab. 5. Nosníky pro rozpětí 6,0 m byly navrženy pro zkoušky v prostorově omezených dimenzích laboratoře. Maximální zatížení u nosníků bylo identifikováno (u obou variant nosníků) téměř shodné. U nosníku bez aplikace SORFIX dosáhlo maxima 444 kN a u nosníku s náhradou síranovápenatým pojivem SORFIX 443 kN.

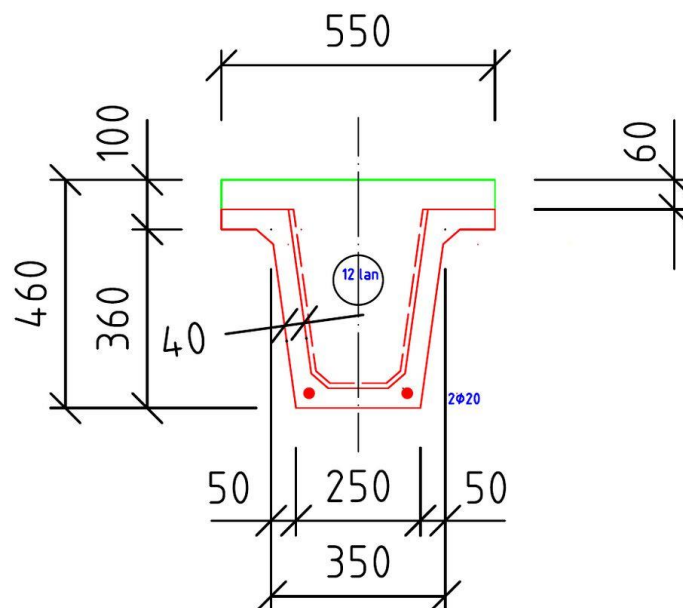
3. Speciální pozornost z hlediska snížení počtu pracovníků a energií byla zaměřena na odprýsknutí povrchových částí betonu a na poruchy ocelové výztuže vlivem koroze. Chemické reakce v důsledku karbonatce jsou provázeny smršťováním betonu, které může vést až k jeho poruchám. Na iontové úrovni dochází ke spotřebě hydroxylových iontů a ke snížení pH z 12 na pH 8. Tím je iniciována degradace ocelové výztuže, která zvětšuje objem. V důsledku koroze dochází k odprýsknutí krycího betonu.

4. Vzhledem k tomu, že karbonatce a pronikání chloridů k výztuži nosníků z UHPC mají nežádoucí agresivní účinky, byly provedeny analýzy vlivu trhlin v rámci softwaru CarboChlorCon. Nutná krytí výztuže nosníků betonem pevnostní třídy C45/55 a pevnostní třídy C110 pro účinek karbonatce a pro účinek chloridů ve 100 letech a ve 200 letech jsou patrné z Tab. 3. Porovnání nutných krytí výztuže betonem při karbonataci a při účincích chloridů ve 100 a 200 letech při šířce trhliny 0,3 mm. Tab. 3.

5. Numerický model nosníku a výsledky

5.1. Geometrie, síť konečných prvků, materiálový model

Geometrie a síť konečných prvků byla vytvořena dle skutečné geometrie nosníku v programu Salome 9.6. Rozpětí nosníku bylo 6 metrů, příčný řez je patrný z Obr. 12.



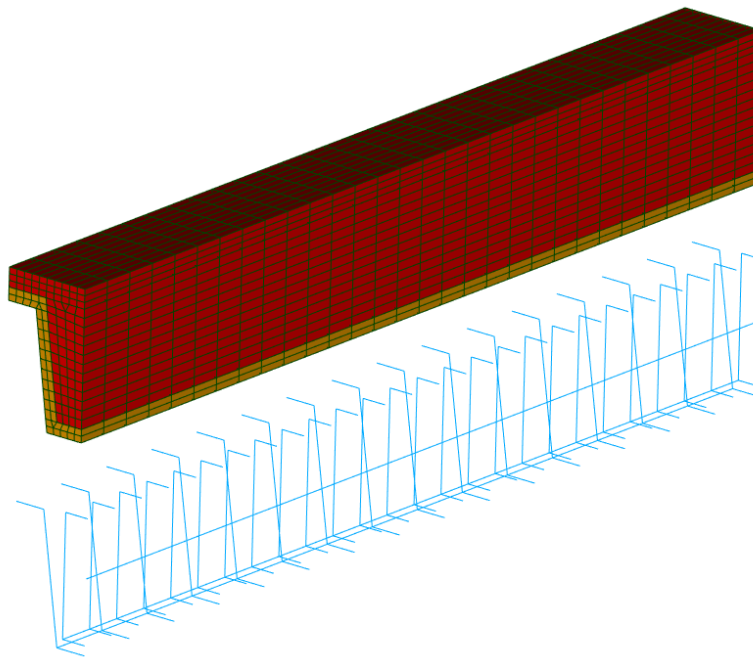
Obr. 12. Příčný řez kompozitním nosníkem.

Vzhledem k symetrii ve zkoušce třibodového ohybu se modeluje pouze 1/4 nosníku. 3D prvky jsou převážně typu brick (3720 ks) s kvadratickou aproximací polí posunů, několik prvků je

typu wedge (90 ks) také s kvadratickou aproximací polí posunů. Podélná výztuž je v tomto redukovaném modelu tvořena 1Ø20 mm v UHPC a 1Ø16 mm ve výplňovém betonu. Dále se uvažuje 1 kabel s 12 lany v těžišti průřezu s průřezovou plochou $12 \cdot 140 = 1680 \text{ mm}^2$, viz Obr. 12.

Konstrukční třmínky jsou osazeny do UHPC z Ø8 mm á 200 mm. Pro přenesení smyku ve výplňovém betonu jsou dále osazeny třmínky Ø10 mm á 120 mm, viz Obr. 13. Spolupůsobení obou betonů ve smyku se uvažuje jako dokonalé.

Spojení uzlů výztuže s 3D prvky je uskutečněno pomocí tzv. hanging nodes, které přejímají pole posunů z interpolačních funkcí na konečných prvcích. Výhodou je nenavyšování stupňů volnosti modelu, nevýhodou je předpoklad dokonalého spolupůsobení výztuže s 3D prvky.



Obr. 13. Geometrie 1/4 nosníku se sítí konečných prvků a vložená ocelová výztuž.

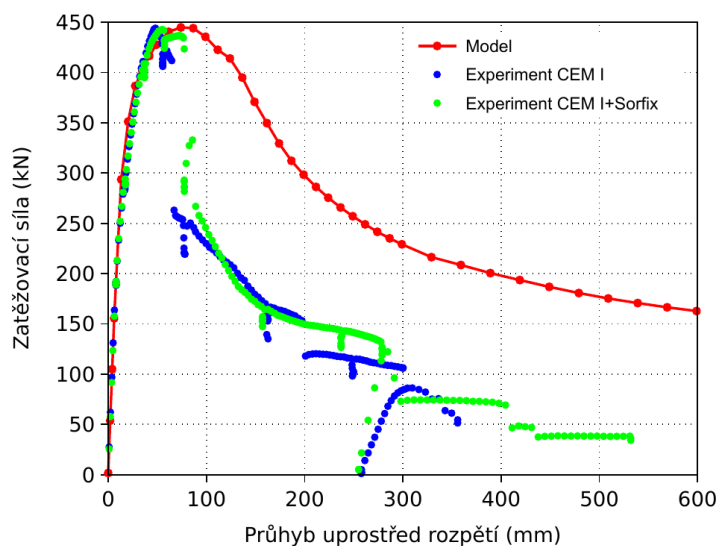
Výpočet probíhal v konečně prvkovém softwaru OOFEM [12]. Pro všechny betony se uvažoval model con2dpm (Concrete damage plasticity model version 2), který rozděljuje poškození v tahu a v tlaku. Výhodou modelu je dobrá konvergence, nevýhodou je absence relativní deformace pro trhliny a nemožnost zjistit přímo šířku trhlín. Průměrná tlaková pevnost UHPC je v modelu uvažována hodnotou 118 MPa, tahová pevnost 15 MPa a modul pružnosti 43 GPa.

Oba výplňové betony C45/55 a C45/55-SORFIX se v modelu uvažovaly shodnou hodnotou tlakové pevnosti 48 MPa, tahové pevnosti 3,5 MPa a modulem pružnosti 35 GPa.

Výztuž se uvažovala jako ideálně pružnoplastický Misesův materiál s modulem pružnosti 200 GPa a s mezí kluzu 500 MPa bez omezení přetvoření a bez zpevnění.

5.2. Validace konečněprvkového modelu

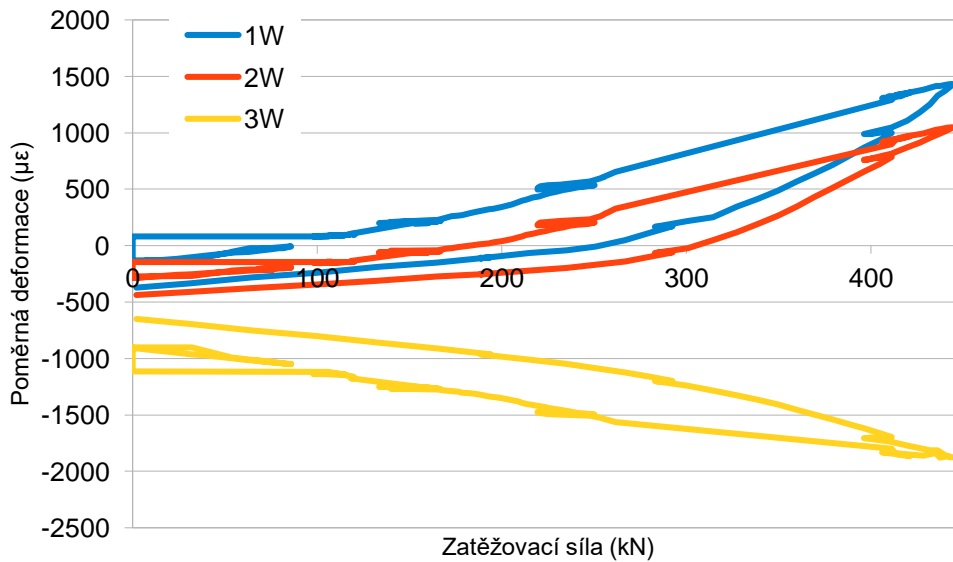
Zatěžovací větve kopíruje velmi dobře průběh experimentu až do dosažení únosnosti (444 a 443 kN), viz Obr. 14. Poté dochází v experimentu k delaminaci horní části spřaženého průřezu, viz Obr. 15. Model uvažuje dokonalé spolupůsobení betonu s UHPC, proto předpovídá mírně vyšší sílu po dosažení skutečné únosnosti. Model i experiment ukazují na další plastické chování betonu při změkčení, celý experiment byl navržen na porušení betonu v tlaku, kdy nedošlo k přetržení předpínacích lan.



Obr. 14. Shoda modelu s experimentem pro dvě varianty nosníků.



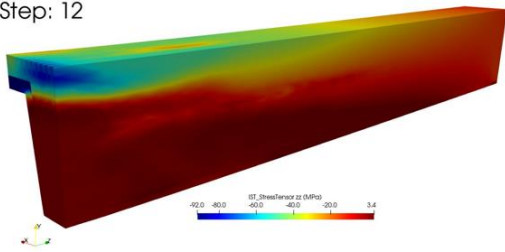
Obr. 15. Delaminace horní části průřezu krátce po dosažení maximálního zatížení.



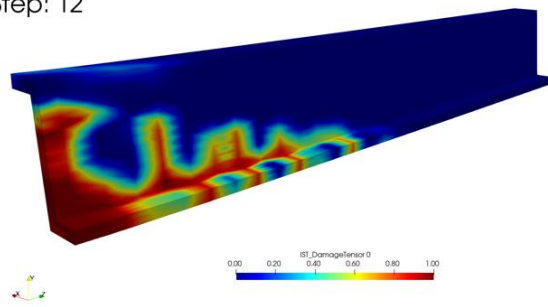
Obr. 16. Relativní deformace ze strunových tenzometrů.

Linearitu při zatěžování potvrzují grafy ze strunových tenzometrů na Obr. 16, kdy až po dosažení síly cca 220 kN (50% únosnosti) je již odezva nelineární. Pokluz mezi UHPC a výplňovým betonem lze určit ze změřených hodnot na tenzometrech 1 a 2. Do zatížení 300 kN (68% únosnost) k pokluzu nedochází, při dalším přitížení dochází k menší deformaci výplňového betonu, což značí vznik tahových trhlin ve vnitřní části nosníku.

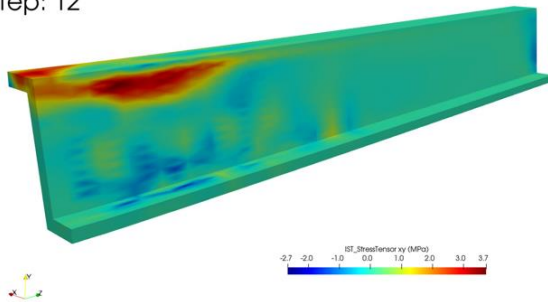
Step: 12



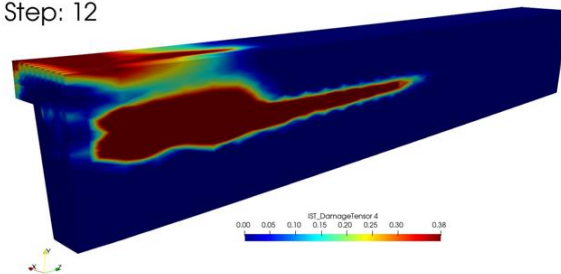
Step: 12



Step: 12



Step: 12



Obr. 17. Stav nosníku při maximální síle - normálové napětí, tlakové poškození, smykové napětí, tahové poškození.

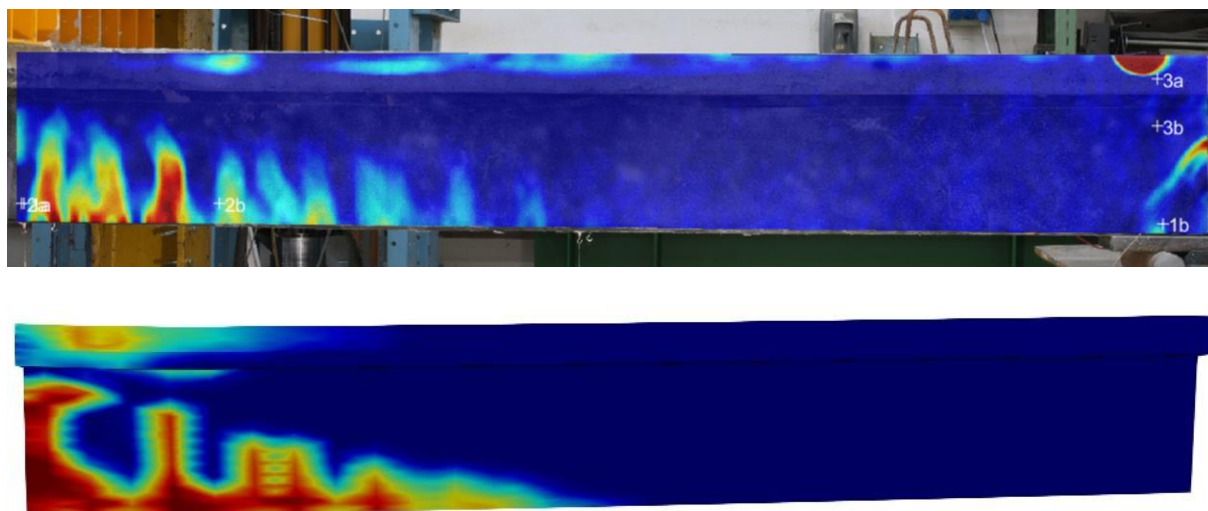
Dále je vykresleno napětí τ_{xy} , které je důležité pro vyhodnocení spolupůsobení obou částí betonů. V lokalizované zóně poškození dosahuje hodnoty 3,7 MPa, nejvyšší hodnota je 5,2 MPa v kroku 8 v sestupné větvi zatěžování. Tato extrémní hodnota byla přibližně dosažena i na zkouškách spolupůsobení a prokazuje, že i při extrémním zatížení smykové spolupůsobení obou betonů stále probíhá.

Obr. 17 ukazuje stav při dosažení únosnosti v kroku 12. Spodní polovina nosníku je prakticky poškozena tahem (IST_DamageTensor 0), skořepina vykazuje několik zlokalizovaných trhlin ve vzdálenostech cca 25 cm. Ve vzdálenosti cca 30 cm od středu nosníku dochází k plasticitě tlačeného výplňového betonu a UHPC (IST_DamageTensor 4). Napětí v předpínacím laně je 1569 MPa, které zůstává pod mezí kluzu 1770 MPa.

Digitální korelace obrazu

Nedestruktivní měření pomocí digitální korelace obrazu (DIC) bylo provedeno na pravé polovině nosníku. Měření prováděl Doc. Ing. Václav Nežerka, Ph.D. z Katedry fyziky, Fakulta stavební, ČVUT v Praze.

Obr. 18 zachycuje stav na sestupné větvi zatížení nosníku, kde je výplňový beton C45/55-SORFIX. Zde je vidět podobný rozvoj trhlin v tažené oblasti a poškození i v oblasti tlačené jak z digitální korelace, tak z numerického modelu.

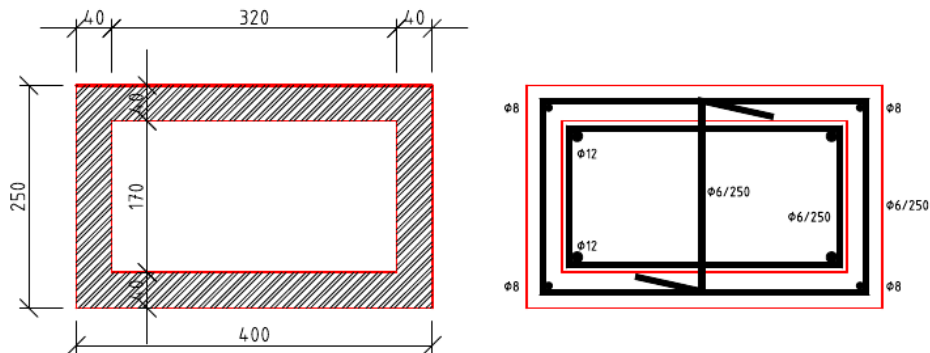


Obr. 18. Stav trhlin při zatížení 401 kN, 90% únosnosti na sestupné větvi. Dole předpověď numerického modelu s vykresleným polem poškození na UHPC.

6. Experimenty na sloupu v prostém tlaku

6.1. Uspořádání experimentu a výsledky

Kompozitní sloup byl vyroben z UHPC skořepiny tloušťky 40 mm, která byla vyplněna betonem C45/55-SORFIX, viz Obr. 19. Konečná délka testovaného sloupu byla 2,0 m. Zatěžování proběhlo v centrickém tlaku, neboť pilotní experimenty v excentrickém tlaku ukázaly usmyknutí zhlaví sloupu, v důsledku navýšených konstantních rozdílů hlavních napětí (vnášením excentrické síly). Pro zkoušení byl v Kloknerově ústavu ČVUT v Praze použit hydraulický zkušební stroj Amsler s maximální tlakovou silou 10 MN, potenciometrické snímače pro měření posunů do 25 mm – 2 ks, dále potenciometrické snímače posunů o rozsahu 50 mm – 3 ks, potenciometrické snímače posunů o rozsahu 100 mm – 2 ks. Zkoušený sloup byl umístěn do stroje a osazen snímači posunů. Zatěžování probíhalo kontinuálně až do dmaximální síly a křehkého porušení, viz Obr. 20. Řízení zatěžovací síly probíhalo manuálně. Při zatěžování byly elektronicky (pomocí měřicí ústředny QUANTUM) zaznamenávány hodnoty dosažených sil a deformací (pomocí snímačů). Maximální dosažená síla byla 8,878 MN po 12 minutách zatěžování. Porušení nastalo rozštípnutím zhlaví sloupu vnitřním betonem, který se již nalézal v plastickém stavu.



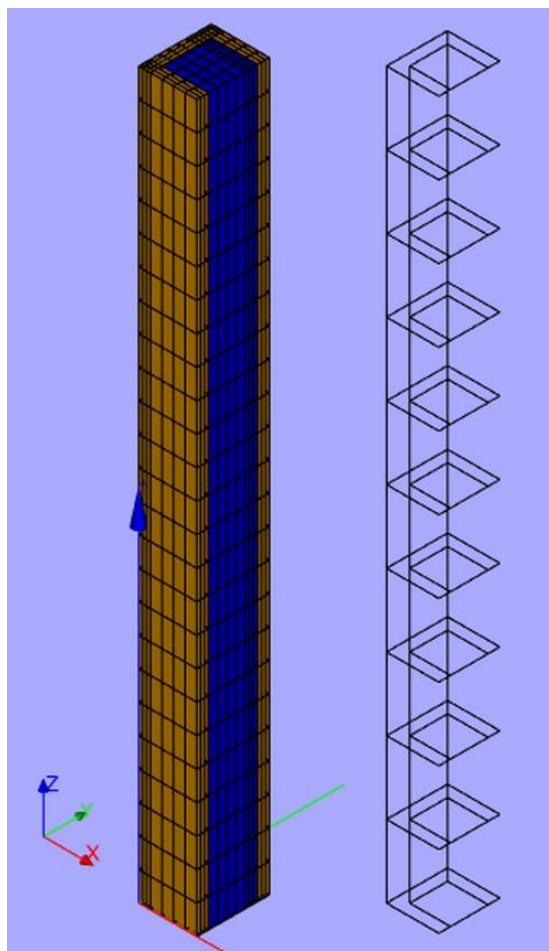
Obr. 19. Příčný řez sloupu a charakteristické vyztužení.



Obr. 20. Kompozitní sloup v centrickém tlaku po porušení.

6.2. Numerický model a výsledky

Výsledný model zahrnuje skořepinu z UHPC, výplňový beton a prutovou výztuž, viz Obr. 21. V důsledku tvarové (konstrukční) symetrie byla modelována pouze 1/2 sloupu.



Obr. 21. Diskretizovaný model 1/2 sloupu a vložená výztuž.

Okrajové podmínky odpovídaly centrickému tlaku. Oba betony měli stáří cca 5 měsíců, moduly pružnosti betonu byly zvýšeny pro lepší shodu se zatěžovací větví. Zároveň byly zvětšeny tlakové pevnosti obou betonů. Výsledný model plastického poškození pro beton s plasticitou byl definován jako:

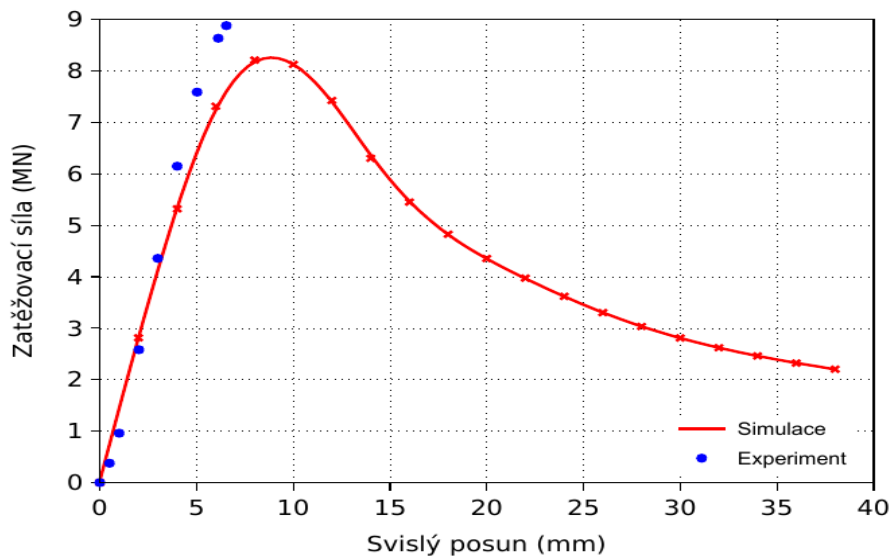
```
con2dpm 1 d 0.023 E 50.e3 n 0.2 talpha 0.000010 wf 2000.e-6 fc 150. ft 15. stype 0
```

```
con2dpm 2 d 0.023 E 40.e3 n 0.2 talpha 0.000010 wf 800.e-6 fc 80. ft 4.5 stype 0.
```

Výztuž se uvažovala jako ideálně pružnoplastický Misesův materiál s modulem pružnosti 200 GPa a mezí kluzu 500 MPa bez omezení přetvoření a bez zpevnění.

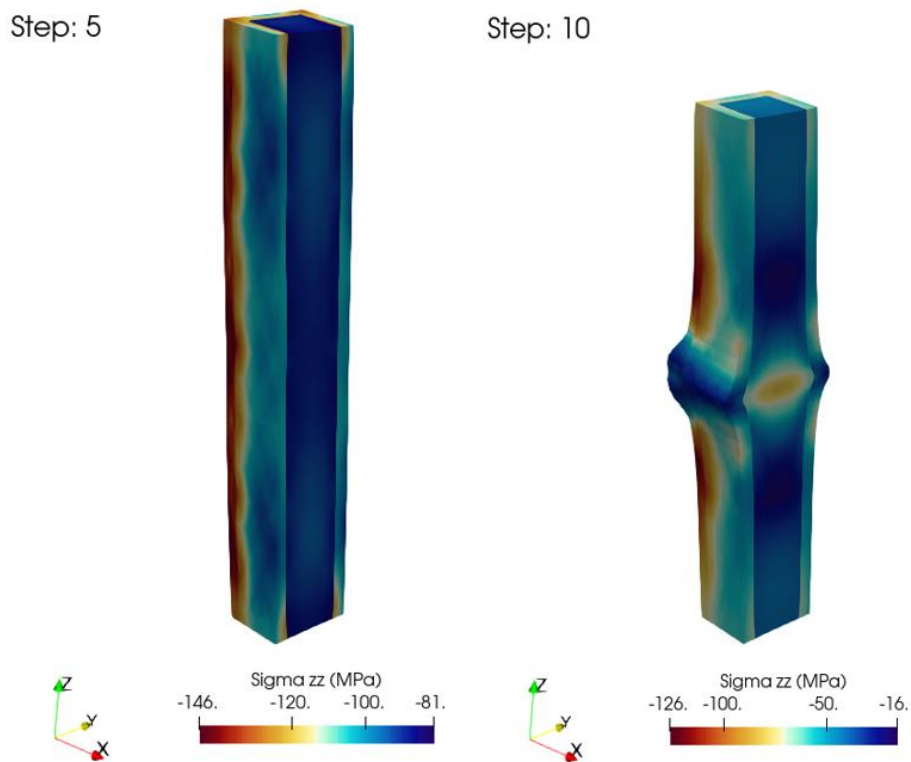
```
MisesMat 6 d 7.85e-3 E 200.e+3 n 0.3 tAlpha 10e-6 sig0 500.0 H 0. omega_crit 0.0 a 0.0
```

Výpočet probíhal v softwaru OOFEM [12] s použitím geometrické nelinearity.



Obr. 22. Zkouška sloupu v centrickém tlaku a validace.

Validace modelu je vidět na Obr. 22. Únosnost sloupu z modelu 8,27 MN je nižší než experimentálních 8,878 MN, pravděpodobnou příčinou byla vyšší tlaková pevnost betonů. Ze zatěžovací křivky je patrná větší tuhost sloupu, která je způsobena pravděpodobně vyšším modulem pružnosti obou betonů.



Obr. 23. Svislé normálové napětí při dosažení maximální únosnosti (vlevo) a na sestupné větvi (vpravo), deformace 20× zvětšena.

Při dosažení únosnosti je ve skořepině UHPC vertikální napětí σ_z až -146 MPa a v jádrové výplni až -81 MPa. Na sestupné větvi dochází uprostřed výšky sloupu k lokalizaci poškození, které se může lokalizovat prakticky kdekoliv. Podélná i příčná výztuž se dostává po dosažení únosnosti na mez kluzu a začíná její plastické přetváření.

7. Uplatnění v praxi

7.1. Ekonomické aspekty

Exaktní posouzení úspor při realizaci konkrétního předpjatého nosníku (dané délky) s materiálem UHPC v jeho jádru s klasickým železobetonovým nosníkem (téže délky) je v aktuální době inflačních procesů velmi nepřesné. Je obtížné objektivně (i po odečtení marží) dvou nebo více podobných stavebních firem. Obecně a přibližně platí, že čím budou nosníky s jádrovým materiálem méně hmotné a kratší, tím budou výrobně a manipulačně relativně levnější. Budou však mít menší únosnost.

Nové konstrukce mostních nosníků z UHPC však mohou přispívat k ekonomickým úsporám některými technologickými nástroji, na příklad:

- (1) usnadněním manipulace s materiálem,
- (2) minimalizacemi hmotností nosníků;
- (3) využitím ztraceného bednění;
- (4) snížením počtu pracovníků;
- (5) snížená rychlost karbonatace (tj. první faktor prodloužení životnosti konstrukce);
- (6) eliminacemi pronikání chloridů (tj. druhý faktor prodloužení životnosti konstrukce).

Integrace kompozitních konstrukcí a aplikovaných kompozitních materiálů patří mezi efektivní způsoby modernizace stavebních konstrukcí. Návrh a výběr experimentálně ověřených multifunkčních kompozitních nosníků (MKN) a sloupů směřoval k volbě dvoukomponentních konstrukcí složených z vnějšího tenkostěnného obalu a z jádrové vnitřní části.

Z hlediska hlavních znaků dochází u multifunkčních kompozitních nosníků:

- (a) k úsporám materiálů minimalizováním jejich hmotnosti,
- (b) k urychlení dokončení stavebního díla,
- (c) k využití vnější skořepinové konstrukční části jako ztraceného bednění,
- (d) k usnadnění manipulace s nosníkem ve výrobně a jeho transportem do místa osazení,
- (e) k úspoře počtu pracovníků,

- (f) ke zvýšení únosnosti finální konstrukce,
- (g) k multifunkčnosti nosníků z UHPC s tvarovou růzností (příčného řezu),
- (h) k regulování ekonomické efektivnosti.

Dominantním ekonomickým faktorem úspor je záruka dlouhodobé životnosti předmětné konstrukce za podmínek dodržení všech technologických metodických poznatků, uvedených v tomto informačním přehledu, z hlediska navrhování a realizace projektů s využitím UHPC a vhodných příměsí.

8. Literatura

- [1] ČSN EN 206+A2. *Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*, ÚNMZ, Praha, 2021.
- [2] TKP 18. *Betonové konstrukce a mosty*, PJKP, Praha, 2016.
- [3] Kolisko, J., et al. *METODIKA 1: Metodika pro návrh UHPC a materiálové zkoušky*, Kloknerův ústav v Praze, Praha, 2015.
- [4] Kalný M., et al. *METODIKA 2: Metodika pro navrhování prvků z UHPC*, Kloknerův ústav v Praze, Praha, 2015.
- [5] Tichý, Jan, et al. *METODIKA 3: Metodika pro výrobu prvků z UHPC a pro kontrolu jejich provedení*, Kloknerův ústav v Praze, Praha, 2015.
- [6] ČSN EN –197 – 1. *Cement – Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití*, ÚNMZ, Praha, 2012.
- [7] ČSN EN 12620 + A1. *Kamenivo do betonu*, ÚNMZ, Praha, 2008.
- [8] ČSN EN 13263. *Křemičitý úlet do betonu*, ÚNMZ, Praha, 2009.
- [9] ČSN EN 15167. *Mletá granulovaná vysokopecní struska pro použití do betonu, malty a injektážní malty*, ÚNMZ, Praha, 2006.
- [10] ČSN 72 1220. *Mleté vápence a dolomity*, Český normalizační institut, Praha, 1983.
- [11] ČSN EN 14889-1. *Vlákna do betonu – Část 1: Ocelová vlákna – Definice, specifikace a shoda*, ÚNMZ, Praha, 2007.
- [12] B. Patzák: OOFEM - an object-oriented simulation tool for advanced modeling of materials and structures. *Acta Polytechnica*, 52(6):59–66, 2012.
- [13] TP ČBS 07. *Ultra vysokohodnotný beton (UHPC)*, Česká betonářská společnost ČSSI, Praha, 2022.
- [14] H. G. Russell a B. A. Graybeal: *Ultra-High Performance Concrete: A State-of-the-Art Report for the Bridge Community*, Federal Highway Administration, 2013.
- [15] V. Šmilauer, K. Pohl: *CarboChlorCon 1.0 - software for concrete carbonation and chloride ingress* [online]. Dostupné z: <http://mech.fsv.cvut.cz/~smilauer/index.php?id=software>.

9. Použité definice a zkratky

UHPC – Ultra vysokohodnotný beton (ultra-high-performance concrete) je beton s lepšími vlastnostmi, než má vysokohodnotný beton (**HPC**). Toto označení bývá použito i pro drobné aplikace bez použití rozptýlené výztuže jako např. tenká vyrovnávací vrstva.

HPC - Vysokohodnotný beton (High-Performance Concrete) je beton s jednou nebo s více vylepšenými vlastnostmi, jako na příklad: trvanlivostí, pevností, odolností proti pronikání tlakové vody, vysoká kvalita povrchů atp.

UHPRFC – Ultra vysokohodnotný beton s drátkovou výztuží (Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete) mající lepší vlastnosti, než má vysokohodnotný beton (**HPC**).

UHPC a UHPRFC jsou vysokopevnostní kompozitní materiály. Z obecného pohledu mají vysokou pevnost, velké objemové množství cementu, malý vodní součinitel. Konzistence obou betonů je ovlivněna přísadami, směsi jsou samozhutitelné a obvykle jsou i samonivelační.

MKN - MULTIFUNKČNÍ KOMPOZITNÍ NOSNÍKY jsou charakteristické kompozitní konstrukce, obvykle sestávající z části předpjaté (skořepinové, vnější tenkostěnné) a z jedné nebo z více provázaných částí, tj. z výplňových komponent, jako je například beton běžných pevností, s kombinacemi kompozitních materiálů (například speciálně upravených popílků, mineralizovaných příměsí atp.). Multifunkčnost je produktem efektivního řízení vlastností (UHPC + kompozitní výplně) nosníků, jako je jejich optimální tuhost, únosnost a konkrétní využitelnost v praxi. Aplikace předpjatých obalových skořepin s variacemi výplní z kompozitních materiálů umožňuje předem efektivně regulovat (inovovat) používané předpjaté konstrukce. Ekonomické a energetické (výrobní, technologické) přednosti MKN jsou základními ukazateli efektivity jejich výroby a následně jejich využitelnosti v praxi.

SZZ – statická zatěžovací zkouška.

AKP - antikarbonatační potahy jsou speciální ochranné potahy povrchů vnějších obalových tenkostěnných (skořepinových) předpjatých konstrukčních komponent nosníků z UHPC. AKP výrazně retardují (případně zcela eliminují) stárnutí betonů, projevující se postupným odlupováním jeho povrchových vrstev a později jeho rychlou a rozsáhlou delaminací a další korozí ocelové (nosné nebo konstrukční) výztuže.

SORFIX je síranovápenaté hydraulické pojivo vyrobené z druhotných surovin. Lze ho použít samostatně jako náhrada cementu či jím nahradit část cementu, příklad Tab. 1.

KŘEMIČITÉ ÚLETY jsou křemičité ultra-částice, regulující pevnostní parametry kompozitu a přispívající k minimalizování jeho otěru.