

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA STAVEBNÍ

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí

Studijní program: Stavební inženýrství  
Specializace: Konstrukce a dopravní stavby



# Zesílení podpor ocelových mostů pomocí UHPC

## Strengthening of steel bridge support areas with UHPC

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vypracoval: Martina Starýchfojtů  
Vedoucí práce: prof.Ing.Pavel Ryjáček, Ph.D.  
Rok: 2025



## PROHLÁŠENÍ

Já, níže podepsaná

Příjmení, jméno studenta: Starýchfojt Martina  
Osobní číslo: 506579  
Název programu: Stavební inženýrství

prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem

Zesílení podpor ocelových most pomocí UHPC

vypracovala samostatně a uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací a Rámcovými pravidly používání umělé inteligence na ČVUT pro studijní a pedagogické účely v Bc a NM studiu.

Prohlašuji, že jsem v průběhu příprav a psaní závěrečné práce použila nástroje umělé inteligence. Vygenerovaný obsah jsem ověřila. Stvrzuji, že jsem si vědoma, že za obsah závěrečné práce plně zodpovídám.

V Praze dne 19.02.2025

Martina Starýchfojt

.....  
podpis

## **Poděkování**

Děkuji panu profesorovi Ryjáčkovi za příležitost podílet se na této práci, která byla velmi rozmanitá, praktická a přínosná. Velké díky patří Michalu Gschrayovi za neustálou technickou podporu and special thank you to Yasmina Boutar for her patience, support, and willingness to explain everything throughout the entire process.

Martina Starýchfojtů

*Název práce:*

## **Zesílení podpór ocelových mostů pomocí UHPC**

*Autor:* Martina Starýchfojtů

*Studijní program:* Stavební inženýrství

*Specializace:* Konstrukce a dopravní stavby

*Druh práce:* Bakalářská práce

*Vedoucí práce:* prof.Ing.Pavel Ryjáček, Ph.D.

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí, Fakulta stavební, České vysoké učení technické v Praze

*Konzultant:* –

*Abstrakt:* Cílem této práce je zhodnotit, zda navržená technologie rekonstrukce ocelového trémového mostu je funkční a proveditelná. Problematika ocelových mostů v nevyhovujícím stavu je rozsáhlá, není reálné ani ekonomicky únosné přistoupit k plošné obnově všech mostů nacházejících se v nevyhovujícím technickém stavu. Proto se zaměřujeme na nové technologie a moderní materiály, které pomáhají prodloužit životnost mostů bez markantních zásahů do konstrukce. V rámci této práce byla navržena rekonstrukce pomocí zesílení obetonováním vysokopevnostním betonem UHPC. Ověření účinnosti této technologie bylo provedeno prostřednictvím experimentálních testů, které potvrdily, že navržená technologie je pro dočasné prodloužení životnosti konstrukce dostatečně efektivní.

*Klíčová slova:* technologie zesilování, UHPC, návrh, experiment

*Title:*

## **Strengthening of steel bridge support areas with UHPC**

*Author:* Martina Starýchfojtů

*Abstract:* The aim of this thesis is to assess whether the proposed reconstruction technology for a steel girder bridge is functional and feasible. The issue of steel bridges in inadequate condition is extensive, and it is neither realistic nor economically viable to carry out large-scale renovations of all structures in poor technical condition. Therefore, the focus is on new technologies and modern materials that help extend the service life of bridges without major structural interventions. In this study, a reconstruction method using UHPC (Ultra-High Performance Concrete) jacketing was proposed. The effectiveness of this technology was verified through experimental tests, which confirmed that the proposed method is sufficiently effective for the temporary extension of the structure's service life.

*Key words:* reinforcement technology, UHPC, draft, experiment

# Obsah

Úvod	9
<b>1 Cíle práce a metody řešení</b>	<b>10</b>
<b>2 Teoretická část</b>	<b>11</b>
2.1 Problematika koroze ocelových konstrukcí . . . . .	11
2.2 Materiály a technologie pro zesilování ocelových konstrukcí . . . . .	12
2.2.1 Zesilování pomocí příložek . . . . .	12
2.2.2 Zesilování výměnou-nahrazením prvku . . . . .	13
2.2.3 Zesilování redistribucí vnitřních sil . . . . .	14
2.2.4 Zesílení dodatečným předpínáním prvků . . . . .	14
2.2.5 UHPC . . . . .	17
<b>3 Most na trati Plzeň-Mladotice v km 1,548</b>	<b>18</b>
3.1 Základní údaje o mostu . . . . .	18
3.2 Korozní průzkum . . . . .	21
3.2.1 Pole nosníků . . . . .	21
3.2.2 Nadpodporové oblasti . . . . .	22
3.2.3 Spodní stavba . . . . .	23
3.2.4 Celkový stav objektu . . . . .	23
<b>4 Zvolená technologie a postup výstavby</b>	<b>24</b>
4.1 Návrh zesílení - zvolená technologie . . . . .	24
4.2 Technologický postup prací . . . . .	28
<b>5 Experimentální část</b>	<b>31</b>
5.1 Příprava zkušebních těles . . . . .	31
5.2 Typy prováděných zkoušek a používané přístroje . . . . .	36
5.2.1 Materiálové zkoušky . . . . .	37
5.2.2 Testovací protokol protlačovací zkoušky . . . . .	40
5.3 Metody pro vyhodnocení výsledků zkoušek . . . . .	41
5.3.1 DIC . . . . .	41
5.3.2 LVDTs . . . . .	44
5.4 Predikovaná smyková únosnost vzorku . . . . .	44
5.4.1 Predikovaná pevnost v tlaku UHPC . . . . .	44
5.4.2 Predikovaný modul pružnosti . . . . .	45
5.4.3 Příspěvek nýtů na smykovou únosnost . . . . .	46
5.4.4 Příspěvek PBL na smykovou únosnost . . . . .	47

5.5	Výsledky materiálových zkoušek . . . . .	50
5.5.1	Pevnost v tlaku . . . . .	50
5.5.2	Modul pružnosti . . . . .	52
5.6	Výsledky malé vzorky . . . . .	54
5.6.1	Zkušební vzorky - typ C . . . . .	54
5.6.2	Zkušební vzorky - typ B . . . . .	58
5.6.3	Zkušební vzorky - typ A . . . . .	63
5.7	Zhodnocení výsledků zkušebních vzorků A, B, C . . . . .	68
5.8	Experiment komplexního vzorku D . . . . .	69
<b>Závěr</b>		<b>73</b>
	Seznam obrázků . . . . .	73
<b>Seznam použitých zdrojů</b>		<b>77</b>
<b>Přílohy</b>		<b>79</b>
A	Technické listy - UHPC	79
B	Technické listy - drátky	82
C	Výkresy	84

# Seznam zkratek

<b>DIC</b>	Digital Image Correlation (Digitální korelace obrazu)
<b>GPa</b>	Gigapascal
<b>kN</b>	Kilonewton
<b>LVDT</b>	Linear Variable Differential Transformer
<b>MPa</b>	Megapascal
<b>N</b>	Newton
<b>NK</b>	Nosná konstrukce
<b>PBL</b>	Perfobond Leiste (typ smykového spojovacího prvku)
<b>SMA</b>	Shape Memory Alloy (slitina s tvarovou pamětí)
<b>UHPC</b>	Ultra-High Performance Concrete (ultra vysokohodnotný beton)
<b>UHPFRC</b>	Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete
<b>ŽB</b>	Železobeton

# Úvod

Mostní konstrukce, jako nedílná součást dopravní infrastruktury, procházejí v současné době velmi náročným obdobím. U řady mostů lze jejich stav zhodnotit jako špatný, velmi špatný až havarijní. Vzhledem k rozsahu problémů, které se v oblasti mostních staveb vyskytují, není reálné ani ekonomicky únosné přistoupit k plošné obnově všech mostů nacházejících se v nevyhovujícím technickém stavu. Komplexní rekonstrukce nebo výstavba nových mostů je časově náročná, technologicky komplikovaná a vyžaduje značné finanční prostředky, které v mnoha případech nejsou k dispozici. Proto je nutné hledat alternativní a efektivnější způsoby zachování a prodloužení životnosti stávajících mostních konstrukcí.

V této práci se budeme zabývat různými technologiemi a materiály pro zesílení ocelových konstrukcí, přičemž se zaměříme na nadpodporové oblasti mostní konstrukce železničního trámového mostu na trati Plzeň–Mladotice. Jedná se o nýtovaný most z roku 1898, na kterém v roce 2023 proběhl diagnostický a korozní průzkum. Na základě jeho výsledků bylo rozhodnuto o zesílení podporových oblastí nosníků pomocí UHPC, který vyniká vysokou pevností v tlaku a nadprůměrnou odolností vůči vnějším vlivům. Právě díky těmto vlastnostem je však technologie finančně náročná, a proto je nutné posoudit, zda je její použití ekonomicky výhodné.

Podrobný návrh zesílení a technologický postup prací nám umožní lépe porozumět principům této metody a zhodnotit její proveditelnost v konkrétních podmínkách dané konstrukce, zejména s ohledem na velmi omezený pracovní prostor, což představuje jednu z klíčových otázek této práce.

# Kapitola 1

## Cíle práce a metody řešení

Cílem této práce je experimentálně ověřit únosnost a proveditelnost zesilovací technologie spočívající v obetonování ocelové konstrukce, konkrétně nadpodporové oblasti nosníku, pomocí UHPC (Ultra-High Performance Concrete), a to pro účely rekonstrukce železničního mostu na trati Plzeň–Mladotice.

Východiskem návrhu byla data z diagnostického a korozního průzkumu, který vypracoval Ing. Jakub Štěpán. Na základě těchto podkladů vznikl návrh opravy, jehož koncept vizuálně zpracoval Ing. Ludvík Kolpaský, Ph.D. Jeho skica pak sloužila jako výchozí předloha pro návrh experimentálních vzorků.

Experimentální vzorky byly získány z dolní pásnice příhradového starého mostu v Plasech. Rozřezání konstrukce provedla firma Kovo Němeček na základě mnou připravené technické dokumentace. Dle této dokumentace byla rovněž objednána výztuž od firmy KONDOR, s.r.o. Následně jsme navrhli a vyrobili bednění, do kterého jsme vložili zkompletované vzorky.

S kompletací mi významně pomáhala Ing. Yasmina Boutar, Ph.D. Technickou podporu poskytl Ing. Michal Gschray, který nám nejen zajišťoval potřebné vybavení, ale také přispíval cennými návrhy a praktickými řešeními. Ing. Yasmina Boutar, Ph.D. se dále podílela na konzultacích ohledně predikovaných únosností, přípravě testovacího protokolu (jak z hlediska materiálových zkoušek, tak samotného hlavního experimentu), a rovněž poskytla odborné vedení při tvorbě výkresové dokumentace.

Připravené vzorky nám umožňují analyzovat vliv jednotlivých faktorů na celkovou únosnost spřaženého prvku, a to zejména s ohledem na příspěvek nýtů, technologie PBL (prostupy proložené výztuží, viz kap.4.1), styčné plochy mezi ocelovou stojinou a betonem. Cílem experimentální části je ověřit funkčnost navržené technologie zesílení, která konstrukčně co nejvěrněji odpovídá reálné situaci na mostě, a posoudit technickou i ekonomickou opodstatněnost jejího použití v podmínkách s výrazně omezeným pracovním prostorem.

# Kapitola 2

## Teoretická část

Dopravní infrastruktura, hlavně mostní konstrukce, postupně přechází do špatného, velmi špatného až havarijního stavu. Příčiny zhoršujícího se stavu mostních konstrukcí jsou různé – mezi hlavní faktory patří zejména výrazné navýšení dopravního zatížení, ke kterému došlo v průběhu posledních desetiletí. Mosty, navržené dle tehdejších standardů, nebyly na tak intenzivní nárůst dopravy dimenzovány. Dalším častým problémem je nekvalitní provedení konstrukčních detailů a spojů, což může vést k vytvoření ideálního prostředí pro vznik únavových trhlin nebo koroze.[1]

Při volbě konkrétního přístupu je nezbytné pečlivě zvažovat nejen finanční náklady, ale také technologickou proveditelnost, časovou náročnost prací a míru omezení dopravy. Každý most představuje specifickou konstrukční a provozní situaci, a proto vyžaduje individuální přístup při návrhu optimálního řešení.

Z dlouhodobého hlediska je rovněž důležité zaměřit se na zlepšení systému pravidelné diagnostiky mostních objektů a včasné provádění údržbových zásahů, které mohou významně prodloužit jejich životnost a snížit potřebu nákladných oprav či kompletní výměny. V následujících bodech se nejprve podrobně zaměříme na problematiku koroze a následně na jednotlivé technologie zesilování ocelových konstrukcí.[2]

### 2.1 Problematika koroze ocelových konstrukcí

Koroze je nežádoucí proces postupného a samovolného rozrušování materiálů na základě chemické či elektrochemické reakce s prostředím, ve kterém se materiál nachází. O chemickou reakci se jedná v případě vysokoteplotní oxidace kovů, která je známá také jako opal. Odolnost materiálu vůči tomuto jevu nazýváme žáruvzdornost. Oproti tomu u elektrochemické koroze je k průběhu reakce zapotřebí elektrolytu, jako je kapalná voda nebo atmosférická vlhkost. Dlouhodobé působení korozních vlivů, zejména v kombinaci s nedostatečnou údržbou a ochranou konstrukčních prvků, má za následek oslabení prvků ocelové konstrukce, zvýšení namáhání průřezu, možné přerozdělení sil v konstrukci a znehodnocení užitečných vlastností materiálu. Rozlišujeme korozi plošnou a lokální. Pokud je konstrukce postižena plošnou korozí, konstrukce sice vykazuje nižší únosnost, ale chování konstrukce odpovídá korozně neoslabené konstrukci. Takovému poškození by se dalo jednoduše zabránit včasnou

obnovou protikorozičních ochranných nátěrů. Oproti tomu u lokalizovaných korozičních jevů (důlková, štěrbinová, galvanická) je o více než 50% větší pravděpodobnost, že část konstrukce dosáhne únosnosti vlivem lokální ztráty stability. [1] [3]

V případě lokálního prokorození konstrukce či jiného zásadního prvku je nutné přistoupit k důkladnější opravě, která zajistí obnovu statické funkce daného prvku.

## 2.2 Materiály a technologie pro zesilování ocelových konstrukcí

V souladu s teorií uvedenou v publikaci "*Metody pro zajištění udržitelnosti ocelových mostních konstrukcí industriálního kulturního dědictví*"[2] lze metody zesilování rozdělit na ty, jejichž cílem je zvýšení statické únosnosti, a na metody zaměřené na prodloužení únavové životnosti konstrukce. Ačkoli zesílením může dojít ke zlepšení obou parametrů, postupy provádění se v závislosti na cíli liší.

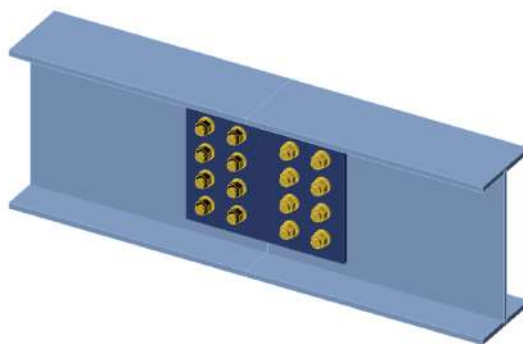
Při návrhu zesilování je třeba zohlednit proveditelnost zásahu, jeho spolehlivost, plánovanou životnost zesílení, rozsah zásahu do konstrukce a také případný konflikt s památkovou hodnotou objektu. Vzhledem k ekonomické i technické náročnosti oprav dosluhujících konstrukcí je často vhodné provést pouze lokální zesílení kritických prvků. Nejefektivnější opravy lze navrhnout na základě důkladného diagnostického průzkumu celé stavby, tedy jak nosné konstrukce, tak spodní stavby. Je třeba si uvědomit, že poruchy a vady ve spodní stavbě mohou způsobit opětovné poškození opravené nosné části konstrukce.

Při provádění kterékoliv z technologií je nutné konstrukci očistit, otryskat a připravit vhodné podmínky pro provedení technologie.

### 2.2.1 Zesilování pomocí příložek

Zesílení pomocí příložek můžeme provést pomocí svařování, šroubování i nýtování. Technologie se vyznačuje minimálním zásahem do konstrukce, variabilitou provedení, dostupností požadovaných materiálů a reverzibilitou. Svařování je považováno za ekonomicky nejvýhodnější volbu, za předpokladu svařitelnosti materiálu konstrukce. Nýtování můžeme využít u historicky chráněných konstrukcí a tím zachováme vzhled i ráz konstrukce. Naopak šroubování může ulehčit práci, protože nepotřebuje speciálně vyškolené pracovníky. V obou případech se ale stále musí dbát na vysokou kvalitu zpracování z důvodu možnosti vzniku štěrbinové koroze.

Na co si musíme při zvolení technologie dát pozor, je materiálová kompatibilita původní konstrukce a nové příložky. Chemická odlišnost historické a dnešní oceli může zapříčinit vznik galvanické koroze v důsledku interakce dvou různých kovů. "Příložkování" je vhodné jak pro tažené, tak tlačené prvky konstrukce. [2]



Obrázek 2.1: Oboustranná příložka šroubovaná[4]

### 2.2.2 Zesilování výměnou-nahrazením prvku

Po provedení podrobné statické analýzy celé konstrukce je možné přikročit k radikálnější technologii výměny prvku, pokud není možné tento prvek zesílit ani jinak zachovat. Při nahrazování konstrukčního prvku je nezbytné dodržet přesnou geometrii, správné umístění a odpovídající materiálové vlastnosti. Jakákoli nepřesnost v těchto parametrech může vést k nežádoucímu přerozdělení vnitřních sil v konstrukci a v důsledku toho způsobit neočekávané poruchy či vady v relativně krátkém časovém horizontu.

Tento postup se velmi často praktikuje u styčniců dolní pásnice příhradových konstrukcí, jako můžeme vidět na obr.2.2 . Koróze nejvíc napadá vodorovné plechy styčniců, kde se drží vlhkost a nečistoty, ale také na krčných úhelnících jednotlivých prutů.

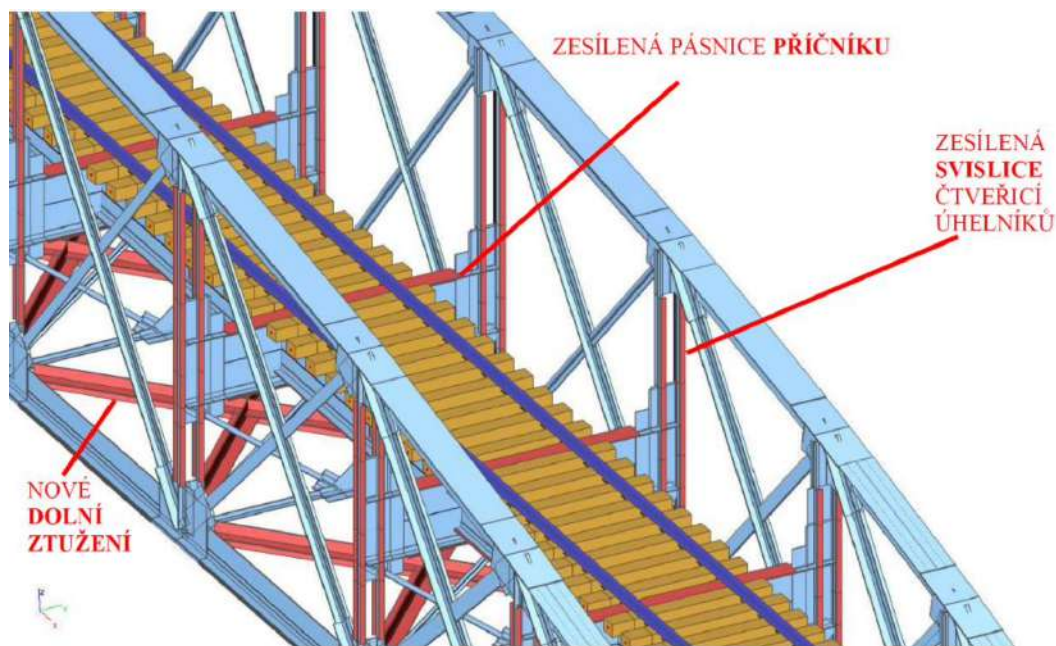
Tato technologie bývá technologicky náročná, zejména pokud se jedná o konstrukci nýtovanou. Využití nachází hlavně u historických konstrukcí, kde záleží na zachování rázu konstrukce, ačkoliv zásah do konstrukce je veliký a reverzibilita prakticky nezajistitelná. Dalším negativem je potřeba práce provádět za dočasného omezení provozu na mostě a současně vyšší ekonomická náročnost. [2]



Obrázek 2.2: Příklad opraveného nýtovaného styčnicu[2]

### 2.2.3 Zesilování redistribucí vnitřních sil

Na rozdíl od nežádoucí redistribuce sil v případě výměny prvku, u této metody je principem zajistit cílené přerozdělení vnitřních sil z nejnamáhanějších nebo oslabených prvků do zbytku nosné konstrukce pomocí připojení jednoho či více prvků. Schéma konstrukce níže, viz. obr.2.3 demonstruje zásah do konstrukce doplněním brzdného ztužení do úrovně mostovky pro zachycení a přerozdělení účinků zatížení ve vodorovném směru. Především u historických konstrukcí ztužení proti účinkům vodorovných sil, například vítr nebo brzdné síly, často zcela chybí. Stejně jako u předchozí technologie je nutností vypracovat podrobnou statickou analýzu chování konstrukce po připojení nového prvku. Zásah je pracný, ekonomicky náročný a obtížně reverzibilní, proto bychom k této technologii měli přistupovat v krajních případech.



Obrázek 2.3: Schéma brzdného ztužení[2]

### 2.2.4 Zesílení dodatečným předpínáním prvků

Pro technologii dodatečného předpínání používáme ocelová táhla nebo předpínací lana. Efektivně a okamžitě vnesou předpětí do konstrukce a tím zajistí účinek zesílení i proti stálému zatížení. Nevýhodou je vnášení velkých sil od kotevní oblasti předpětí do již oslabené konstrukce. Zároveň je technologie vystavena povětrnostním vlivům, což může vést ke korozi a dalšímu oslabení konstrukce nebo i poškození v důsledku požáru pod mostní konstrukcí. Dodatečně můžeme předpínat i moderními materiály jako uhlíkové kompozity nebo slitiny s tvarovou pamětí.

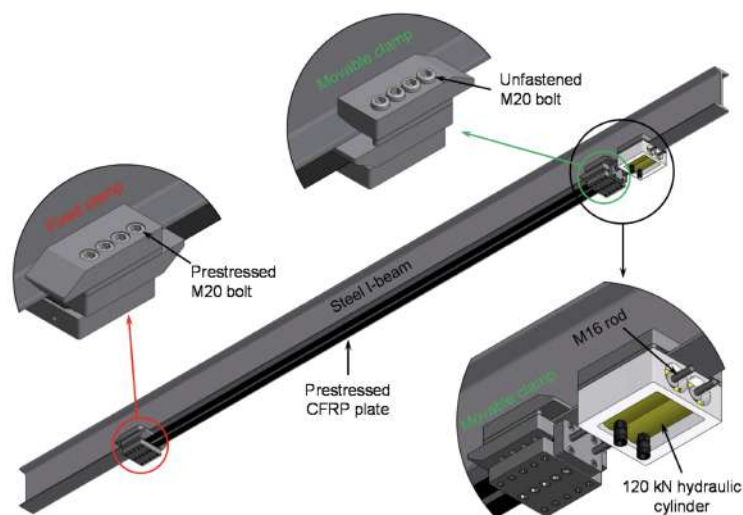
## Uhlíkové kompozity

Uhlíkové kompozity - Carbon fibre reinforced polymer - CFRP jsou materiály s velmi vysokou tahovou pevností. Můžeme je aplikovat metodou lepení nebo dodatečného předpínání. Metoda lepení je velmi tvarově variabilní, je možnost pracovat s orientací vláken, významně zvyšuje únavovou životnost prvku a může být kdykoli odstraněna a nahrazena jinou metodou zesilování. Příklad můžeme vidět na obr.2.4. Nevýhodami technologie je náročnost přípravy a správného provedení technologie, aby dosahovala požadované kvality.



Obrázek 2.4: Detail zesílení lepenou lamelou CFRP[2]

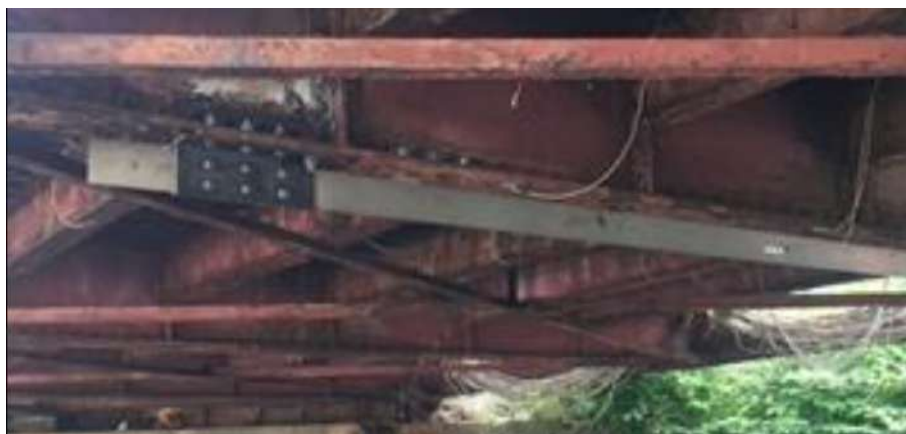
Schéma na obr.2.5 nám ilustruje použití CFRP lamely jako technologie pro dodatečné předpínání. V tomto případě můžeme pozorovat okamžité a výrazné zvýšení únosnosti oproti lepení, kdy je nutné počkat na zatvrdnutí lepidla. Výhodou oproti lepení je taky efektivnější využití pevnosti materiálu. Nevýhodou je nekompatibilita s konstrukční ocelí z důvodu rozdílného chemického složení a velmi rozdílné tepelné roztažnosti. V neposlední řadě je třeba zmínit chování za vysokých teplot, kdy dochází k neúměrné degradaci a při vystavení CFRP teplotám vyšším než 400 stupňů dochází k úniku toxických plynů.



Obrázek 2.5: Detail zesílení dodatečným předpínáním lamelou CFRP[5]

### Slitiny s tvarovou pamětí

Slitiny s tvarovou pamětí, tzv. SMA (Shape Memory Alloy) fungují na principu obnovení svého původního tvaru či napětového stavu v důsledku aktivačního zahřátí. Zjednodušeně řečeno vyrobíme slitinu, přichytíme ji na konstrukci určenou k zesílení, ohřejeme na aktivační teplotu, kdy dojde k značnému přetvoření (prodloužení prvku), zakotvíme a při přirozeném ochlazení se materiál snaží obnovit svůj původní tvar, čímž postupně vnáší do konstrukce předpětí. Výhodou této metody je možnost aplikace zesílení a předpínání i ve stísněných prostorech, typických pro komplikované konstrukční systémy historických mostů. Díky minimálním zásahům je zachován původní vzhled i památková hodnota konstrukce. Výhodou je také jednoduché kotvení bez nutnosti komplexních systémů a velmi podobné materiálové vlastnosti s konstrukční ocelí, včetně vysoké teplotní odolnosti ve srovnání s prvky CFRP. Mezi nevýhody patří omezené zkušenosti s realizací i dlouhodobým chováním v reálném provozu, a vysoká pořizovací cena materiálu.



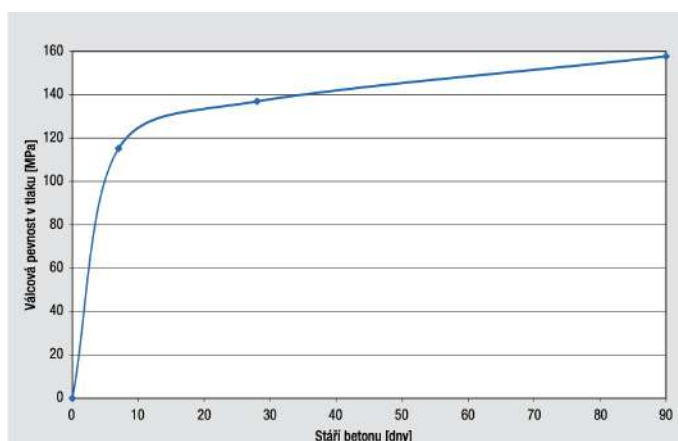
Obrázek 2.6: Detail SMA zesílení mostu v Petrově nad Desnou[2]

## 2.2.5 UHPC

Ke zpevnění nadpodporové oblasti nosníku budeme využívat materiál UHPFRC - ultra-high performance fibre reinforced concrete (ultravysokohodnotný beton vyztužený vlákny), dále jen UHPC. Materiál se vyznačuje větším množstvím silikátového hydraulického pojiva - nejčastěji cementu (obvykle 700 až 1 000 kg/m<sup>3</sup>), dále obsahuje drobné kamenivo (1-8mm), mikroplniva, latentně hydraulické příměsi (případně inertní příměsi), chemické přísady a vodu. K dosažení potřebné pevnosti, 110 MPa a více, je nutné minimalizovat vodní součinitel, ideálně pod hodnotu 0,25. Množství vody odpovídající této hodnotě nestačí ani na hydrataci veškerého cementu míchaného do vzorku - nezhydratované části cementu pak působí jako jemné kamenivo. Aby směs byla dobře zpracovatelná, použijeme účinných plastifikátorů na bázi polykarboxylátů. [6][7]

Je důležité zmínit, že aplikace UHPC betonů by měla mít nějakou výraznou výhodu, například ekonomickou, nebo nemožnost užití stávající technologie a pod.[6][7]

Důležitou vlastností UHPC je rychlý nárůst pevnosti a samozhutnitelnost, neboli schopnost tečení bez působení dynamických sil, což je klíčová vlastnost pro realizaci technologie vzhledem k omezenému prostoru pro provádění. Není tedy nutné využívat ponorné ani příložné vibrátory. [6] Výrazně rychlý nárůst pevnosti UHPC v prvních dnech po betonáži potvrzuje graf uvedený v publikaci Vítek a Coufal (2021), kde je zaznamenána pevnost přesahující 100 MPa již po 7 dnech a další postupný růst i v 90 dnech . V daném případě byl beton ponechán k tvrdnutí za běžných podmínek, tedy bez tepelného ošetření, přesto byl po 90 dnech dosažen pevnostní standard typu UHPC. Autoři vědecké práce dále uvádějí, že na základě zkoušek různých vzorků (trámců i válců) se modul pružnosti pohyboval v rozmezí 49–54 GPa. Tyto hodnoty nadále použijeme k porovnání s našimi naměřenými daty uvedenými v kapitole 5.5. [8]



Obrázek 2.7: Graf růstu válcové pevnosti v závislosti na čase[8]

# Kapitola 3

## Most na trati Plzeň-Mladotice v km 1,548

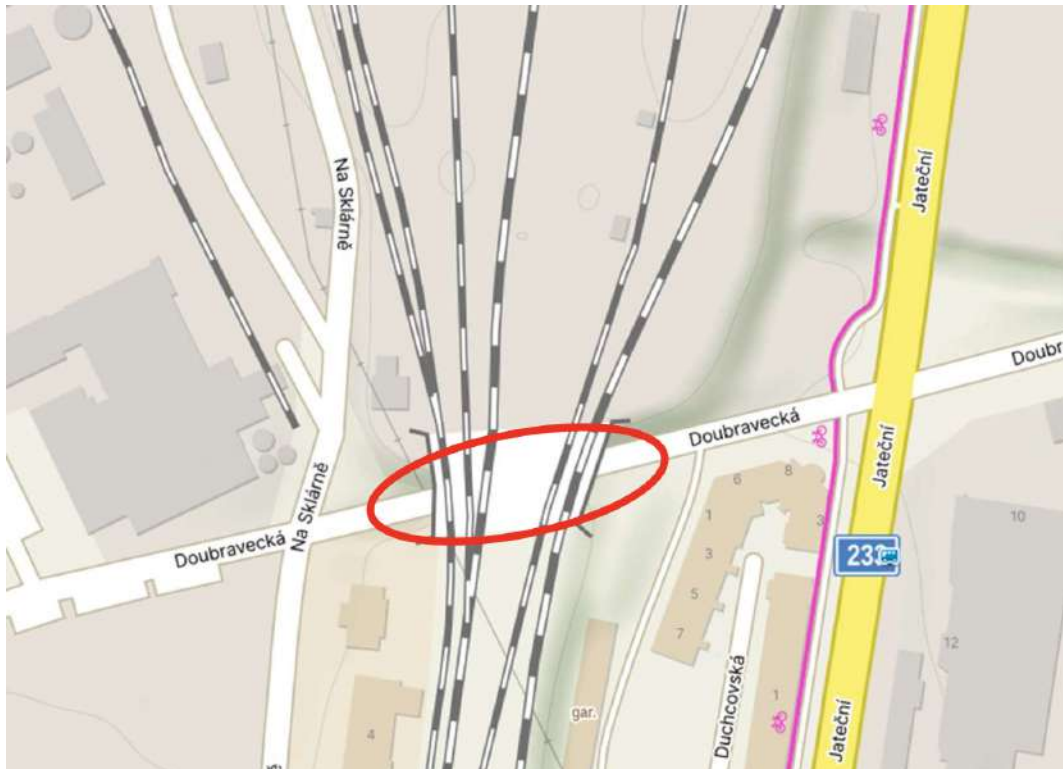
### 3.1 Základní údaje o mostu

Řešený objekt je trémový ocelový železniční most, o jednom poli s horní ortotropní mostovkou (typ ocelové vany). Most z roku 1898 slouží k překlenutí pozemní místní komunikace „Doubravecká“, která nespádá pod správu SŽ a komunikace pro pěší, která taktéž nespádá pod správu SŽ. Základní číselné informace jsme vypsali do tab.3.1 níže:

Délka přemostění:	9,32 m
Délka mostu:	16,70 m
Šikmost mostu:	60, šikmost pravá
Šířka mostu:	43,50 m
Výška mostu:	5,40 m
Rozpětí NK:	8,61 m
Nosná konstrukce:	ocelová nýtovaná, ŽB mostovka
Typ nosné konstrukce:	trémová, prosté nosníky
Počet otvorů:	1
Typ dle převáděné dopravy:	železniční most
Přemostovaná překážka:	pozemní komunikace
Traťový úsek:	TÚ 0501: Plzeň hl.n. - Mladotice
Dopravní úsek:	A1:ŽST Plzeň hl.n.-seř.n.
Evidenční km:	1,548
Počet kolejí:	7
Traťová třída zatížení:	C3
Rychlost na mostě/traťová:	65/85[km/h]

Tabulka 3.1: Identifikační údaje[9]

Pro lepší představu o prostoru objektu přikládám půdorysnou lokalitu mostu na obr.3.1 zároveň s ortotropním pohledem na obr.3.2. Obr.3.3 nám ukazuje podélný pohled na mostní konstrukci.



Obrázek 3.1: Lokalita mostu[9]

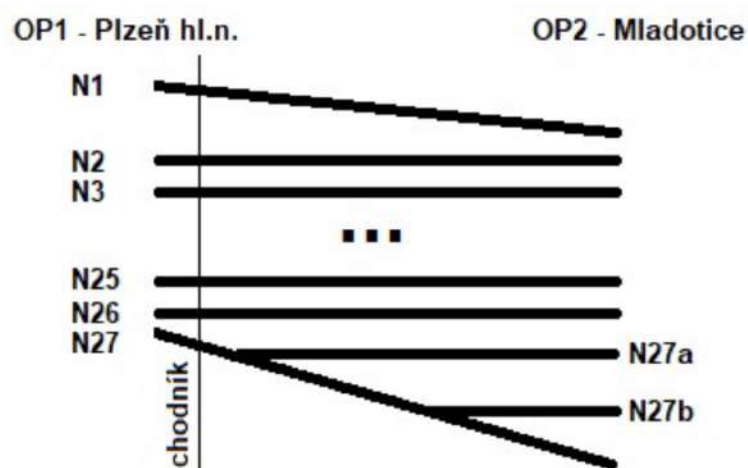


Obrázek 3.2: Ortomapa mostu[9]

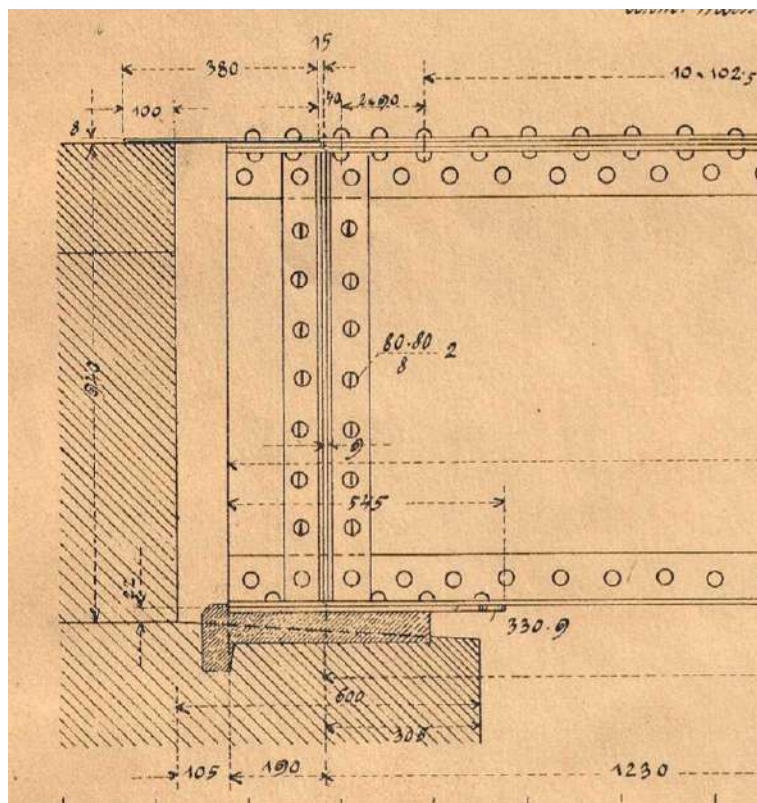


Obrázek 3.3: Pohled na most [9]

Schéma nosníků mostu na obr.3.4 nám vykresluje konstrukční systém mostu, tvořený 25 nosníky tvaru I kolmými na hlavní pole N2-N26, 2 šikmými nosníky N1 a N27. Na nosník N27 se dále napojují 2 nosníky N27a a N27b. Konkrétně se práce zabývá nadpodporovými oblastmi nosníků N2-N26. Výkres nadpodporové oblasti z archivní dokumentace přikládám na obr.3.5. Archivní dokumentace mostu je velmi zachovalá a odpovídá jeho současnému stavu. Obsahuje kompletní výkresy geometrie, včetně půdorysu, řezů a detailů hlavního nosníku, styčniců i odvodnění. Zachovány jsou také průřezy s jejich charakteristikami. Jedinou odlišností je chybějící příčné ztužení dolních pásnic. Detail se mohl změnit již při výstavbě nebo během rekonstrukce a oprav v roce 1998. [9]



Obrázek 3.4: Schéma nosníků mostu[9]



Obrázek 3.5: Část výkresu archivní dokumentace - nadpodporová oblast[9]

Nýtovaná konstrukce je z ocelových plnostěných nosníků tvaru I o stojině z plechu P10, výšky 940mm a pásnicemi z válcovaných rovnoramenných úhelníků L 100x100x12 mm s příložkou P9x330 mm. Nosníky jsou samostatně uložené na ložiska, posuvná ložiska na OP1 a pevná ložiska na OP2. Příčné ztužení mostu zajišťují malé nýtované nosníky tvaru I, výšky 290 mm a tloušťkou stěny 9 mm a pásnicemi z válcovaných rovnoramenných úhelníků L 70x70x8 mm.

## 3.2 Korozní průzkum

Diagnostický a korozní průzkum proběhl v období od října do listopadu 2024. Byly odebrány vzorky oceli z hlavních nosníků a betonové jádrové vrty z opěr, které byly analyzovány v materiálové laboratoři ČVUT v Praze. Následně byla provedena podrobná kontrola ocelové konstrukce, včetně nedestruktivních zkoušek, ověření geometrie, zjištění korozního oslabení a identifikace případných poruch, jako jsou deformace či poškození nosníků.

### 3.2.1 Pole nosníků

Nosníky v poli jsou převážně postiženy deformací dolní pásnice a korozí od zanesených nečistot (prach, zbytky betonu, uhlí, kamenů, dřeva na dolních pásnicích). Poruchy byly evidovány u 13 nosníků z 27. Místy byly zjištěny lokální poruchy, jako

jsou vytrženy části plechu pásnice, vrypy způsobené průjezdem nákladních vozidel nebo hloubková koroze odvodňovací trubičky - průřez okolo zcela zasažený korozi s výraznými korozními úbytky. Nýty lokálně nahrazené vysokopevnostními šrouby.



Obrázek 3.6: Degradace nosníků v poli

### 3.2.2 Nadpodporové oblasti

Na řešeném trémovém mostě se nachází 50 nadpodporových oblastí přímých nosníků. Z toho 39 oblastí je hloubkově prokorodováno nebo vykazuje důlkovitý charakter korozního oslabení a v mnoha případech dolní pásnice naprosto chybí. Nosník je pak v kontaktu s ložiskem (betonem) pouze přes stojinu nosníku. Dále bylo evidováno korozní oslabení i na horní pásnici nosníku N2 v oblasti podpory, postižený je plech, krční úhelníky i část puklovky. Ložiska jsou obecně ve špatném technickém stavu. Jsou zasaženy hloubkovou korozi a degradací základního materiálu, ložiskové desky jsou oslabené. Poddajné části zajišťující posun jsou zcela zanesené a jejich správná funkčnost v navrženém rozsahu není pravděpodobná. Jednotlivé poruchy můžeme vidět na následujících fotografiích z vizuální prohlídky mostu.



Obrázek 3.7: Degradace nosníků v podporové oblasti

### 3.2.3 Spodní stavba

Spodní stavba vykazuje řadu vad a poruch související s průsakem vody konstrukcí a degradací betonu a zdiva. Jižní opěra 01 obsahuje patrné průsaky vody, spárování je místy popraskané, vypadlé nebo uvolněné. Kamenné zdivo mezi 1. a 3. nosníkem je rozvolněné. Úložný betonový práh ve stejných místech je silně degradovaný až vydrolený do hloubky 60 mm téměř po celé výšce prahu. Beton v místě ložisek 1. 2. a 3. vykazuje degradaci do hloubky 60 mm. Degradace je pravděpodobně způsobena napadaným štěrkem na horní ploše prahu. Severní opěra 02 taktéž obsahuje patrné průsaky vody, poruchy spárování a uvolněné kamenné zdivo. Nejvíce je postižena oblast mezi 2. až 4. nosníkem, kde jsou kameny vysunuty až o 100 mm. Zároveň je evidována 3 mm široká svislá trhlinka. Povrchová úprava po celé opěře je utržená díky degradaci a průsakům vody. Horní plocha prahu je také zanesená napadaným štěrkem. Dříky i křídly opěr prosakuje voda, nesou poruchy spárování a méně rozsáhlých trhlin.



Obrázek 3.8: Degradace opěr

### 3.2.4 Celkový stav objektu

Mezi zásadní vady hlavní nosné konstrukce patří výrazná deformace dolních pásnic nosníků, pokročilá koroze v nadpodporových oblastech a špatný technický stav obou opěr. Železniční svršek a mostní vybavení jsou celkově v dobrém stavu.

# Kapitola 4

## Zvolená technologie a postup výstavby

Oprava železničního trémového mostu na trati Plzeň–Mladotice je plánována na rok 2026. V následujících řádcích bude popsána technologie, která bude při opravách použita, a zároveň budou uvedeny její výhody, nevýhody a rizikové body, na které si realizační tým bude muset dát pozor.

### 4.1 Návrh zesílení - zvolená technologie

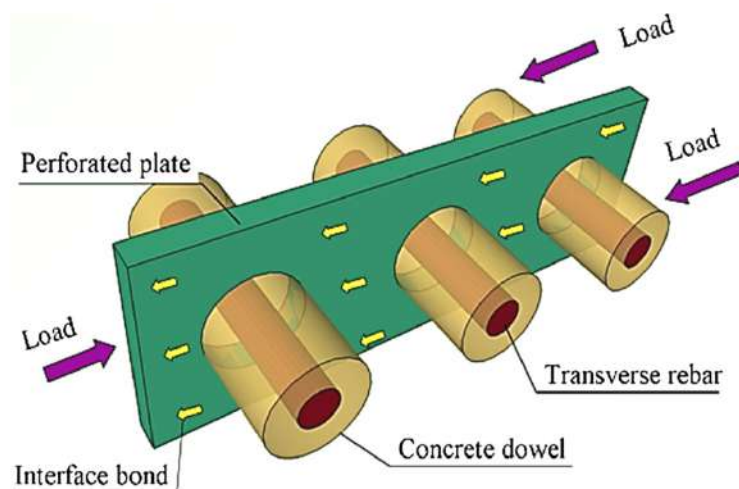
Zvolená metoda opravy využívá zesílení ocelových plnostěnných nosníků tvaru I pomocí ultra vysokopevnostního betonu (UHPC), jehož vlastnosti byly podrobněji představeny v kapitole **Materiály a technologie pro zesilování ocelových konstrukcí**. UHPC je v tomto případě použito jako dočasné řešení problémových oblastí ocelového mostu, kde je potřeba rychle a výrazně zlepšit bodové vlastnosti. Tato technologie nám umožňuje efektivně a okamžitě posílit kritická místa konstrukce, nadpodporové oblasti jsou namáhané převážně tlakem, kde materiál s pevností v tlaku až 120 MPa nachází optimální uplatnění.

Spřažení těchto dvou materiálů zajistíme pomocí výztužných prutů (roxorů) procházejících vyřezanými prostupy v nosníku, . Výztužné pruty volíme o průměru 12 mm. Spřažení podporují také nýty tvořící nerovnost povrchu stojiny nosníku, styčná plocha materiálů a dále beton procházející postupem v nosníku kolem výztužného prutu.

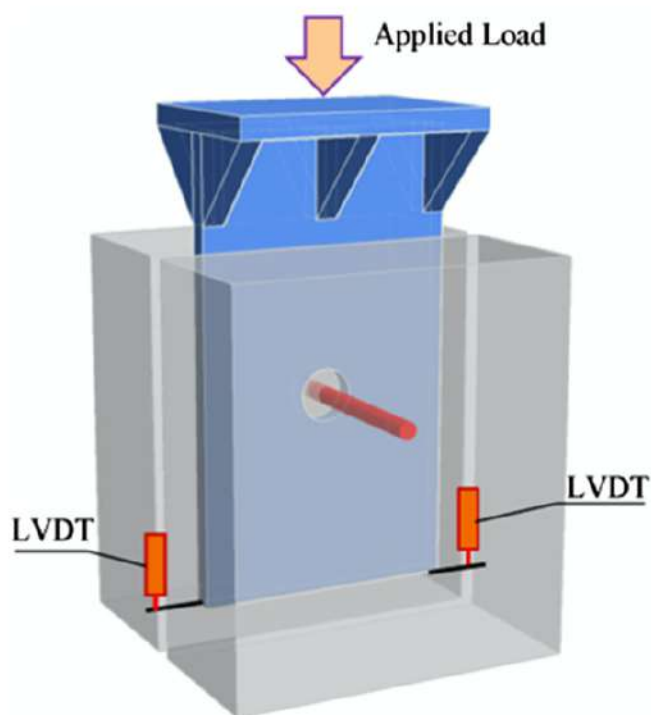
#### Technologie PBL

Technologie PBL – Perfobond strip connectors je metoda sloužící k vytvoření spřažení mezi ocelovým nosníkem a obetonováním, v našem případě pomocí UHPC. Podle vědeckého výzkumu [10] zároveň přispívá ke zvýšení smykové únosnosti. Tato technologie se realizuje vytvořením otvorů (prostupů) do ocelového nosníku, přičemž otvory jsou větší než výztužné pruty, které jimi následně procházejí. Po betonáži se

kolem výztužných prutů vytvoří betonové válečky, které rovněž přispívají k celkové smykové únosnosti. Kombinací třecí síly na rozhraní oceli a betonu, účinku výztužného prutu a betonového válečku vzniká technologie, kterou označujeme jako PBL.



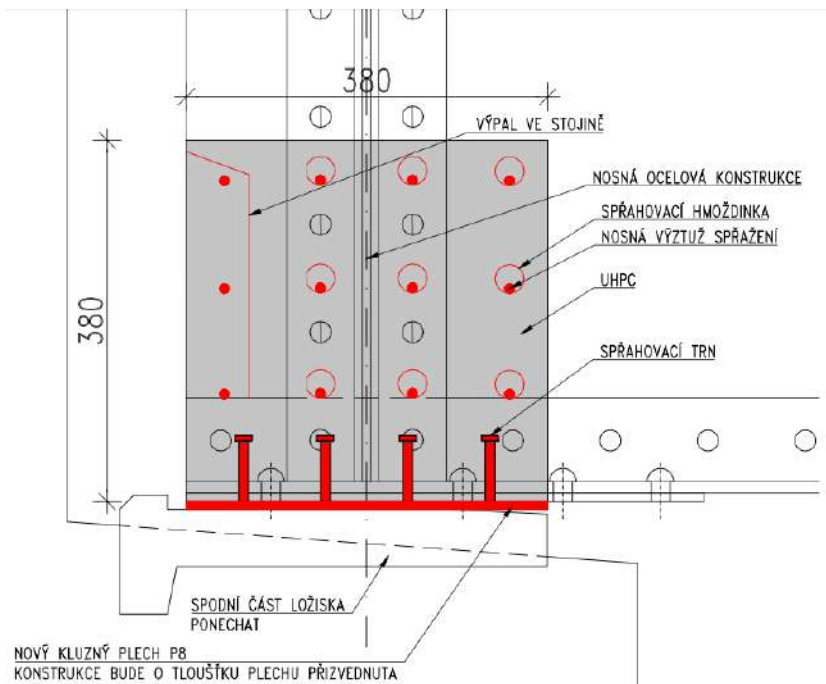
Obrázek 4.1: Schéma tehcnologie PBL



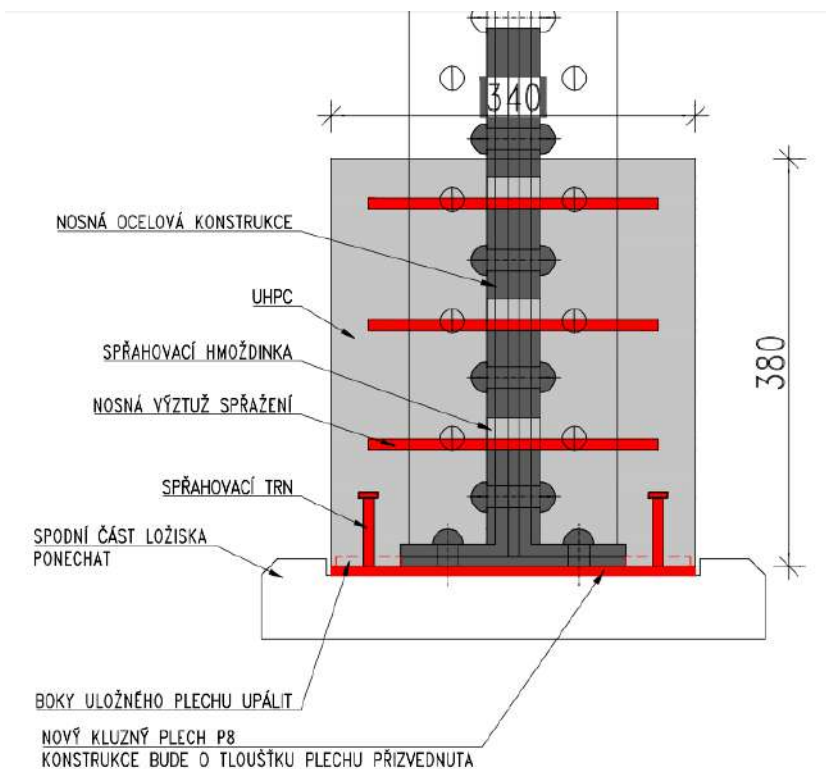
Obrázek 4.2: Ilustrace použití technologie PBL na vzorku

Vzhledem k značnému poškození dolní pásnice nadpodporové oblasti, podrobněji popsané v kapitole 3.2 se provede odříznutí zbytku dolní pásnice a nahradí se plechem P8 se spřahovacími trny, které taktéž pomáhají k spřažení technologie. Plech

bude zároveň sloužit jako dolní díl bednění pro betonáž UHPC. Schéma níže, viz. obr.4.3 a obr.4.4 , ilustruje umístění plechu, spřáhovacích trnů, výztuže procházející nosníkem a konstrukční výztuže.



Obrázek 4.3: Schéma návrhu technologie - podélný řez



Obrázek 4.4: Schéma návrhu technologie - příčný řez

Abychom co nejlépe přiblížili, čeho chceme při realizaci dosáhnout, přikládáme fotografii téměř identického detailu.



Obrázek 4.5: Příklad technologie [11]

Správná volba technologie je zásadní – je nutné zvažovat ekonomické a technologické aspekty a zároveň přistupovat ke každé situaci individuálně, s cílem navrhnout co nejvhodnější řešení. V následujících bodech shrnu několik důvodů, proč byla volba této technologie v našem případě vhodná.

- Zvýšená odolnost: Nízká propustnost a vysoká odolnost UHPC proti cyklům zmrazování a tání výrazně snižují další korozi a riziko dodatečné ztráty průřezu nosníku. Běžná opravná řešení těchto výsledků dosáhnout nemohou.
- Provádění v praxi: Oprava neobsahuje žádné složité postupy, naopak využívá jednodušších variant jako tesařského bednění a vázání výztuže.
- Minimální dopad na uživatele: Dopad na koncové uživatele je minimální díky omezené potřebě technického zázemí na staveništi a kratší době opravy, což zároveň snižuje potřebu uzavírek jízdnic pruhů.
- Univerzálnost opravy: Tato strategie opravy je snadno přizpůsobitelná různým podmínkám na místě, včetně mostů se složitou geometrií a projektů s omezeným přístupem k místu opravy. Takové podmínky jsou běžné u mostů s různým sklonem či úhlem natočení.
- Nízké nároky na údržbu: Tato metoda opravy může být při správném návrhu a provedení prakticky bezúdržbová.

## 4.2 Technologický postup prací

V rámci realizace je nutné si uvědomit, že pracujeme se starým nýtovaným mostem, což ovlivňuje celou řadu parametrů. Chemické složení tehdejší oceli může zásadně ovlivnit její svařitelnost, přičemž samotné svařování vyvolává reziduální napětí v konstrukci. Proces roznýtování je navíc velmi náročný a časově zdlouhavý. Vzhledem k stísněným prostorům je potřeba počítat s časovou rezervou u všech prováděných prací. Rekonstrukce bude probíhat za omezeného provozu na mostě. V rámci jednoho pracovního záběru se bude vždy opravovat přibližně pět nosníků, pro které bude nutné zajistit podepření pomocí stojek a zřídit lešení umožňující přístup k podporové oblasti nosníků.

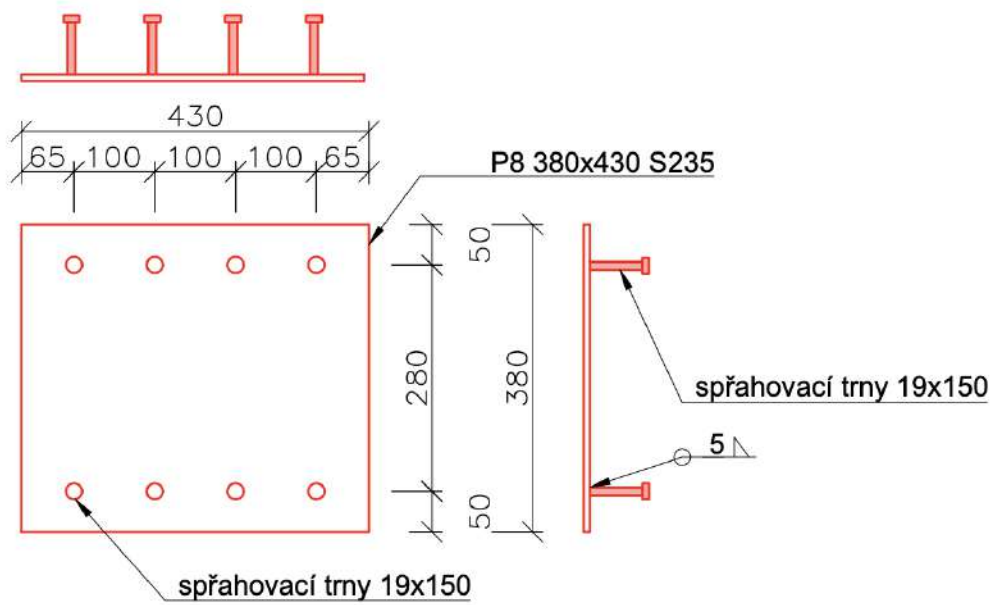
Prvním krokem bude odříznutí dolní pásnice a zaříznutí zadní části stojiny, viz obr. 4.3. Zároveň proběhne zaměření a provedení prostupů skrz stojinu pro vedení výztužných prutů. Pro lepší představu budu přikládat fotografie hlavního vzorku, který se nejvíce podobá nadpodporové oblasti nosníku - viz. obr.4.6 Prostupy jsou navrženy kruhového tvaru a mají průměr 25 mm.



Obrázek 4.6: Fotografie hlavního vzorku D - po vytvoření prostupů a odříznutí zadní části stojiny

Před dalšími pracemi bude provedeno otryskání, opískování a potřebné nové nátěry na celé ploše nosníků i ztužení. -prodloužit

Po provedení řezů bude povrch ložiska, respektive betonu, podroben sanačním pracím a připraven na vložení ocelového plechu se spřahovacími trny, viz schéma níže obr.4.7 , který bude následně zasunut a usazen do správné polohy.



Obrázek 4.7: Schéma pro výrobu plechu P8 s výztužnými trny

Po vsunutí plechu vyvážíme výztužné pruty procházející stojinou nosníku a potřebnou konstrukční výztuž, viz. obr.



Obrázek 4.8: Hlavní vzorek s výztužnými pruty

Následně bude sestaveno bednění "objímající" nadpodporovou oblast nosníku. Je možnost zvolit bednění z ohýbaného plechu, my jsme ale zvolili tesařské bednění, které se bude dělat až na staveništi, tzv. na míru pro každý nosník. Pro ilustraci přikládám fotografii bednění s hlavním vzorkem níže. Při realizaci nebudou bednění úplně identická jako na obr.4.9, musíme si představit, že zadní hrana vzorku je v realitě průběžná strana nosníku. V tomto bodě bude bednění přerušeno a na styku se stojinou ocelového nosníku bude detail zatmelen nebo zasilikonován z důvodu zamezení protečení betonového mléka. Stejný detail musí být vyřešen na styku bednění a ocelového plechu, kde zároveň hrozí "vyplavání bednění" díky vysoké objemové hmotnosti UHPC. Daný problém je možné řešit pomocí ocelových úhelníků kotvených k ocelovému plechu a bednění.



Obrázek 4.9: Bednění s hlavním vzorkem

Při betonáži takto malého množství UHPC v rámci jednoho záběru je velmi neefektivní dovážet namíchané UHPC z betonárky. Ať už z důvodu zkrácené doby zpracovatelnosti oproti běžnému betonu nebo vzhledem ke stísněným prostorovým podmínkám, kdy nebude reálné betonovat čerpáním přes potrubí díky vysoké hustotě materiálu. Vhodnějším řešením se proto jeví využití suché směsi UHPC od ověřeného výrobce a její příprava přímo na staveništi. Takto připravená směs může být následně ukládána do bednění ručně. Při zpracování UHPC betonu je nutné postupovat rychle a začít ošetřovat povrch betonu co nejdříve, aby se zabránilo odpařování vody a tvorbě povrchových trhlin.

Důležité je také provádět betonáž současně z obou stran nosníku, neboť vysoká viskozita UHPC neumožňuje směsi samovolně přetéct na opačnou stranu. Pokud by byla směs ukládána pouze jednostranně, mohlo by dojít k nerovnoměrnému zatížení a vzniku značného napětí na stojinu nosníku, což je nežádoucí zejména u již oslabené konstrukce.

Povrchová úprava je standardní součástí každé betonáže, přestože v tomto případě není kladen důraz na vzhled betonu. Odstraníme bednění a beton ještě potřebnou dobu ošetřujeme. V době tuhnutí betonové směsi se již můžeme připravovat na další záběr oprav.

# Kapitola 5

## Experimentální část

V experimentální části této práce se zaměříme na praktickou přípravu zkušebních těles, popíšeme provedené zkoušky a technologie použité pro získání výsledných hodnot deformací a kritických zatížení vedoucích k destrukci vzorku. Dále představíme výpočetní postup pro predikci únosnosti jednotlivých typů vzorků a následně prezentujeme dosažené výsledky.

### 5.1 Příprava zkušebních těles

Příprava vzorků je důležitá součást přípravy celého experimentu. Volba vzorků může radikálně ovlivnit výsledky experimentu a posouzení similarity vůči našemu reálnému použití. Abychom co nejlépe napodobili vlastnosti konstrukce mostu na trati Plzeň–Mladotice, zvolili jsme starou konstrukci již demontovaného mostu, ze které jsme použili dolní pásnici příhradové konstrukce. Z obrázku níže je patrné, že některé části byly již využity při předchozích zkouškách.



Obrázek 5.1: Dolní pásnice demontované příhradové konstrukce

V rámci experimentu jsme se rozhodli pro zhotovení jednoho většího komplexního vzorku typu D, který nejvíce odpovídá skutečnému stavu mostu na trati Plzeň–Mladotice a devět menších vzorků, které nám pomohou determinovat příspěvky od nýtů a technologie PBL k spřažení konstrukce nebo celkové únosnosti zkušebních těles. Výčet typů vzorků:

- 1 x Komplexní vzorek typu D - s nýty i prostupy pro příčnou výztuž
- 3 x Malý vzorek typu A - pouze nýty
- 3 x Malý vzorek typu B- bez nýtů s použitím technologie PBL
- 3 x Malý vzorek typu C- s nýty a použitím technologie PBL

Vybraná část konstrukce pro zkušební těleso typu D je znázorněna na obr. 5.2, pro malá zkušební tělesa typu A viz. obr. 5.3 a pro malá zkušební tělesa typu B a C viz. obr. 5.4



Obrázek 5.2: Část konstrukce zvolená pro vzorek typu D



Obrázek 5.3: Část konstrukce zvolená pro vzorek typu A



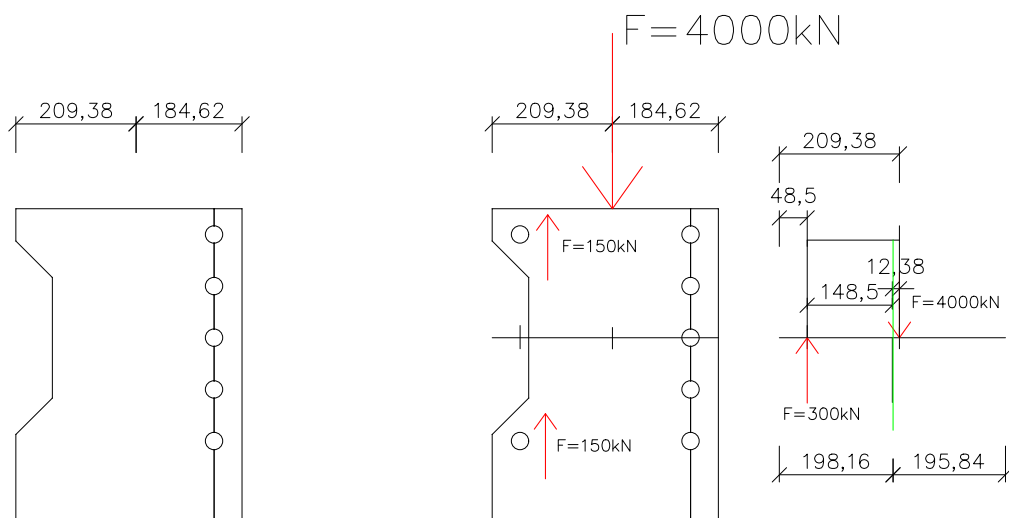
Obrázek 5.4: Část konstrukce zvolená pro vzorek typu B a C

Výkresy, viz. Příloha C, slouží jako podklad pro oceláře k vyřezání vzorků ze staré konstrukce, následnému otryskání a vytvoření prostupů v rámci technologie PBL.

### **Excentricita zatížení**

Malá zkušební tělesa jsou stejných rozměrů a jsou symetrické z důvodu vyloučení excentrické reakce při tlakové zkoušce, čímž se vyhneme nechtěnému otočení vzorku. V našem případě také musíme odříznout klobouček nýtů na horní pásnici, pokud bychom je ponechaly, břemeno by sílu převádělo převážně do bodů nýtů, což by

způsobilo možný kolaps horní pásnice na ohyb v příčném směru. Pro vzorek typu D, který nemá symetrický tvar, bylo potřeba dopočítat těžiště pro zatěžování. Posun zatěžovací síly řešíme pouze ve směru stojiny nosníku. Na levé části schématu (viz obr. 5.5) je patrný nesymetrický obrys stojiny a pouze jednostranné umístění prostupů. Výpočtem těžiště této nepravidelné geometrie jsme dospěli k závěru, že zatížení by mělo být orientováno přibližně 1,5 cm na opačnou stranu vůči výřezu. Natočení nebo nenatočení vzorku však ovlivňuje také rozmístění nýtů, jejichž příspěvek ke smykové tuhosti je podrobněji rozveden v kapitole Predikovaná únosnost. Vzhledem k zahrnutí nesymetrického rozložení nýtů do výpočtu vychází výsledné zatížení přibližně do středu soustavy.



Obrázek 5.5: Výpočet excentricity zatěžovací síly na zkušební těleso typu D

Vzorky byly nařezány, připravili jsme bednění, viz obr.5.6 a postupně jsme vyztužili vzorky výztužnými pruty  $\varnothing 12$  mm v rámci technologie PBL v ocelovém vzorku. U všech vzorků jsme zároveň navrhli konstrukční výztuž v podobě třmínek  $\varnothing 10$  mm. Výkres návrhu výztuže viz. Příloha C. Jakmile jsou všechny vzorky sestaveny, může být zahájena betonáž.



Obrázek 5.6: Připravené bednění pro zkušební tělesa

Za běžných podmínek by měly být vzorky ponechány k vyzrání po dobu 28 dnů, avšak z důvodu časové tísně byly zkoušky provedeny po 18 dnech. Vzhledem k rychlému nárůstu pevnosti u UHPC, který byl podrobněji popsán v kapitole 2.2.5 UHPC, tento postup nepředstavuje zásadní problém.

## 5.2 Typy prováděných zkoušek a používané přístroje

V rámci zlepšení tuhosti průřezu při zesílení pomocí UHPC budeme provádět zkoušky na porušení tlakem, smykem a budeme měřit poměrnou deformaci vzorku. Zároveň budeme pozorovat kvalitu spřažení a jaký příspěvek na spřažení mají nýty nebo velikost děr pro výztuž vedoucí skrz stojinu průřezu. Nebudeme mít žádné referenční vzorky bez UHPC jelikož by se průřez porušil na boulení a nepřineslo by to žádné validní poznatky. Pro zkoušky budeme používat hydraulický lis, viz obr. 5.9 s kapacitou maximální síly 2500 kN. Vzorky, které přenesou toto zatížení, budeme dále zkoušet na hydraulickém lisu s kapacitou zatížení 4000 kN.



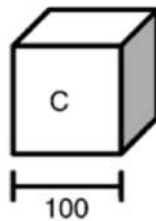
Obrázek 5.7: Hydraulický lis - 2500kN

### 5.2.1 Materiálové zkoušky

V rámci experimentu budou provedeny materiálové zkoušky za účelem stanovení tlakové pevnosti UHPC a statického modulu pružnosti ve 28 dnech a zároveň i po 18 dnech, abychom mohli přesně určit pevnost materiálu v době provádění zatěžovacích zkoušek.

#### Krychelná pevnost UHPC v tlaku

V souladu s normou BS EN 12390-3 budou použity krychličky o rozměrech 100 mm, viz. obr. 5.8 k určení tlakové pevnosti UHPC.



Obrázek 5.8: Geometrie krychliček

Zaznamenejme celkové maximální zatížení udané zkušebním strojem a na jeho základě vypočítáme tlakovou pevnost pomocí vztahu:

$$f_{cu} = \frac{P}{A}$$

kde:

- $f_{cu}$  = krychlová pevnost v tlaku [MPa],
- $P$  = maximální zatížení při porušení [N],
- $A$  = plocha průřezu zkušebního tělesa, na kterou působí tlaková síla.

Experimentální postup volíme dle normy BS EN 12390-3 [12]. Zvolíme konstantní rychlost zatěžování v rozmezí od 0,2 MPa/s ( $\text{N}/\text{mm}^2 \cdot \text{s}$ ) do 1,0 MPa/s ( $\text{N}/\text{mm}^2 \cdot \text{s}$ ). Zatížení aplikujeme na těleso bez rázů a plynule ho zvyšujeme zvolenou konstantní rychlostí s tolerancí  $\pm 10\%$ , dokud těleso není schopné dále nést vyšší zatížení. Při použití ručně ovládaného zkušebního stroje případně upravujeme ovládání tak, aby nedocházelo k poklesu zvolené rychlosti zatěžování v okamžiku blížícího se porušení tělesa. Zaznamenejme maximální zatížení a zaneseme do připravené tabulky níže.

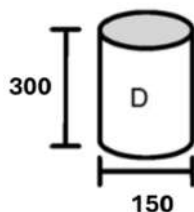
Současně byl proveden výpočet predikované pevnosti UHPC ve stáří 18 dní, který slouží k porovnání analyticky stanovených hodnot s reálně naměřenými výsledky, viz kapitola 5.4.1. Na obrázku níže jsou zobrazeny hotové zkušební krychle určené pro měření tlakové pevnosti betonu.



Obrázek 5.9: Krychličky pro pevnost v tlaku UHPC

### Statický modul pružnosti

Modul pružnosti v tlaku představuje pružnostní charakteristiku vyjadřující deformační vlastnosti materiálu. Zjišťuje se z deformací, které nastávají při známém zatížení na základě Hookova zákona. Zkoušky pro zjištění hodnot statického modulu pružnosti proběhnou na válcích UHPC  $\varnothing 150/300$  mm, definované dle ISO 1920-10.[13]



Obrázek 5.10: Geometrie válečku

Zkouška začíná předběžným zatížením  $\sigma_b (0,5 \text{ N/mm}^2)$ , následuje cyklické zatěžování, které spočívá v zatížení vzorku třetinovou hodnotou válcové pevnosti v tlaku -  $\sigma_a$ . Rychlost zatěžování a odtěžování mezi základním a horním zatěžovacím napětím se pohybuje mezi  $0,4 - 0,6 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2 \cdot \text{s}}$ . Na jednotlivých hodnotách vždy držíme zatížení po dobu 60 sekund a cyklus opakujeme 3x.

Statický modul pružnosti v tlaku se vypočítá ze vztahu:

$$E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_a - \sigma_b}{\Delta\varepsilon_a - \Delta\varepsilon_b}$$

$\sigma_a$  horní zatěžovací napětí v  $\text{N/mm}^2$

$\sigma_b$  základní zatěžovací napětí v N/mm<sup>2</sup>

$\Delta\varepsilon_a$  průměrné přetvoření při horním zatěžovacím napětí

$\Delta\varepsilon_b$  průměrné přetvoření při spodním zatěžovacím napětí



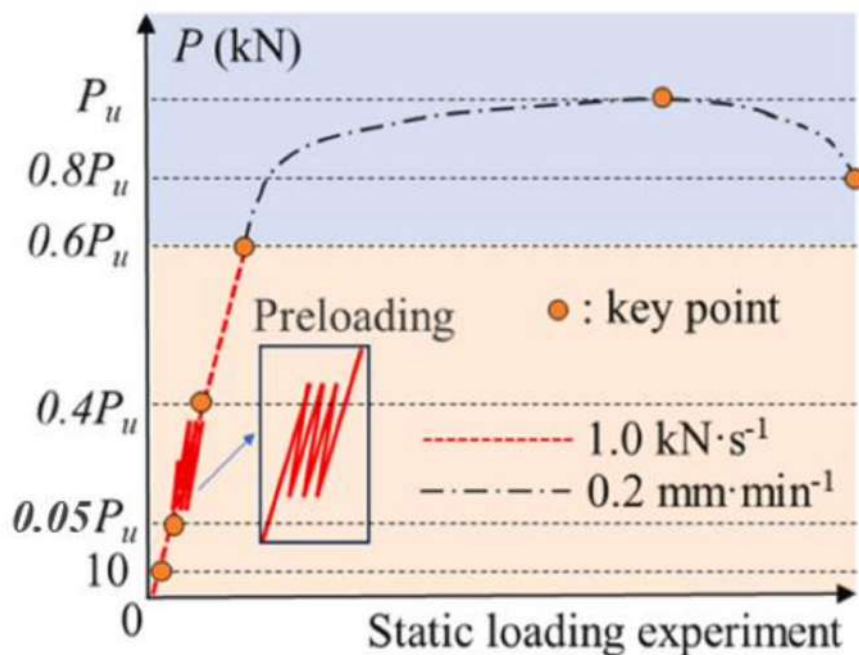
Obrázek 5.11: Válce pro Youngův modul pružnosti UHPC

## 5.2.2 Testovací protokol protlačovací zkoušky

Dle Eurokodu, paragraf B.2.4 [14] se zkouška smykové pevnosti provádí následovně:

- Břemeno by mělo být aplikováno v přírůstcích až do dosažení síly o velikosti 40 % z predikovaného mezního zatížení. Poté probíhá cyklické zatěžování ze 40 % na 5 % o délce 25 cyklů.
- Následující navýšení zatěžovací síly by neměla být prováděna v tak krátkých časových intervalech, aby se zkušební těleso porušilo dříve než po 15 minutách trvání zkoušky.
- Svislý posun mezi ocelovým vzorkem a zabetonováním by měl být kontinuálně měřen po celou dobu zatěžování nebo alespoň při každém navýšení zatěžovací síly. Měření je vhodné ukončit při poklesu zatěžovací síly pod 20 % z predikovaného mezního zatížení.

Metodu zatěžování volíme podle vědecké práce ZHONG a HUANG[15], která se zaměřuje právě na problematiku smykové únosnosti technologie PBL v kontaktu s vysokopevnostními materiály. Postup zatěžování prochází 25 cykly v rozmezí 5 % až 40 % z predikovaného mezního zatížení, stejně tak jako u Eurokodu 4. Cyklická zatížení jsou aplikována rychlostí 1 kN/s. Rozdíl nastává u dosažení přibližně 60 % predikovaného mezního zatížení, kdy se testovací protokol přepne do režimu řízeného svislým posunem. Svislý posun se poté navyšuje rychlostí 0,2 mm/min. Zkoušku ukončíme v případě dosažení 20 mm ve svislém posunu nebo pokud zatěžovací síla klesne pod 20 % z predikovaného mezního zatížení. Celý testovací protokol je znázorněn na grafu, viz.5.12.



Obrázek 5.12: Průběh zatěžování pro zkoušku smykové pevnosti

## 5.3 Metody pro vyhodnocení výsledků zkoušek

Pro zkoušky využíváme hydraulický lis, který nám poskytne data ohledně maximálního zatížení, lis zároveň lze řídit dle deformace. Pro získání přesnějších dat použijeme metodu Digital Image Correlation - DIC a metodu Linear Variable Displacement Transducers - LVDT.

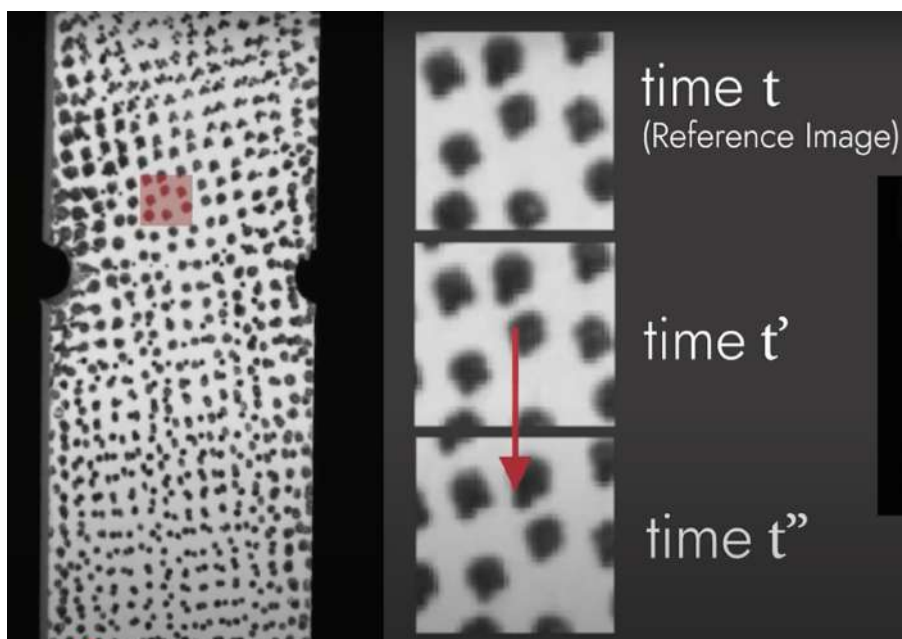
### 5.3.1 DIC

Díky rychlému rozvoji digitálních fotoaparátů s vysokým rozlišením došlo k výraznému rozšíření využití měřicí metody DIC, neboli digitální korelace obrazu. Metodu lze aplikovat jak ve 2D, tak ve 3D zobrazení, přičemž umožňuje nedestruktivním způsobem sledovat a lokalizovat deformace vznikající při zatížení. Měření deformací pomocí metody DIC se ukázalo jako flexibilní a efektivní nástroj pro analýzu deformací.[16] Příprava technologie je však poněkud náročná, je nutné mít dostatek prostoru a dobrý výhled na klíčové oblasti vzorku. Pro správné měření by měly být použity minimálně dvě kamery, které umístíme v různých úhlech vůči vzorku. To umožňuje zachytit 3D deformace a posuny povrchu vzorku. Kamery by měly být stabilní a umístěny tak, aby pokryly celou oblast zájmu. Je nutné zajistit rovnoměrné a dostatečné osvětlení, aby kamery mohly jasně zachytit skvrnitý vzor(viz níže). Osvětlení by mělo být difuzní, aby se předešlo stínům a odrazům, které by mohly ovlivnit výsledky měření. Nastavení technologie DIC našeho experimentu vidíme na přiložené fotografii.



Obrázek 5.13: Setup DIC

Digitální kamera analyzuje oblast vzorku, vyhledává charakteristické body a ty se stávají referenčními body pro virtuální síť a pro diskretizaci analyzované oblasti. Měření se provádějí přesnou analýzou polohy jedinečných skupin skvrn na povrchu objektu a jak se pohybují v jednotlivých snímcích, viz obr.5.14.[17]

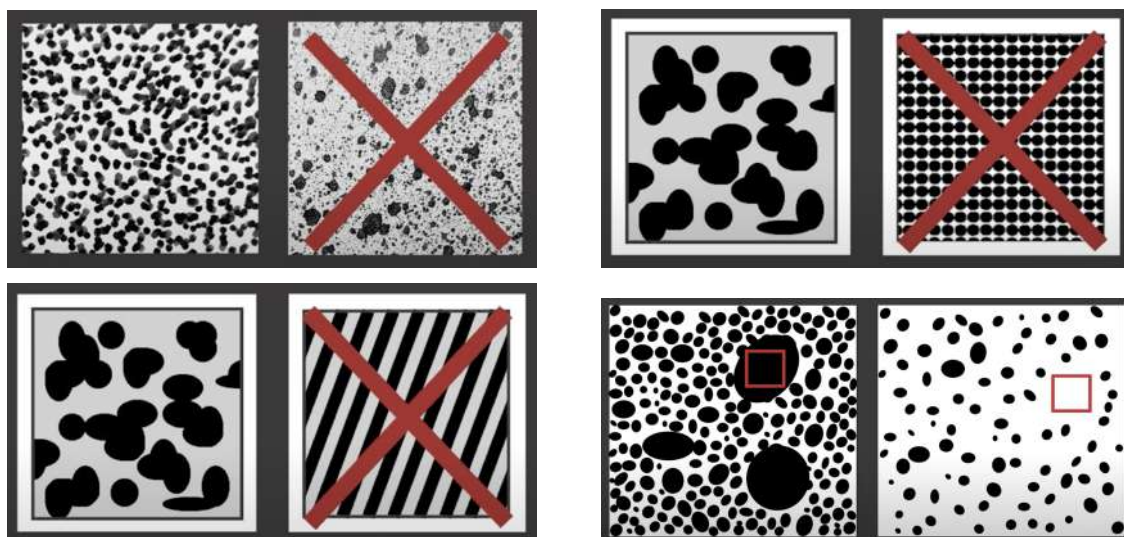


Obrázek 5.14: Princip DIC

Použití optimálního skvrnitého vzoru je jedním z nejdůležitějších faktorů pro snížení šumu v měření a zlepšení celkových výsledků DIC, proto je pochopení požadavků na ideální skvrnitý vzor a způsob jeho nanesení na vzorek zásadní součástí DIC.[17] Aby měření poskytlo kvalitní informace, vzory skvrnitého podkladu na vzorku by měli mít následující vlastnosti:

- Vysoký kontrast - vzor by měl mít tmavé černé tečky na jasném bílém pozadí nebo naopak
- 50 (%) pokrytí povrchu - velikost skvrn se vypočítává na základě výkonosti kamer a velikosti vzorku
- Konzistentní velikost skvrn -
- Izotropní a stochastický - vzor by měl být náhodný a bez směrového zkreslení, nedodržení by mohlo vést k falešným shodám, ikdyž se to týká spíše opakovaných tištěných vzorů

Na následujících snímcích jsou znázorněny nevhodné vzory skvrnitého podkladu pro technologii DIC.[17]



Obrázek 5.15: Nevhodné vzory

Podklad pro provedení vzoru musí být čistý a suchý. Podle typu povrchu je často potřeba aplikovat základní vrstvu – obvykle bílou barvu v několika lehkých vrstvách matného spreje. Když je základní vrstva zcela zaschlá, můžeme přistoupit k nanesení vzoru. Nanesení vzoru je možné provést sprejovou barvou, černým fixem, tiskem nebo různými válečky a razítky. Každá metoda má své uplatnění, černý fix, ačkoliv bude metoda poměrně zdlouhavá, uplatňujeme v případě složité geometrie vzorku, naopak tisk používáme u vzorků nadměrné velikosti, např. potisk auta. Pro představu aplikace vzoru na zkušební tělesa přikládáme snímky níže.[17]



Obrázek 5.16: Aplikace vzoru na zkušební tělesa

### 5.3.2 LVDTs

LVDT (linear variable differential transformer) je typ elektrického transformátoru používaného k měření lineárního posuvu. Řez zařízením nám znázorňuje, že se skládají z pohyblivé tyčky zasunující / pohybující se uvnitř dutého válce. Ten je tvořen soustavou 3 válcových cívek, přičemž samostatná první cívka tvoří primár a druhé a třetí vinutí jsou zapojeny sériově ve vzájemné protifázi (jejich napětí se mezi sebou odečítají) a vyvedeny jako sekundár. Jedinou podmínkou pro použití technologie je, že zkušební těleso musí být dostatečně pevné, nebo-li co nejméně pružné. I když se může metoda z mechanického hlediska zdát kontaktní, z elektrického jde o kompletně galvanicky oddělené bezkontaktní měření, kde zkušební těleso není součástí elektrického obvodu. Z toho můžeme odvodit, že nezáleží na složení materiálu ani jeho vlastnostech ať už elektrických či magnetických. Technologie v experimentu nakonec nebude použita v důsledku problému s vhodným uchycením na zkušební těleso.

## 5.4 Predikovaná smyková únosnost vzorku

Před samotným experimentem je nutné provést predikci únosnosti jednotlivých typů vzorků pomocí analytických výpočtů. Tato predikce je klíčová zejména s ohledem na průběh zatěžovací zkoušky, jak je podrobněji popsáno v kapitole 5.2.2, a umožňuje nastavení očekávané mezní síly.

### 5.4.1 Predikovaná pevnost v tlaku UHPC

Jak již bylo uvedeno v kapitole 5.2.1, materiálové zkoušky budou provedeny ve stejný den jako zbytek experimentu. Pro výpočet pevnosti v tlaku při stáří 18 dní bude využita rovnice podle Graybeala [18].

$$f'_c(t) = f'_c \left[ 1 - \exp \left( - \left( \frac{t - 0,9}{3} \right)^{0,6} \right) \right] \quad (5.1)$$

$f'_c(t)$  - pevnost v tlaku UHPC v daném čase [MPa]  $f'_c$  - pevnost v tlaku UHPC  $t$  - čas  
Po dosazení do rovnice získáme hodnotu predikované pevnosti UHPC v tlaku pro 18. den zrání. Pevnost v tlaku při stáří 28 dní byla převzata z technických listů, viz příloha.  $f'_c = 120 \text{ MPa}$   $t = 18 \text{ dní}$

$$f'_c(18) = 120 \left[ 1 - \exp \left( - \left( \frac{18 - 0,9}{3} \right)^{0,6} \right) \right] \quad (5.2)$$

$$f'_c(18) = 112,998 \text{ MPa} \quad (5.3)$$

Na základě výpočtu lze konstatovat, že provedení experimentu o 10 dní dříve nebude mít výrazný vliv na výsledky. Predikovaná pevnost UHPC v tlaku při stáří 18 dní činí 112,998 MPa, což odpovídá přibližně 94 % referenční hodnoty 120 MPa ve 28 dnech. Tato odchylka je vzhledem k účelu zkoušky považována za irelevantní.

### 5.4.2 Predikovaný modul pružnosti

Predikovaný modul pružnosti vztahujeme rovněž k době zrání 18 dní. K analytickému stanovení modulu pružnosti byl použit vztah publikovaný Cimesou a Moustafoou [19], jenž vychází z vyhodnocení souboru strukturálních dat a vlastností doprovodných materiálů. Do rovnice dosadíme predikovanou pevnost v tlaku UHPC (t=18 dní)  $f'_c(18) = 112,998MPa$

$$E_c = 9115f_c'^{0,33}[MPa] \quad (5.4)$$

$$E_c = 9115 \cdot 113^{0,33} = 43378MPa = \mathbf{43,4 \text{ GPa}} \quad (5.5)$$

$$E_c = 3735f_c'^{0,50}[MPa] \quad (5.6)$$

$$E_c = 3735 \cdot 113^{0,50} = 39703MPa = \mathbf{39,7 \text{ GPa}} \quad (5.7)$$

### 5.4.3 Příspěvek nýtů na smykovou únosnost

První část komplexního vzorce vyjadřuje příspěvek nýtů na smykovou únosnost vzorku. Pro výpočet jsme použili vzorec 5.8 z ocelových tabulek [20], který stanovuje únosnost šroubů ve střihu. Vzhledem k tomu, že smyková rovina prochází dříkem, lze tento výpočet považovat za ekvivalentní i pro nýty. Mez pevnosti nýtu jsme stanovili na základě tabulky 5.1, přičemž jsme zohlednili stáří konstrukce (1898) a předpokládali, že se jedná o svářkové železo. Ze stejné tabulky jsme také získali materiálový součinitel  $\gamma_{M2}$ .

Rok výroby	Materiál pevnostní třídy	Dovolené namáhání $\sigma_{adm}$ [MPa]	Zaručená mez kluzu $f_y$ [MPa]	Mez pevnosti $f_u$ [MPa]	$\gamma_{M0}$	$\gamma_{M1}$	$\gamma_{M2}$	Norma	
do 1894	svářkové železo	130	210	340	1,10	1,20	1,30		
1895 - 1904	svářkové železo	130	210	340	1,10	1,20	1,30	Nařízení 97/1904	
	plávková ocel	140	230	360	1,10	1,20	1,30		
1905 - 1937	plávková ocel	140	230	360	1,10	1,20	1,30	ČSN 1230	
1938 - 1950	37 (S235)	140	230	360	1,10	1,20	1,30	ČSN 1232	
	52 (S355)	195	335	490	1,10	1,25	1,30		
1951 - 1968	37 (S235)	tloušťka $t \leq 25$ mm	140	230	360	1,10	1,20	1,30	Směrnice pro navrhování mostů, ČSN 73 6202 ČSN 73 6204
		$> 25$	130	210	340	1,10	1,20	1,30	
	52 (S355)	$\leq 16$	210	360	510	1,10	1,25	1,30	
		$> 17$	200	340	490	1,10	1,25	1,30	
1969 - 1985	37 (S235)	$\leq 25$		235	360	1,00	1,10	1,25	ČSN 73 6205  ČSN ISO 13822
		$> 25$		215	360				
	52 (S355)	$\leq 50$		355	510				
1986 - 1998	37 (S235)	$\leq 25$		235	360	1,00	1,10	1,25	
		$> 25$		215	360				
	52 (S355)	$\leq 25$		355	510				
		$> 25$		335	470				
Po roku 1998	S235	$\leq 40$		235	360	1,00	1,10	1,25	ČSN 73 0038  ČSN EN 10025-2, 3
	S235	$40 < t \leq 80$		215	360				
	S275	$\leq 40$		275	430				
	S275	$40 < t \leq 80$		255	410				
	S355	$\leq 40$		355	510				
	S355	$40 < t \leq 80$		335	470				
	S460	$\leq 40$		460	550				
	S460	$40 < t \leq 80$		430	550				

Tabulka 5.1: Vlastnosti ocelí a dílčí součinitele materiálu [21]

Vztah stanovující únosnost šroubů ve střihu:

$$F_{v,Rd} = \frac{0,6A f_{ub}}{\gamma_{M2}} \quad (5.8)$$

Dosadíme následující hodnoty:

$$A = \pi(d/2)^2 = \pi \cdot (35/2)^2 = 962,1 \text{ mm}^2$$

$$f_{ub} = 340 \text{ MPa}$$

$$\gamma_{M2} = 1,3$$

$$F_{v,Rd} = \frac{0,6 \cdot 3848,45 \cdot 340}{1,3} = 151 \text{ kN}$$

[20]

Tímto jsme vypočítali očekávaný příspěvek jednoho nýtu na smykovou únosnost vzorku. Malá zkušební tělesa typu A a C mají 8 nýtů. Pro ně příspěvková síla vychází:

$$8 \cdot F_{v,Rd} = 8 \cdot 151 = 1208 \text{ kN}$$

Na hlavním vzorku, zkušební těleso typu D, jsme napočítali 25 nýtů, příspěvková síla se tím pádem rovná:

$$25 \cdot F_{v,Rd} = 25 \cdot 151 = 3775 \text{ kN}$$

Zkušební tělesa typu B nýty nemají, tudíž příspěvková síla se rovná nule.

#### 5.4.4 Příspěvek PBL na smykovou únosnost

Systém PBL (Perfobond strip connectors) zvyšuje smykovou pevnost konstrukce tím, že využívá několik mechanismů přenosu smykového zatížení. Smykovou pevnost podporuje styčná plocha mezi betonem a ocelí, kde dochází k tření na jejich rozhraní. Důležitou roli hraje také betonový váleček vytvořený v prostupu stojiny ocelového nosníku, který jsme vyplnili UHPC (ultravysokohodnotným betonem). Tento váleček je provázán ocelovými drátky se zbytkem betonu, což zlepšuje soudržnost a odolnost vůči smykovým silám.

Dalším faktorem přispívajícím ke zvýšení smykové pevnosti je výztuž, kterou jsme proložili skrz prostup ve stojině nosníku. Ta nejen zajišťuje dodatečnou pevnost, ale také pomáhá přenášet smykové síly. Kombinací těchto prvků dochází k výraznému zvýšení smykové odolnosti celého systému.

Pro výpočet jsme použili vzorec níže, který vznikl spojením rovnic ze 7 různých vědeckých studií, shrnuty v publikaci Push-out tests for perfobond strip connectors with UHPC grout in the joints of steel-concrete hybrid bridge girders[10] a popisuje příspěvky sil od jednotlivých částí systému PBL.

$$V_u = \left(0,04 + 0,04V_f \frac{L_f}{\phi_f}\right) A_b \sqrt{f_{cu}} + \left(1,06 + 0,07V_f \frac{L_f}{\phi_f}\right) \frac{\pi(D^2 - d_s^2)}{4} f_{cu} + 2,09 \frac{\pi d_s^2}{4} f_y$$

[10]

$V_f$  - objemový tíha ocelových vláken [%]- přiložit specifikaci do příloh?

$L_f$  - průměrná délka ocelových vláken [mm]

$\phi_f$  - průměr ocelových vláken [mm]  
 $A_b$  - styčná plocha ocelového nosníku a UHPC [mm<sup>2</sup>]  
 $f_{cu}$  - pevnost v tlaku [MPa]  
 $D$  - průměr kruhového prostupu stojinou nosníku [mm]  
 $d_s$  - průměr výztuže prostupující prostupem ve stojině nosníku [mm]  
 $f_y$  - mez pevnosti výztuže v tahu [MPa]

Do jednotlivých vzorců jsme dosadili číselné hodnoty, které nám poskytli technické listy výrobce. - viz příloha specifikace UHPC? - zároveň asi citovat TP 267

$V_f = 1,5\%$   
 $L_f = 14mm$   
 $\phi_f = 0,175mm$   
 $f_{ck,t=18} = 112.998MPa$   
 $D = 25mm$   
 $d_s = 12mm$   
 $f_y = 500MPa$

První sumarizační člen vzorce  $V_{u1}$  vyjadřuje třecí sílu na styčné ploše beton - ocel.

$$V_{u1} = \left( 0,04 + 0,04V_f \frac{L_f}{\phi_f} \right) A_b \sqrt{f_{cu}}$$

Druhý sumarizační člen vzorce  $V_{u2}$  vyjadřuje příspěvek od UHPC válečku procházejícího prostupem v nosníku.

$$V_{u2} = \left( 1,06 + 0,07V_f \frac{L_f}{\phi_f} \right) \frac{\pi (D^2 - d_s^2)}{4} f_{cu}$$

Třetí sumarizační člen vzorce  $V_{u3}$  vyjadřuje příspěvek od výztuže.

$$V_{u3} = 2,09 \frac{\pi d_s^2}{4} f_y$$

Do jednotlivých vzorců jsme dosadili číselné hodnoty vlastností UHPC a výztužných vláken, které jsme získali z technických listů výrobce (viz přílohy 1 a 2). Údaje o styčné ploše materiálů byly odečteny z výkresů v programu AutoCAD. Hodnotu pevnosti v tlaku jsme určili na začátku této kapitoly.

$V_f = 1,5\%$   
 $L_f = 14mm$   
 $\phi_f = 0,175mm$   
 $f_{ck,t=18} = 112.998MPa$   
 $D = 25mm$   
 $d_s = 12mm$   
 $f_y = 500MPa$   
 $A_{bA} = 81240mm^2$   
 $A_{bB} = 91140mm^2$

$$A_{bC} = 78420mm^2$$

$$A_{bC} = 420160mm^2$$

Predikovaná únosnost všech uvažovaných typů vzorků je přehledně shrnuta v níže uvedené tabulce 5.2, která uvádí jednotlivé příspěvky od složek technologie PBL a nýtů (rozhraní materiálu, betonového válečku, výztuže a nýtů) a výslednou celkovou hodnotu únosnosti pro každý vzorek.

	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>
PBL – rozhraní materiálu	76.0 kN	85.3 kN	73.4 kN	393.0 kN
PBL – váleček betonu	0.0 kN	146.5 kN	146.5 kN	488.4 kN
PBL – výztuž	0.0 kN	354.6 kN	354.6 kN	1181.9 kN
Příspěvek od nýtů	1207.8 kN	0.0 kN	1207.8 kN	3774.4 kN
<b>Celková únosnost</b>	<b>1283.8 kN</b>	<b>586.3 kN</b>	<b>1782.2 kN</b>	<b>5837.7 kN</b>

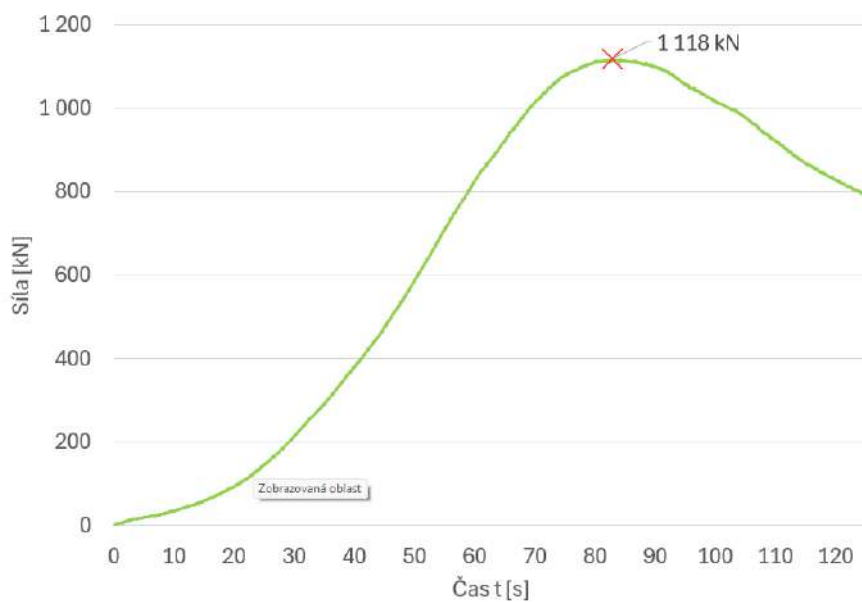
Tabulka 5.2: Predikovaná únosnost vzorků dle jednotlivých složek

Také musíme upozornit, že predikovaná únosnost zkušebního tělesa typu D je poměrně nepřesná kvůli složité geometrii ocelového vzorku. Oproti ostatním vzorkům navíc obsahuje svislá ztužení, která mohou výrazně přispět ke zvýšení jeho únosnosti. Zároveň je tato únosnost tak vysoká, že při zkouškách pravděpodobně ani nedojde k porušení vzorku.

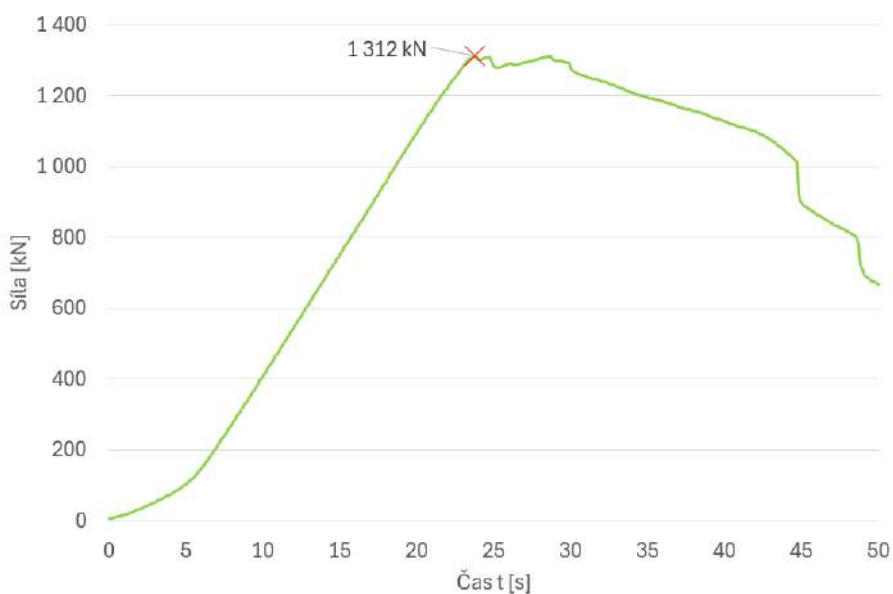
## 5.5 Výsledky materiálových zkoušek

### 5.5.1 Pevnost v tlaku

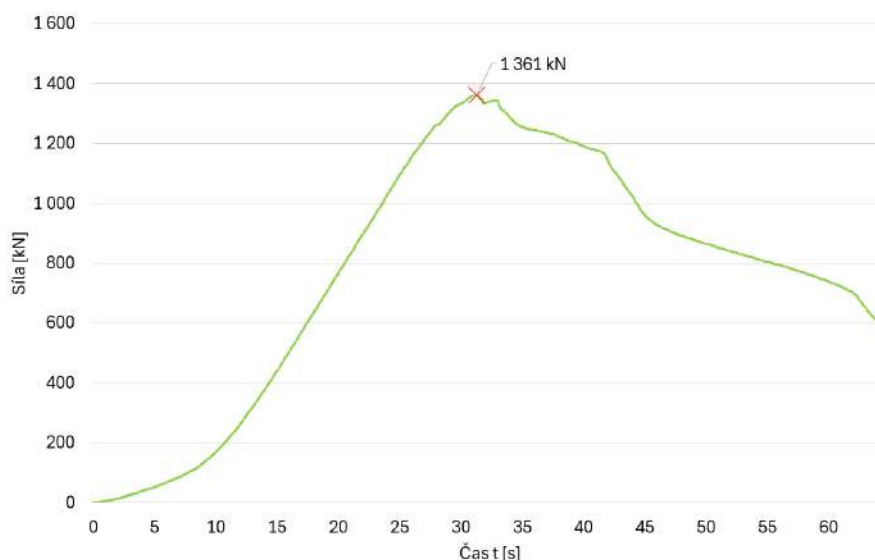
Na následujících grafech jsou znázorněny zatěžovací křivky zkoušek krychliček na pevnost v tlaku po 18 dnech.



Obrázek 5.17: Zkouška pevnosti v tlaku krychle C1



Obrázek 5.18: Zkouška pevnosti v tlaku krychle C2



Obrázek 5.19: Zkouška pevnosti v tlaku krychle C3

Z jednotlivých grafů odečteme maximální sílu a dosadíme do vzorce pro získání pevnosti v tlaku.

$$f_{cu} = \frac{P}{A} \quad (5.9)$$

$A$  - plocha krychle

$f_{cu}$  - pevnost v tlaku

$P$  - zatěžovací síla

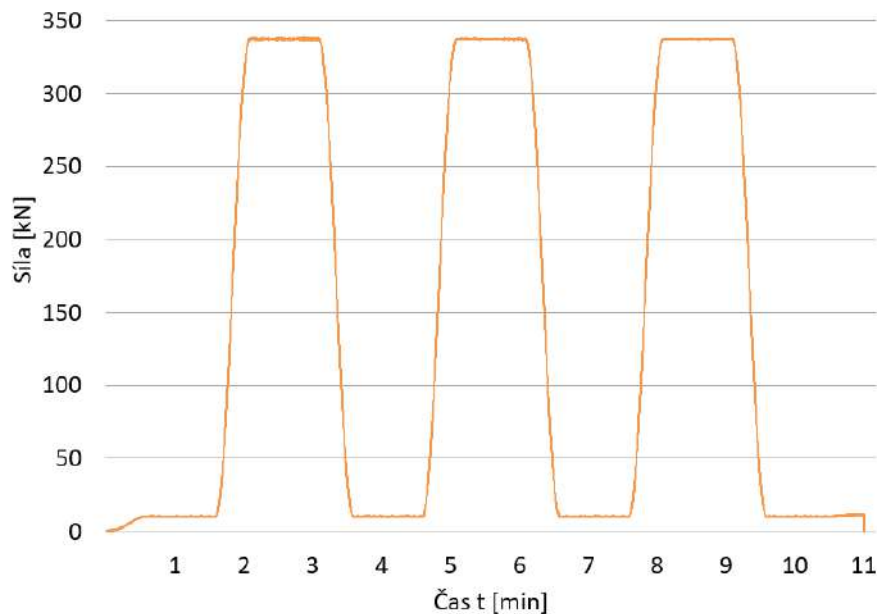
Označení	Datum zkoušky	Rychlost zatěžování [MPa/s]	Příčný průřez $A$ [mm <sup>2</sup> ]	Maximální zatížení $P$ [kN]	$f_{cu}$ [MPa]
<b>C1</b>	9.5.	0,5 N/mm <sup>2</sup> /s	10000	1118	111,8
<b>C2</b>	9.5.	0,5 N/mm <sup>2</sup> /s	10000	1312	131,2
<b>C3</b>	9.5.	0,5 N/mm <sup>2</sup> /s	10000	1361	136,1

Tabulka 5.3: Tabulka měřených hodnot – pevnosti betonu v tlaku

Tabulka jasně ukazuje, že pevnost v tlaku UHPC se pohybuje od 111 MPa do 136 MPa. Nižší hodnota může být způsobena nedostatečným ošetřováním nebo nesprávným skladováním vzorku mimo vodní prostředí. Je třeba mít na paměti, že vzorky byly testovány po 18 dnech, což znamená, že mají ještě 10 dní na dosažení garantované pevnosti. Naopak u dvou vzorků vidíme, že pevnost v tlaku již 10 dní před dokončením zrání překročila garantovanou hodnotu.

## 5.5.2 Modul pružnosti

Modul pružnosti v tlaku představuje pružnostní charakteristiku vyjadřující deformační vlastnosti materiálu. Zjišťuje se z deformací, které nastávají při známém zatížení na základě Hookova zákona.



Obrázek 5.20: Zatěžovací cyklus válce D1 pro zjištění modulu pružnosti

Statický modul pružnosti v tlaku se vypočítá ze vztahu:

$$E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_a - \sigma_b}{\Delta\varepsilon_a - \Delta\varepsilon_b}$$

$\sigma_a$  horní zatěžovací napětí v  $\text{N}/\text{mm}^2$

$\sigma_b$  základní zatěžovací napětí v  $\text{N}/\text{mm}^2$

$\Delta\varepsilon_a$  průměrné přetvoření při horním zatěžovacím napětí

$\Delta\varepsilon_b$  průměrné přetvoření při spodním zatěžovacím napětí

Přetvoření se vypočítá ze vztahu:

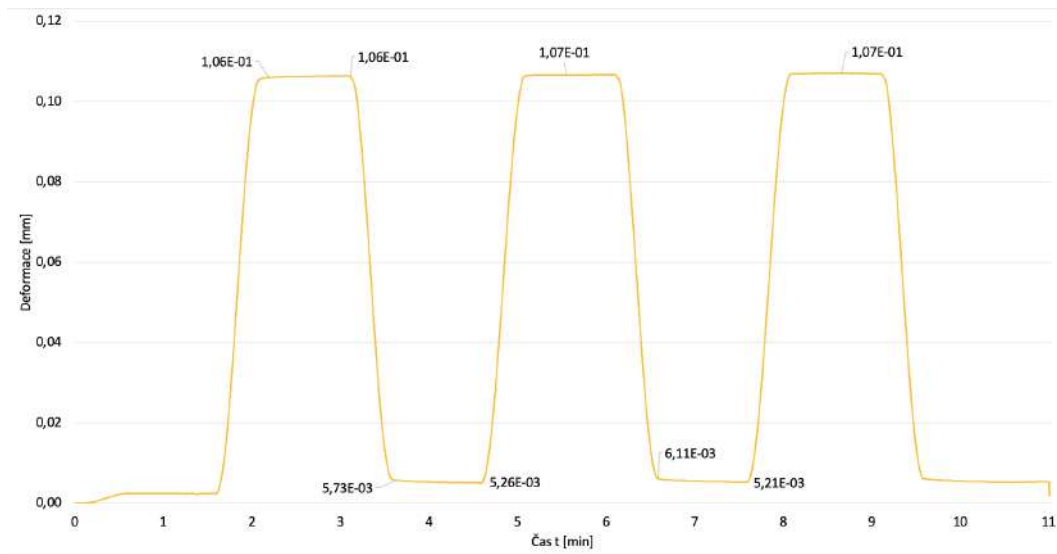
$$\Delta\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

$\Delta\varepsilon$  je přetvoření (bezrozměrné),

$\Delta l$  je změna délky tělesa při zatížení (v mm),

$l_0$  je původní měřená délka tělesa (v mm).

Změnu délky tělesa při zatížení odečteme z následujícího grafu:



Obrázek 5.21: Deformace válce D1

Do vzorce dosadíme následující hodnoty:

$$\sigma_a = 19,13 \text{ MPa}$$

$$\sigma_b = 0,57 \text{ MPa}$$

$$l_0 = 200 \text{ mm}$$

$$\Delta l_a = 0,107 \text{ mm}$$

$$\Delta l_b = 0,00558 \text{ mm}$$

$$\Delta \varepsilon_b = \frac{0,00558}{200} = 2,79 \cdot 10^{-5}$$

$$\Delta \varepsilon_a = \frac{0,107}{200} = 5,35 \cdot 10^{-4}$$

$$E_c = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon} = \frac{\sigma_a - \sigma_b}{\Delta \varepsilon_a - \Delta \varepsilon_b}$$

$$E_c = \frac{19,13 - 0,57}{5,35 \cdot 10^{-4} - 2,79 \cdot 10^{-5}} = 36,6 \text{ GPa}$$

Označení	Datum zkoušky	Rychlost zatěžování [MPa/s]	Příčný průřez A [mm <sup>2</sup> ]	Maximální zatížení P [kN]	$E_c$ [GPa]
<b>D1</b>	9.5.	0,5 N/mm <sup>2</sup> /s	17671	338,4	36,6

Tabulka 5.4: Tabulka měřených hodnot – modul pružnosti

Dle výpočtu je modul pružnosti UHPC po 18 dnech 36,6 GPa. Tato hodnota by však měla být spíše nad 40 GPa, což může být způsobeno nevhodným skladováním vzorků mimo vodní prostředí. Zároveň je vhodné provést měření na více než jednom vzorku pro zvýšení spolehlivosti výsledků.

## 5.6 Výsledky malé vzorky

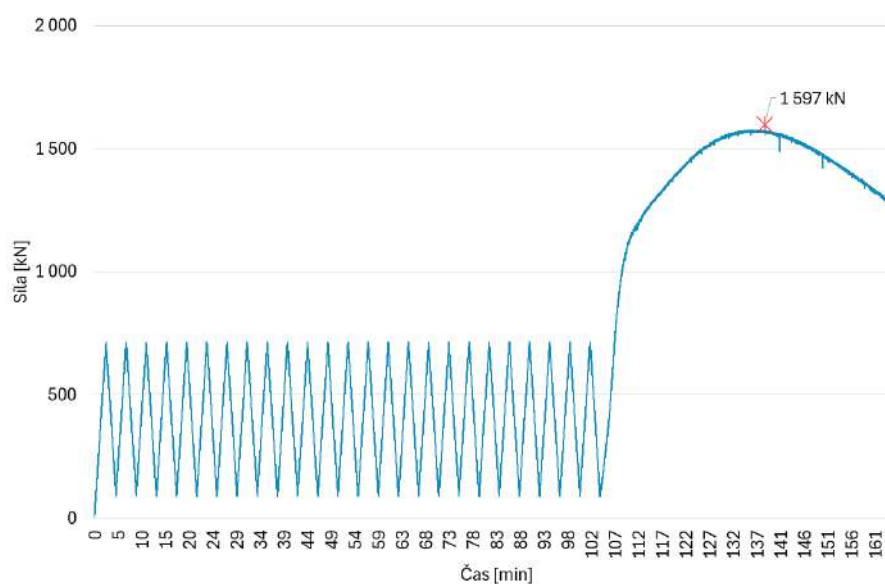
V následujících podkapitolách popisujeme chování zkušebních těles při zatěžování, které bylo realizováno pomocí hydraulického lisu s kapacitou 2500 kN, v souladu s testovacím protokolem uvedeným v kapitole 5.2.2. Cílem cyklického zatěžování bylo částečně porušit technologii PBL a spoje pomocí nýtů, a následně protlačit ocelový prvek skrz obetonování. Na základě výsledků úvodních testů bylo nutné provést několik úprav, které budou dále podrobně popsány.

### 5.6.1 Zkušební vzorky - typ C

Zkušební vzorky typu C využívají technologii PBL, při které se provádí prostup do stojiny nosníku a tento prostup je proložen výztužným prutem. Dále je využíván nerovný povrch tvořený nýty, který přispívá ke zvýšení smykové únosnosti spoje. Každý vzorek obsahuje 3 prostupy PBL a 8 nýtů. Na základě predikované únosnosti je tento typ považován za nejvíce únosný a měl by být schopen přenést zatížení až do hodnoty 1800 kN.

#### C1

Z grafu zatěžovací křivky uvedeného níže je patrné, že cyklické zatěžování proběhlo bez zjevných problémů. Pokud bychom vycházeli pouze z tohoto grafu, mohli bychom se domnívat, že zkouška proběhla úspěšně. Fotografie zkušebního tělesa po provedení protlačovací zkoušky však ukazuje, že zamýšleného cíle nebylo dosaženo. Místo očekávaného porušení spoje došlo ke ztrátě stability stojiny nad obetonováním v důsledku vzpěru. Zkouška proto neposkytla průkazné výsledky týkající se smykové pevnosti nýtů ani technologie PBL.



Obrázek 5.22: Zatěžovací křivka vzorku C1 – závislost síly na čase



Obrázek 5.23: Vzorek C1 po protlačovací zkoušce

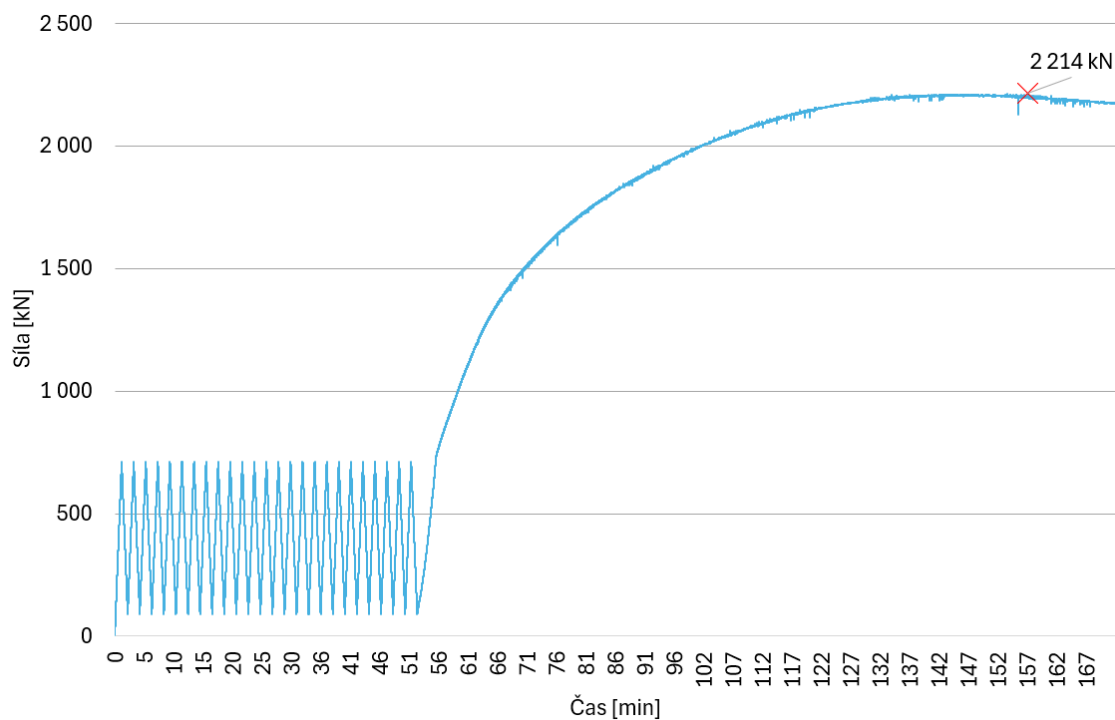
Bylo nezbytné přistoupit ke zlepšení spoje mezi ocelovými úhelníky a plechy stojiny nosníku. U vzorku došlo ke ztrátě stability stojiny vlivem vzpěru. Tento nežádoucí jev byl způsoben jednak nedostatečnou únosností samotné stojiny, jednak excentricitou přenášené zatěžovací síly. Tato zkušenost vedla k úpravě spoje, která spočívala v provedení svarů mezi přilehlými úhelníky a plechem stojiny nosníku. Pro lepší názornost je níže uvedena fotografie již provedených svarových spojů.



Obrázek 5.24: Provedení svarů

## C2

U některých vzorků se i přes provedené úpravy detailů pomocí svarů nepodařilo zajistit dostatečnou únosnost stojiny nosníku, která by umožnila překonat pevnost spřažení celého zkušebního tělesa. Přesto vzorek odolal zatížení až do hodnoty 2214 kN, což je patrné z grafu níže. Fotografie stavu zkušebního tělesa C2 po ukončení testu je uvedena na obr. 5.26.



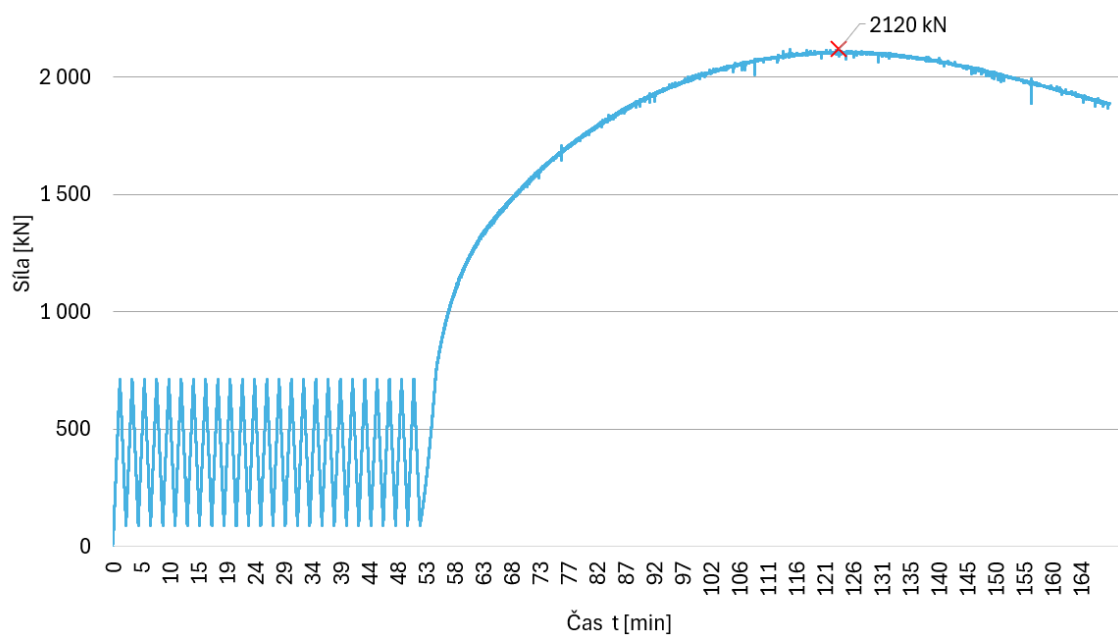
Obrázek 5.25: Zatěžovací křivka vzorku C2 – závislost síly na čase



Obrázek 5.26: Fotografie vzorku C2 – po provedení zkoušky

### C3

Stejný průběh byl zaznamenán i u zkušebního tělesa C3. Vzorek odolal zatížení až do hodnoty 2120 kN, přičemž opět došlo ke ztrátě stability stojiny nosníku vlivem vzpěru. Na grafu lze zároveň pozorovat drobné výkyvy, které naznačují vznik trhliny v obetonování, případné poškození některé z výztužných tyčí technologie PBL, nebo vznik trhliny v betonovém válečku, jenž je rovněž součástí této technologie. Nelze vyloučit ani drobné poškození některého z nýtů.



Obrázek 5.27: Zatěžovací křivka vzorku C3 – závislost síly na čase



Obrázek 5.28: Fotografie vzorku C3 – po provedení zkoušky

Při zhodnocení provedených protlačovacích zkoušek na vzorcích typu C je třeba zdůraznit, že síla potřebná k protlačení ocelového prvku skrz obetonování a k porušení technologie PBL spolu s nýty musela být vyšší, než byla síla, při níž došlo k porušení vzorku vzpěrem stojiny. Použité technologie (PBL a nýty) se ukázaly být natolik únosné, že nedošlo k očekávanému porušení spoje. Na základě těchto výsledků lze objektivně konstatovat, že spřažení realizované technologií PBL spolu s příspěvkem nýtů k smykové pevnosti vykazuje vyšší únosnost, než byla původně predikována.

### 5.6.2 Zkušební vzorky - typ B

Zkušební vzorky typu B jsou naopak predikovány jako nejméně únosné, výpočet určil hodnotu predikované únosnosti na 600 kN. Tyto vzorky neobsahují nýty a využívají pouze technologii PBL – vždy tři prostupy. Navíc mají tenčí stojinu, tvořenou pouze prostředním plechem, zatímco u ostatních typů vzorků nýty spojují tři plechy dohromady a vytvářejí tak širší stojinu.

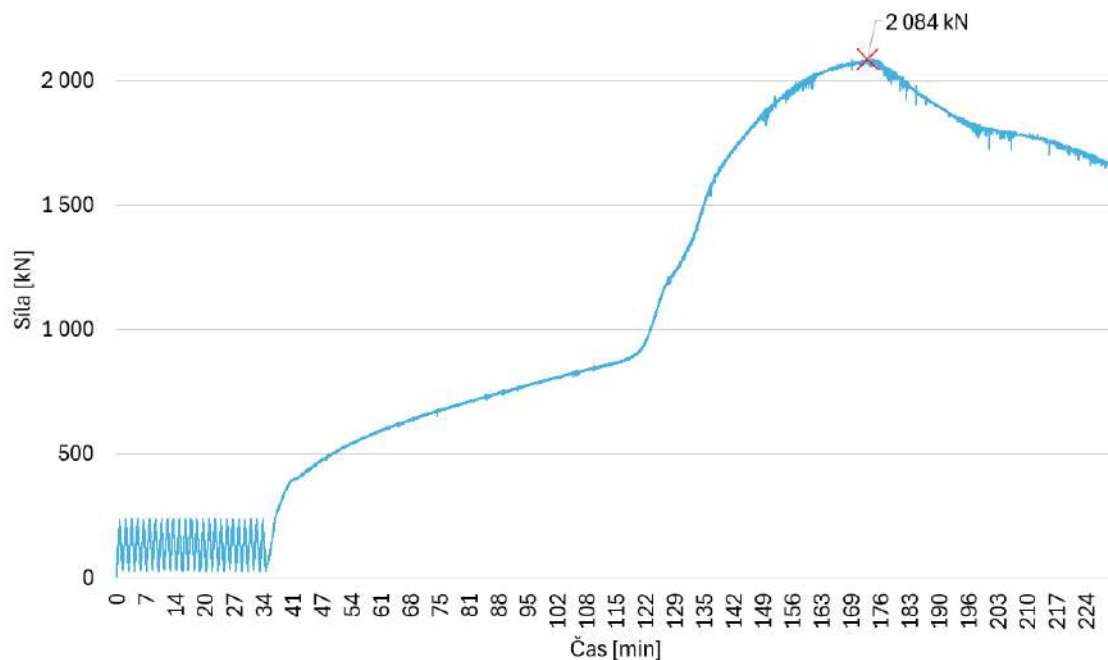
#### B1

U vzorku B1 nedošlo k vybočení stojiny nosníku, avšak objevil se jiný problém. Z fotografie na obr.5.33 pořízené před zkouškou je zřejmé, že mezera mezi horním povrchem betonu a úhelníky připevněnými nýty činila přibližně pouze 1 cm.



Obrázek 5.29: Fotografie vzorku B1 – před provedením zkoušky

Při posunu o tuto vzdálenost se úhelníky začnou opírat přímo o beton, čímž dochází k přenosu zatížení jiným mechanismem – místo smykové pevnosti vzorku se začíná projevovat drcení betonu pod úhelníky. Tento jev nastal přibližně při zatížení 900 kN, kdy – jak ukazuje graf níže – došlo k náhlému nárůstu přenášené síly.



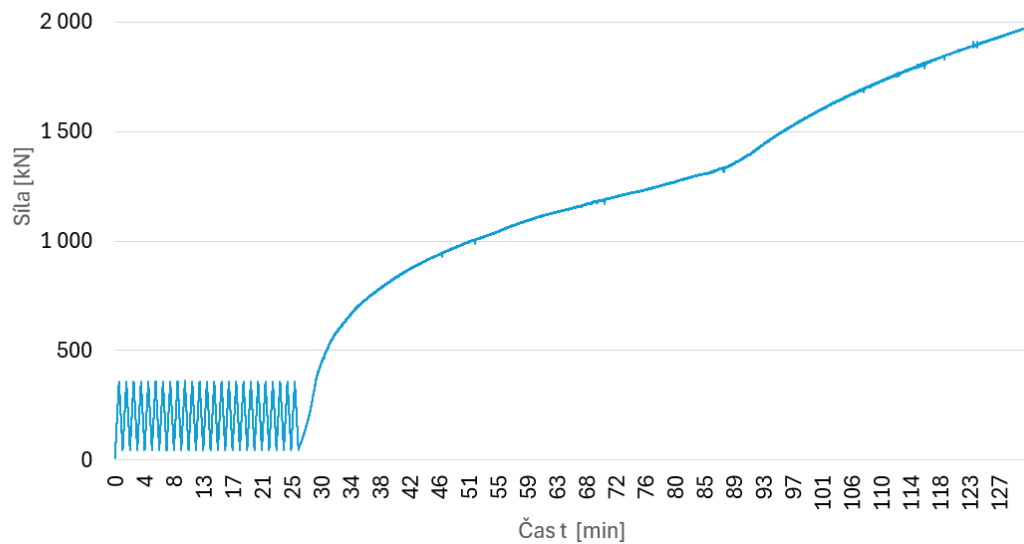
Obrázek 5.30: Zatěžovací křivka vzorku B1 – závislost síly na čase



Obrázek 5.31: Fotografie vzorku B1 – po provedení zkoušky

## B2

U vzorku B2 jsme opět zaznamenali opření úhelníků o horní povrch betonu, ke kterému došlo při zatížení přibližně 1350 kN. Podle testovacího protokolu (viz 5.2.2) by měl být experiment ukončen po poklesu maximální síly o 20%. V tomto případě nemělo smysl v experimentu pokračovat vzhledem k faktu, že bychom pozorovali pouze drcení betonu, nikoli prokluz ocelového prvku skrz obetonování.



Obrázek 5.32: Zatěžovací křivka vzorku B2 – závislost síly na čase



Obrázek 5.33: Fotografie vzorku B2 – před provedením zkoušky

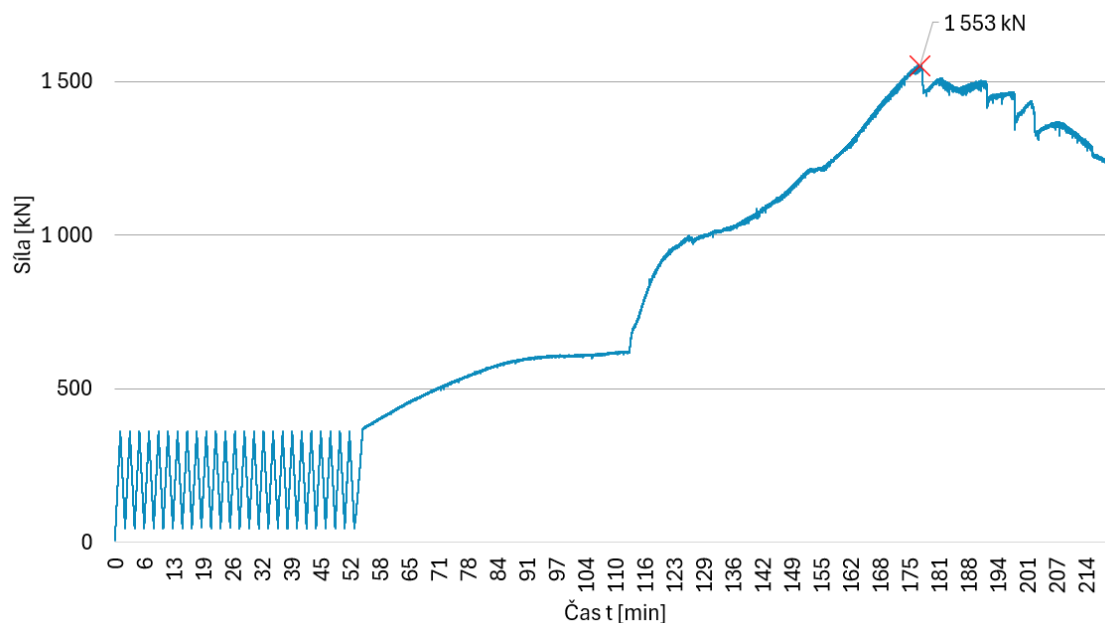


Obrázek 5.34: Fotografie vzorku B2 – po provedení zkoušky

### **B3**

Graf zkušebního vzorku B3 je poměrně složitý na interpretaci, jelikož zahrnuje dva zatěžovací cykly. Vzorek byl nejprve zatížen před provedením svarů mezi plechy, při-

čemž – podobně jako u vzorků typu C – došlo ke ztrátě stability stojiny nosníku vlivem vzpěru. Po doplnění svarů byl vzorek zatížen znovu s cílem dosáhnout lepších výsledků, což se podle grafu níže skutečně podařilo. Po dosažení maximální zatěžovací síly 1553 kN lze na průběhu zatěžovací křivky pozorovat několik výrazných skoků, které pravděpodobně indikují porušení výztužných prutů technologie PBL. Protlačovací zkouška byla celkově úspěšná, přičemž bylo možné vizuálně pozorovat protlačení ocelového prvku skrz obetonování přibližně o 1,5 cm.



Obrázek 5.35: Zatěžovací křivka vzorku B3 – závislost síly na čase



Obrázek 5.36: Fotografie vzorku B3 – po provedení zkoušky



Obrázek 5.37: Fotografie prokluzu vzorku B3 – po provedení zkoušky

### 5.6.3 Zkušební vzorky - typ A

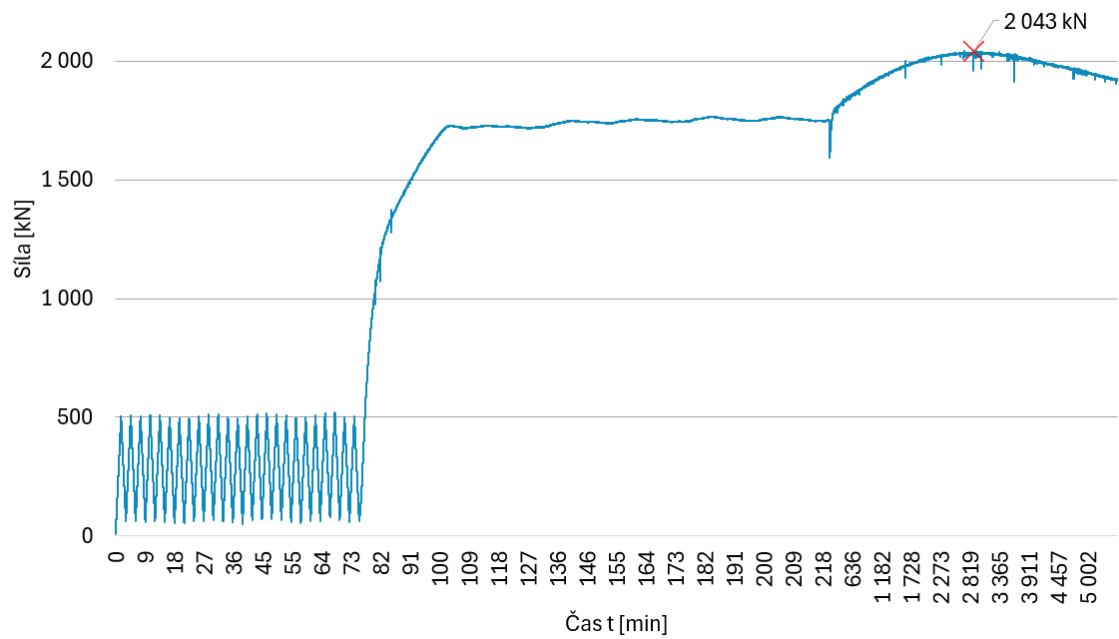
Zkušební vzorky typu A jsou charakteristické tím, že jejich stojina nosníku je tvořena třemi ocelovými plechy, které jsou pevně spojeny osmi nýty. Nýty jsou rozmístěny symetricky vzhledem k ose nosníku tak, aby bylo dosaženo rovnoměrného přenosu smykových sil. Na obrázku níže můžeme vidět fotografii vzorků typu A (A1, A2, A3).



Obrázek 5.38: Fotografie vzorků typu A – před provedením zkoušky

## A1

Graf zatěžovací zkoušky vzorku A1 vykazuje poměrně dlouhou vodorovnou část, která neodpovídá běžnému průběhu zkoušky. Tato anomálie byla způsobena dočasnou poruchou hydraulického lisu – v režimu konstantní rychlosti posunu (0,2 mm/s) došlo k jeho zaseknutí. Po detekci problému jsme zařízení odstavili, restartovali a následně ve zkoušce pokračovali. Navzdory této technické komplikaci vzorek nakonec odolal maximální zatěžovací síle 2043 kN.



Obrázek 5.39: Zatěžovací křivka vzorku A1 – závislost síly na čase

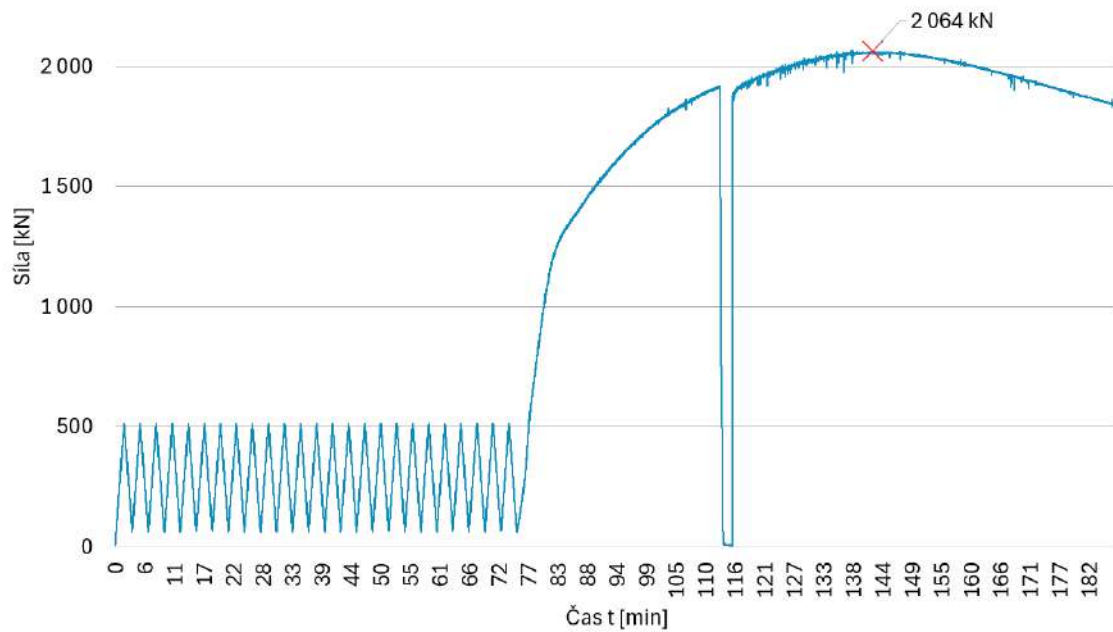


Obrázek 5.40: Fotografie vzorku A1 – po provedení zkoušky

## A2

Zkouška vzorku A2 probíhala v souladu s testovacím protokolem až do okamžiku náhlého výpadku hydraulického lisu, který je zřetelně patrný na zatěžovacím grafu uvedeném níže. Po odstranění poruchy jsme lis znovu nastavili na hodnotu zatěžovací síly, při které k výpadku došlo, a ve zkoušce jsme pokračovali. Vzorek A2 nakonec

odolal maximální síle 2064 kN, ale jak je patrné z obr.5.42, vzorek selhal v důsledku ztráty stability na vzpěr stojiny nosníku nad horním povrchem betonu.



Obrázek 5.41: Zatěžovací křivka vzorku A2 – závislost síly na čase

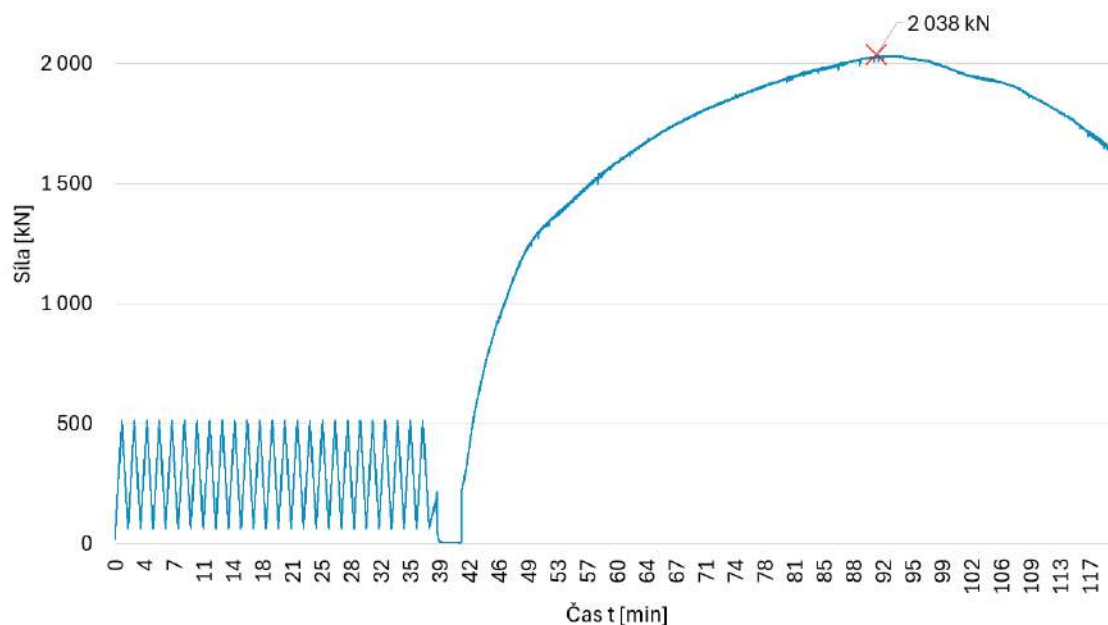


Obrázek 5.42: Fotografie vzorku A2 – po provedení zkoušky

### A3

Zkouška vzorku A3 probíhala v souladu s testovacím protokolem až do okamžiku náhlého výpadku hydraulického lisu, který je zřetelně patrný na zatěžovacím grafu

uvedeném níže v přilehlé době po ukončení cyklického zatěžování. Po odstranění poruchy jsme lis znovu nastavili na hodnotu zatěžovací síly, při které k výpadku došlo, a ve zkoušce jsme pokračovali. Vzorek A2 nakonec odolal maximální síle 2038 kN. Na obr.5.44 jsou zřetelné trhliny indikující smykové porušení v oblasti spřažení. Jejich poloha a směr potvrzují, že zkouška proběhla správně a selhání nastalo očekávaným způsobem.



Obrázek 5.43: Zatěžovací křivka vzorku A3 – závislost síly na čase



Obrázek 5.44: Fotografie vzorku A3 – po provedení zkoušky

## 5.7 Zhodnocení výsledků zkušebních vzorků A, B, C

Navzdory neočekávaným komplikacím při testování, způsobeným poruchou hydraulického lisu a porušením stojiny některých vzorků na vzpěr, se podařilo úspěšně dokončit všechny zatěžovací zkoušky. Tabulka níže uvádí maximální hodnoty zatížení, které jednotlivé vzorky dosáhly před porušením, případně hodnoty odečtené z průběhových grafů v místech, kde došlo k narušení kontinuity zkoušky a další nárůst síly nebyl relevantní pro hodnocení únosnosti.

	A	B	C
1	2043 kN	900 kN	1597 kN
2	2064 kN	1350 kN	2214 kN
3	2038 kN	1553 kN	2120 kN

Tabulka 5.5: Mezní síly při protlačovací zkoušce vzorků

Zároveň byly během zkoušek využity záznamy z technologie DIC, která umožňuje sledování vzniku trhlin a posunů mezi ocelovým nosníkem a zabetonováním – včetně těch, které jsou pro lidské oko neviditelné. Vzhledem k časovým omezením však zatím nedošlo ke zpracování kompletních dat z DIC, která by mohla přinést podrobnější informace a výrazně přispět k formulaci přesnějších závěrů.

Naměřené hodnoty únosnosti uvedené v tabulce výrazně převyšují predikované hodnoty. Tento rozdíl může být způsoben několika faktory. Jedním z nich je skutečnost, že ve vědecké práci, ze které návrh vycházel, byla technologie PBL testována na menších vzorcích obsahujících pouze jeden prostup a jeden výztužný prut. V našich zkouškách však dochází ke spolupůsobení více prostupů, což může výrazně zvýšit míru spřažení a tím i celkovou únosnost.

Dalším z možných důvodů odchylky od předpokládaných hodnot může být diskontinuita mezi třemi plechy tvořícími stojinu, které jsou vzájemně spojeny pouze lokálně pomocí nýtů. Takové uspořádání se z hlediska tuhosti i přenosu vnitřních sil může chovat odlišně než ideální model tvořený jednolitým plechem, například typu P30.

Odchylky mohou být rovněž způsobeny vyšší skutečnou únosností nýtů oproti předpokladu. Určité rozdíly se objevily i mezi vzorky skupiny C – například vzorek C1 nebyl ještě svařený, což může vysvětlovat jeho nižší výslednou únosnost; po svaření detailů by pravděpodobně překročil hranici 2000 kN. Podobně lze u vzorku B1 předpokládat, že větší mezera umožňující prokluz ocelového prvku skrz obetonování by umožnila pokračování zatěžování až do fáze protlačení skrz UHPC a dosažení mezní síly minimálně nad 1000 kN.

Z rozdílných hodnot mezi výsledky vzorků typu A a C, které se konstrukčně liší pouze použitím technologie PBL u typu C, lze čistě teoreticky usoudit, že příspěvek této technologie ke zvýšení únosnosti by mohl být v rozmezí 100–150 kN. Přesnější kvantifikace však není možná kvůli omezenému počtu vzorků a variabilitě porušení.

Tento závěr navíc nemusí být relevantní, protože vzorky s vysokým počtem nýtů již vykazují takovou úroveň smykové odolnosti, že ve většině případech došlo k porušení vzpěrem stojiny dříve, než se mohl významněji uplatnit vliv PBL prvků. Zároveň vzorky typu B (pouze technologie PBL) vykazují také poměrně vysokou smykovou únosnost.

Jedním z potvrzení, že experiment alespoň do určité fáze probíhal správně, je sledování vzniku trhlin. U všech vzorků byl vznik trhlin v UHPC zaznamenán ještě před vybočením stojiny – a to jak trhlin viditelných pouhým okem, tak i těch, které byly detekovány technologií DIC. Toto chování naznačuje, že míra spřažení byla ve vztahu ke štíhlosti stojiny nadměrná. Objektivnějších výsledků a vhodnějšího průběhu zatěžování bychom pravděpodobně dosáhli úpravou vzorku, například odstraněním horní pásnice a části stojiny, čímž by bylo možné přenášet zatížení přímo do žádoucí části a omezit tak předčasné porušení vzpěrem.

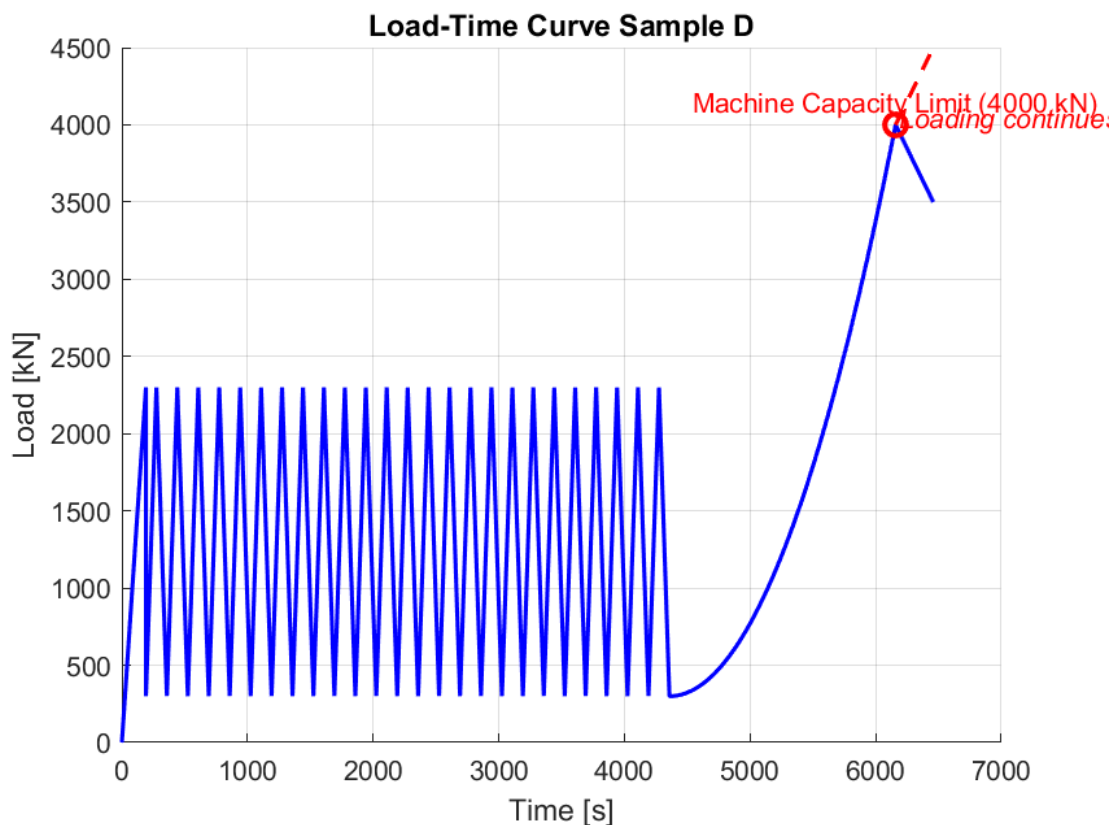
## 5.8 Experiment komplexního vzorku D

Zkušební vzorek D byl navržen tak, aby co nejvěrněji odpovídal geometrii a charakteru nadpodporových oblastí železničního mostu na trati Plzeň–Mladotice. Skládá se z hlavního nosníku profilu I a příčného ztužení stojiny pomocí ocelových úhelníků. Dolní pásnice nosníku byla odstraněna. Na vzorku D se nachází 25 nýtů podporujících smykovou pevnost a spřažení. Dále bylo do stojiny provedeno 8 prostupů pro použití technologie PBL a zadní část stojiny byla vyříznuta pro osazení konstrukční výztuže ve formě třmínků. Všechny komponenty přispívají na smykové únosnosti a celkovému spřažení technologie. Na obrázku níže můžeme vidět odbedněný vzorek D před provedením zatěžovací zkoušky.



Obrázek 5.45: Zkušební vzorek typu D - před provedení zkoušky

Zkouška však nebyla prováděna na hydraulickém lisu s kapacitou 2500 kN, který byl použit při testování malých vzorků typu A, B a C, ale na mechanickém lisu s vyšší maximální kapacitou 4000 kN. Tento lis je nicméně starší konstrukce a neumožňuje přesné řízení zatěžování prostřednictvím počítače. Nastavení rychlosti zatěžování bylo do značné míry improvizované – pro cyklické zatěžování se podařilo nastavit konstantní rychlost přibližně 12 kN/s, nižší hodnoty však nebylo možné dosáhnout. Vzhledem k potřebě pomalejšího zatěžování ve zbylém průběhu testu byl lis přepnut do manuálního režimu, ve kterém bylo zatížení postupně zvyšováno až na maximální hodnotu 4000 kN a následně plynule odlehčováno.



Obrázek 5.46: Zatěžovací křivka vzorku D



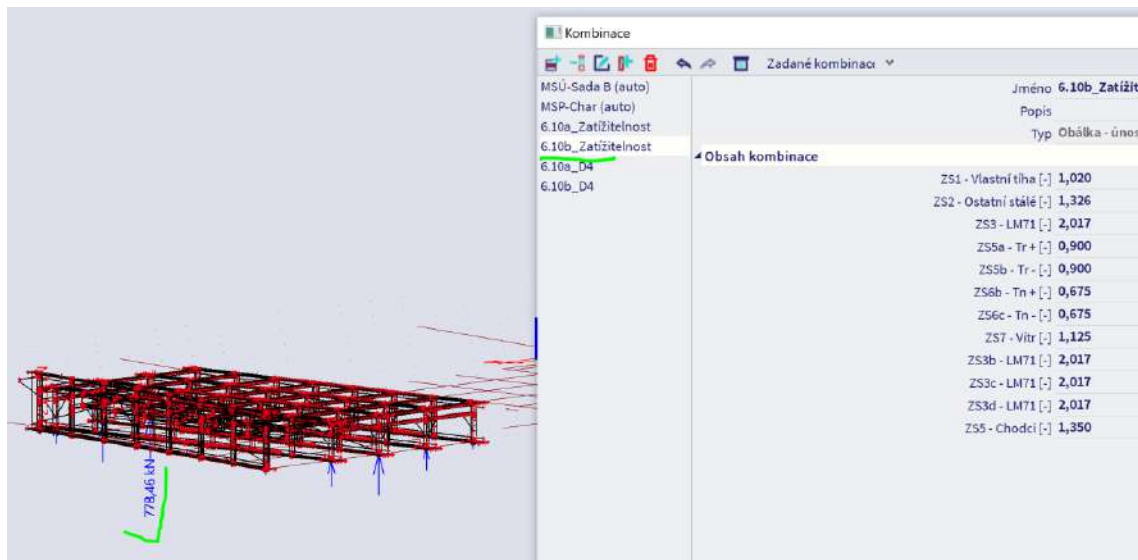
Obrázek 5.47: Mechanický lis s uloženým vzorkem D

Po provedení zkoušky nebyla na vzorku patrná žádná výrazná poškození, s výjimkou jedné trhliny v oblasti vyznačené na obr.5.48. Trhlina se viditelně projevila již v počáteční fázi zatěžování, což s vysokou pravděpodobností nasvědčuje tomu, že vznikla v důsledku tenké vrstvy UHPC za stojinou, případně v důsledku technologických nedostatků při betonáži – například nedostatečného ošetřování nebo objemových změn způsobených smršťováním.



Obrázek 5.48: Vzorek D po zatěžovací zkoušce

Vzorek D odolal maximálnímu zatížení 4000 kN, což však nepředstavuje jeho mezní únosnost, ale pouze maximální hodnotu, kterou bylo možné dosáhnout s použitým mechanickým lisem. Pro porovnání dosažených výsledků se skutečným namáháním konstrukce je níže uveden výstup z 3D modelu mostu, který ilustruje reakci v podpoře nosníku mostu.



Obrázek 5.49: Svislá reakce v podpoře nosníku

Ze snímku 5.49 lze vyčíst, že reakce v podpoře skutečné konstrukce dosahuje hodnot 778,5 kN. Z toho je patrné že vzorek několika násobně překonal potřebnou únosnost i před dosažením mezního zatížení.

# Závěr

V této práci jsme provedli experimentální ověření navržené technologie obetonování nadpodporových oblastí nosníku pomocí UHPC, určené pro rekonstrukci železničního mostu na trati Plzeň–Mladotice. Naměřené výsledky jasně překročily predikovanou únosnost vzorků, přestože se objevily nečekané způsoby porušení. Komplexní vzorek D, který nejlépe simuloval reálné podmínky mostu, při zatěžovací zkoušce nedošel k porušení, ačkoli by bylo vhodné provést zatížení až k predikované mezní síle.

Experiment potvrdil dostatečnou únosnost technologie obetonování s využitím UHPC a zároveň podrobně jsme podrobně popsali provedení zvolené technologie na mostě. avržený postup je vhodný, protože efektivně využívá specifických vlastností UHPC, jako jsou vysoká pevnost v tlaku, samozhutnitelnost a zvýšená odolnost vůči vlivům prostředí atd. Každá z vlastností je specificky potřeba při této rekonstrukci. Přestože je práce s UHPC časově náročnější a vyžaduje určitou adaptaci, technologie je proveditelná a perspektivní.

Díky ověřeným výsledkům je možné provést rekonstrukci mostu, čímž dojde k prodloužení jeho životnosti a současně se předejde nákladné a časově náročné výměně celé konstrukce, která by byla zdlouhavá a náročná na koordinaci železniční i silniční dopravy během oprav.

Hlavním omezením byla časová tíseň, která neumožnila kompletní analýzu dat z technologie DIC. Tyto údaje bychom následně porovnali s daty z hydraulického lisu, což by nám umožnilo získat přesnější výsledky. Analýza dat získaných pomocí technologie DIC představuje jednu z hlavních oblastí, ve které by měla tato práce pokračovat. Dalším možným směrem výzkumu by bylo vytvoření virtuálního modelu technologie, který by umožnil předvídaní chování zrekonstruované konstrukce mostu.

# Seznam obrázků

2.1	Oboustranná příložka šroubovaná[4] . . . . .	13
2.2	Příklad opraveného nýtovaného styčnicku[2] . . . . .	13
2.3	Schéma brzdného ztužení[2] . . . . .	14
2.4	Detail zesílení lepenou lamelou CFRP[2] . . . . .	15
2.5	Detail zesílení dodatečným předpínáním lamelou CFRP[5] . . . . .	16
2.6	Detail SMA zesílení mostu v Petrově nad Desnou[2] . . . . .	16
2.7	Graf růstu válcové pevnosti v závislosti na čase[8] . . . . .	17
3.1	Lokalita mostu[9] . . . . .	19
3.2	Ortomapa mostu[9] . . . . .	19
3.3	Pohled na most [9] . . . . .	20
3.4	Schéma nosníků mostu[9] . . . . .	20
3.5	Část výkresu archivní dokumentace - nadpodporová oblast[9] . . . . .	21
3.6	Degradace nosníků v poli . . . . .	22
3.7	Degradace nosníků v podporové oblasti . . . . .	22
3.8	Degradace opěr . . . . .	23
4.1	Schéma technologie PBL . . . . .	25
4.2	Ilustrace použití technologie PBL na vzorku . . . . .	25
4.3	Schéma návrhu technologie - podélný řez . . . . .	26
4.4	Schéma návrhu technologie - příčný řez . . . . .	26
4.5	Příklad technologie [11] . . . . .	27
4.6	Fotografie hlavního vzorku D - po vytvoření prostupů a odříznutí zadní části stojiny . . . . .	28
4.7	Schéma pro výrobu plechu P8 s výztužnými trny . . . . .	29
4.8	Hlavní vzorek s výztužnými pruty . . . . .	29

4.9	Bednění s hlavním vzorkem . . . . .	30
5.1	Dolní pásnice demontované příhradové konstrukce . . . . .	31
5.2	Část konstrukce zvolená pro vzorek typu D . . . . .	32
5.3	Část konstrukce zvolená pro vzorek typu A . . . . .	33
5.4	Část konstrukce zvolená pro vzorek typu B a C . . . . .	33
5.5	Výpočet excentricity zatěžovací síly na zkušební těleso typu D . . . . .	34
5.6	Připravené bednění pro zkušební tělesa . . . . .	35
5.7	Hydraulický lis - 2500kN . . . . .	36
5.8	Geometrie krychliček . . . . .	37
5.9	Krychličky pro pevnost v tlaku UHPC . . . . .	38
5.10	Geometrie válečku . . . . .	38
5.11	Válce pro Youngův modul pružnosti UHPC . . . . .	39
5.12	Průběh zatěžování pro zkoušku smykové pevnosti . . . . .	40
5.13	Setup DIC . . . . .	41
5.14	Princip DIC . . . . .	42
5.15	Nevhodné vzory . . . . .	43
5.16	Aplikace vzoru na zkušební tělesa . . . . .	43
5.17	Zkouška pevnosti v tlaku krychle C1 . . . . .	50
5.18	Zkouška pevnosti v tlaku krychle C2 . . . . .	50
5.19	Zkouška pevnosti v tlaku krychle C3 . . . . .	51
5.20	Zatěžovací cyklus válce D1 pro zjištění modulu pružnosti . . . . .	52
5.21	Deformace válce D1 . . . . .	53
5.22	Zatěžovací křivka vzorku C1 – závislost síly na čase . . . . .	54
5.23	Vzorek C1 po protlačovací zkoušce . . . . .	55
5.24	Provedení svarů . . . . .	55
5.25	Zatěžovací křivka vzorku C2 – závislost síly na čase . . . . .	56
5.26	Fotografie vzorku C2 – po provedení zkoušky . . . . .	56
5.27	Zatěžovací křivka vzorku C3 – závislost síly na čase . . . . .	57
5.28	Fotografie vzorku C3 – po provedení zkoušky . . . . .	57
5.29	Fotografie vzorku B1 – před provedením zkoušky . . . . .	58
5.30	Zatěžovací křivka vzorku B1 – závislost síly na čase . . . . .	59

5.31	Fotografie vzorku B1 – po provedení zkoušky . . . . .	59
5.32	Zatěžovací křivka vzorku B2 – závislost síly na čase . . . . .	60
5.33	Fotografie vzorku B2 – před provedením zkoušky . . . . .	61
5.34	Fotografie vzorku B2 – po provedení zkoušky . . . . .	61
5.35	Zatěžovací křivka vzorku B3 – závislost síly na čase . . . . .	62
5.36	Fotografie vzorku B3 – po provedení zkoušky . . . . .	62
5.37	Fotografie prokluzu vzorku B3 – po provedení zkoušky . . . . .	63
5.38	Fotografie vzorků typu A – před provedením zkoušky . . . . .	64
5.39	Zatěžovací křivka vzorku A1 – závislost síly na čase . . . . .	65
5.40	Fotografie vzorku A1 – po provedení zkoušky . . . . .	65
5.41	Zatěžovací křivka vzorku A2 – závislost síly na čase . . . . .	66
5.42	Fotografie vzorku A2 – po provedení zkoušky . . . . .	66
5.43	Zatěžovací křivka vzorku A3 – závislost síly na čase . . . . .	67
5.44	Fotografie vzorku A3 – po provedením zkoušky . . . . .	67
5.45	Zkušební vzorek typu D - před provedení zkoušky . . . . .	69
5.46	Zatěžovací křivka vzorku D . . . . .	70
5.47	Mechanický lis s uloženým vzorkem D . . . . .	71
5.48	Vzorek D po zatěžovací zkoušce . . . . .	71
5.49	Svislá reakce v podpoře nosníku . . . . .	72

# Literatura

- [1] F. Kramoliš, *Zesilování podporových styčniců ocelových mostů*. PhD thesis, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Praha, Česká republika, 2024.
- [2] Ryjáček, Pavel and kol., *Metody pro zajištění udržitelnosti ocelových mostních konstrukcí industriálního kulturního dědictví*. Praha: ČVUT. Fakulta stavební, 2022.
- [3] František Wald, Zdeněk Sokol - Acces Steel, “Postup řešení: Koroze ocelových konstrukcí,” tech. rep., České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Česká republika, 2024.
- [4] IDEA StatiCa, “Jak namodelovat oboustranné příložky,” 2025. Citováno dne 26. 4. 2025.
- [5] E. Ghafoori and A. Hosseini and R. Al-Mahaidi and Xiang-Ling Zhao and M. Motavilli, “Prestressed cfrp-strengthening and long term wireless monitoring of an old roadway metallic bridge,” *Engineering Structures*, vol. 176, pp. 585–605, 2018.
- [6] “Ultra vysokohodnotný beton (UHPC).” <http://www.ebeton.cz/pojmy/ultra-vysokohodnotny-beton-uhpc/>. [online; citovano 10.3.2025].
- [7] prof. Ing. Jan L. Vítek, CSc., FEng., “UHPC a jeho aplikace v konstrukcích.” <https://www.casopisstavebnictvi.cz/clanky-uhpc-a-jeho-aplikace-v-konstrukcich.html>. [online; citovano 10.3.2025].
- [8] Jan L. Vítek and Robert Coufal, “Vysokopevnostní betony a uhpc,” in *Betonové konstrukce 21. století – betony s přidanou hodnotou*, (Praha), pp. 43–49, Česká betonářská společnost ČSSI, 2021. Dostupné ve sborníku odborných příspěvků.
- [9] Ing. jakub Štěpán, prof. Ing. Pavel Ryjáček, Ph.D., *Diagnostika mostu v km 1,548 trati Plzeň-Mladotice včetně posouzení přechodnosti, studie zesílení a návrhu řešení*. ČVUT Fakulta stavební, 2025.
- [10] Shaohua He and Zhi Fang and Ayman S. Mosallam, “Push-out tests for per-fobond strip connectors with uhpc grout in the joints of steel-concrete hybrid bridge girders,” *Engineering Structures*, vol. 135, pp. 177–190, 2017.

- [11] Zachary B. Haber and Andrew Foden and Michael McDonagh and Justin Ocel and Kevin Zmetra and Benjamin Graybeal, “Design and construction of uhpc-based bridge preservation and repair solutions,” Final Report FHWA-HRT-22-065, Federal Highway Administration, Washington, DC, May 2022.
- [12] British Standards Institution, “BS EN 12390-3:2019 testing hardened concrete – part 3: Compressive strength of test specimens.” <https://shop.bsigroup.com/>, 2019. Standard.
- [13] International Organization for Standardization, “Iso 1920-10:2010 - testing of concrete – part 10: Determination of static modulus of elasticity in compression,” 2010.
- [14] “Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings.” <https://www.bsigroup.com>, 2004. British Standards Institution.
- [15] H. Shao-hua, H. Zhong, X. Huang, Y. Xu, and A. Mosallam, “Experimental investigation on shear fatigue behavior of perfobond strip connectors made of high strength steel and ultra-high performance concrete,” *Engineering Structures*, vol. 322, p. 119181, 01 2025.
- [16] MESING, spol. s r.o., “Jak funguje princip měření dic,” 2024. Citováno dne 1.5. 2025.
- [17] I. Correlated Solutions, “Fundamentals of speckling for dic.” <https://www.youtube.com/watch?v=z9QHc5K4X4A>, 2023. YouTube video, publikováno 21. prosince 2023.
- [18] B. A. Graybeal, “Compressive behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete,” *ACI Materials Journal*, vol. 104, no. 2, pp. 146–152, 2007.
- [19] M. Cimesa and M. A. Moustafa, “Uhpc modulus of elasticity: Assessment and new developments using companion materials and structural data,” *Engineering Structures*, vol. 310, p. 118146, 2024.
- [20] Zdeněk Sokol František Wald, *Ocelové konstrukce – Tabulky*. Praha, Česká republika: Česká agentura pro standardizaci, 2016.
- [21] Správa železnic, státní organizace, *SŽ S5/1 Diagnostika, zatížitelnost a přechodnost železničních mostních objektů*. Praha, Česká republika, 2021. Schváleno pod čj. 11728/2021-SŽ-GŘ-O13 dne 4. března 2021.

# Příloha A

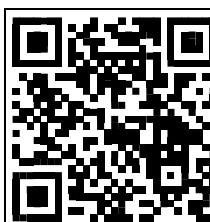
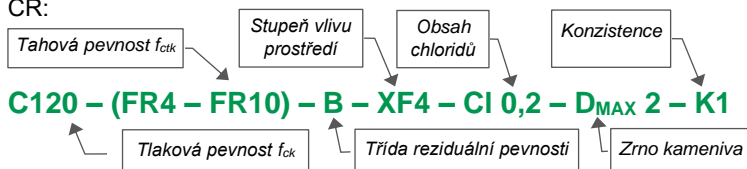
## Technické listy - UHPC

# UHPC

## ULTRA HIGH PERFORMANCE CONCRETE

ULTRA VYSOKOHODNOTNÝ BETON S ROZPTÝLENOU VÝZTUŽÍ JE MODERNÍ KOMPOZITNÍ MATERIÁL NA BÁZI CEMENTŮ, JEMNÝCH KAMENIV A NEJMODERNĚJŠÍCH CHEMICKÝCH PŘÍRAD, S VELMI NÍZKÝM VODNÍM SOUČINITELEM. DOSAHUJE VELMI VYSOKÝCH HODNOT FYZIKÁLNÍCH A MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ.

**Specifikace** UHPC<sup>1</sup> dodávaného společností KŠ PREFA s.r.o. je dle TP 267 Systému jakosti pozemních komunikací Ministerstva dopravy ČR:



**TP 267**  
**ULTRA VYSOKOHODNOTNÝ BETON (UHPC)**  
 Technické podmínky  
 Ministerstva dopravy  
 2024

**Mechanické parametry** UHPC nad rámec specifikace jsou dány tabulkou:

Veličina	zn.	jedm.	norma	hodnota		
				1 d	3 d	28 d
<b>Průměrná pevnost v tlaku</b> , krychle o hraně 100 mm	$f_{cm}$	MPa	ČSN EN 12390-3	> 74	> 93	> 139
<b>Pevnost v tahu za ohybu</b> , průměr, trámec 160 mm	$f_{ctm,f}$	MPa	ČSN EN 196-1	-	-	> 37
<b>Modul pružnosti</b> , střední hodnota, váleček průměru 150 mm	$E_{cm}$	GPa	ISO 1920-10	> 43	> 44	> 46

**Další parametry** UHPC:

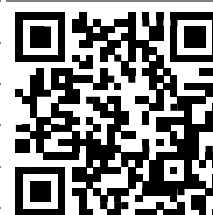
Veličina	zn.	norma	hodnota	jedm.
<b>Objemová hmotnost</b>	$\rho_m$	EN 12390-7	2450 <sup>2</sup>	kg/m <sup>3</sup>
<b>Hloubka průsaku</b>	WPT	EN 12390-8	3	mm
<b>Odolnost povrchu proti působení vody a CHRL</b>	CHRL	ČSN 73 1326 metoda C / 75 cyklů	40	g/m <sup>2</sup>
<b>Doba zpracovatelnosti</b>	$t_{max}$	-	90	min
<b>Obrusnost</b>	$R_o$	ČSN 73 1324	0,2	%

Konstrukční zásady pro navrhování prvků z UHPC dle TP 267 a se zohledněním technologie KŠ PREFA:

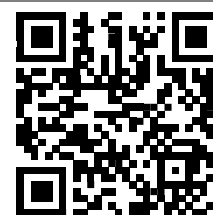
<b>Rozměry prvku</b>			
<b>Minimální tloušťka</b>	mm	28	
<b>Min. rozměr příčného řezu</b>	mm	42	
<b>Krytí (c<sub>min,b</sub>)</b>			
<b>Betonářská výztuž</b>	tř. X0 až XC4	mm	min (1,5 · d <sub>s</sub> ; 20)
	ostatní	mm	min (1,5 · d <sub>s</sub> ; 25)
<b>Soudržná před. výztuž</b>	lana	mm	min (3 · ø <sub>p</sub> ; 35)
	dráty	mm	min (3 · ø <sub>p</sub> ; 25)
<b>Kabel. kanálek</b>	mm	min (0,5 · ø <sub>e</sub> ; 50)	
<b>Kotevní a přesahové délky výztuže<sup>3</sup></b>			
Min. kotevní délka			10 · d <sub>s</sub>
Min. přesahová délka			15 · d <sub>s</sub>

**Tahové vlastnosti UHPC** dle TP 267:

Třída pevnosti v prostém tahu	Charakteristická pevnost v tahu za ohybu $f_{ctk,f}$ [MPa]
FR4	8
FR5	10
FR6	12
FR7	14
FR8	16
FR9	18
FR10	20



UHPC produkty  
KŠ PREFA



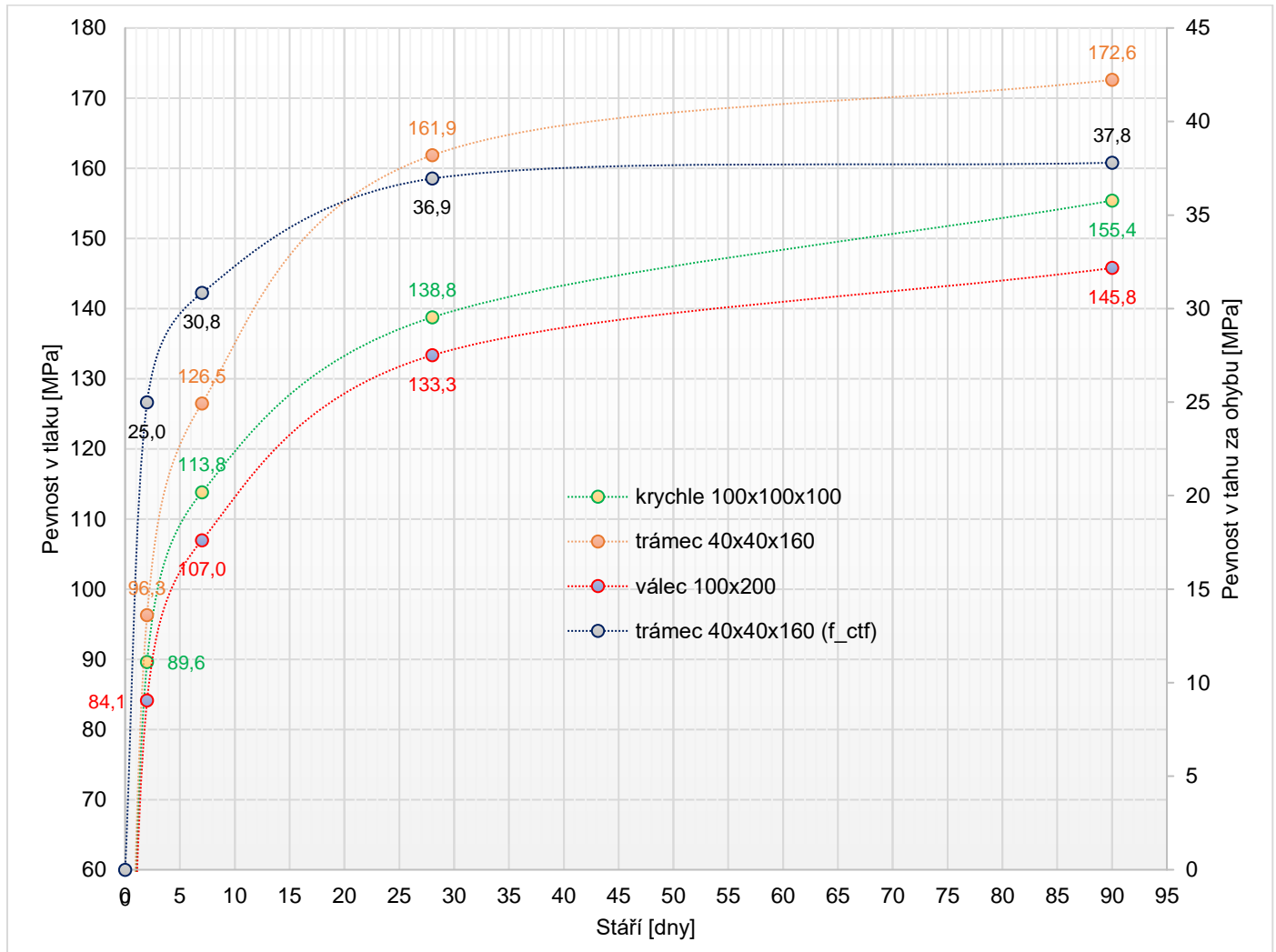
Mapa UHPC ČR

<sup>1</sup> UHPC se rozumí materiál s vyztužením matrice ocelovými dráty ve smyslu TP 267. Označení UHPFRC proto není používáno.

<sup>2</sup> Objemová hmotnost s ocelovými vlákny, bez betonářské výztuže.

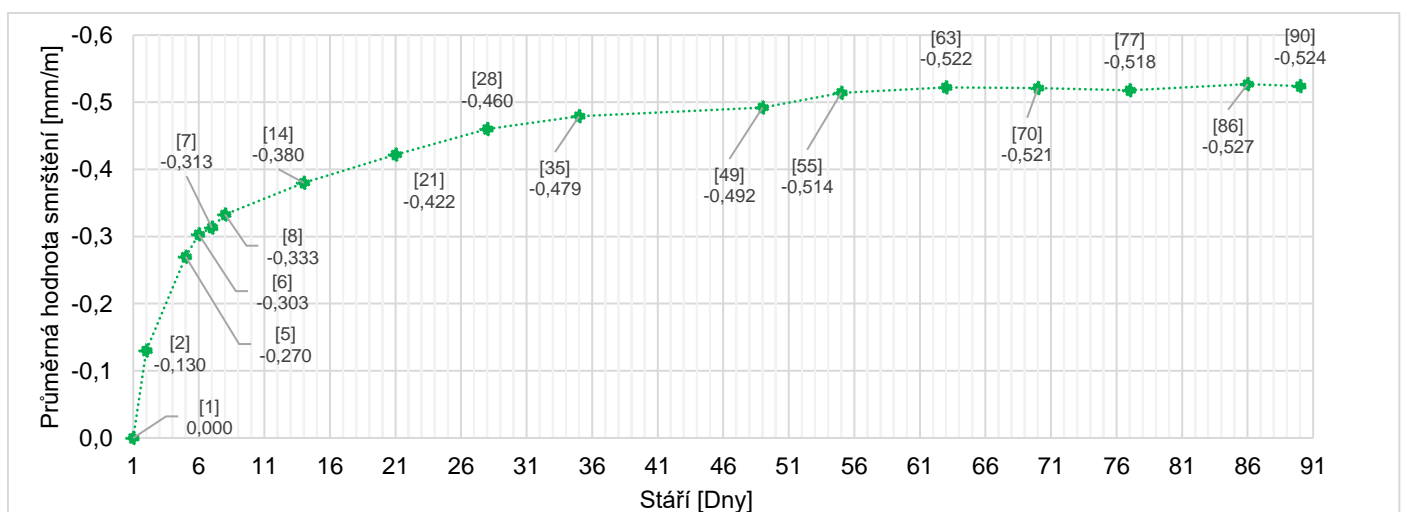
<sup>3</sup> Pro dynamicky namáhané konstrukce se hodnoty zvyšují o 50 %.

## Vývoj pevnosti UHPC v tlaku v čase, průkazní zkouška, provozovna Štětí



Uvedené pevnosti jsou stanoveny jako průměrné hodnoty získané dle ČSN EN 12390-3, resp. ČSN EN 196-1.

## Smršťování v čase



Graf uvádí smrštění UHPC v čase stanovené dilatometricky na trámcích 100×100×500 mm do stáří materiálu 90 dní.

## Protiskluznost

Výsledky zkoušek protiskluznosti povrchů UHPC lze nalézt v [Deklaraci protiskluznosti](#) KŠ PREFA.

# Příloha B

## Technické listy - drátky



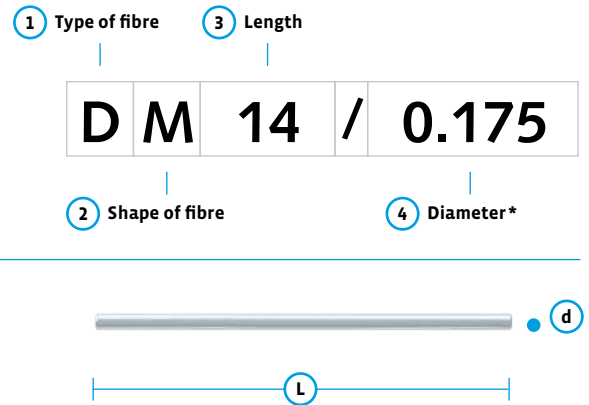
# KRAMPE HAREX®

## KNOW WHY.

### Data Sheet | Fibres

Version 01/2023

# WIRE FIBRE microfibre



#### GEOMETRY

① Type of fibre	wire fibre
② Shape of fibre	microfibre
③ Length	14 mm ± 10 %
④ Diameter*	0.175/0.200/0.220 mm ± 10 %
Cross section	round
Ratio (L/d)*	76

#### MATERIAL PROPERTIES

Material	steel
Material number	1,0620
Tensile strength	2,800 N/mm
Modulus of elasticity	210,000 N/mm

#### CERTIFICATIONS & SYSTEM APPROVALS

Standards	DIN EN 14889-1
Certifications (DIN)	EN ISO 9001:2015, EN ISO 50001



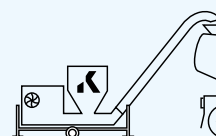
#### GENERAL FIBER INFORMATION

Quantity of fibres* (ref. 1kg)	~ 239,368 - 338,507
Total fiber length* (ref. 1kg)	~ 3,351 - 4,739 m

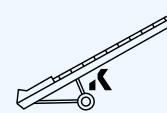
#### DOSAGE

Minimum dosage (CE)	-
---------------------	---

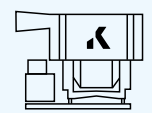
#### DOSIERGERÄTE



Fibre Blower



Conveyor belt



Automatic dosing system

#### SERVICE+

We give advice and recommendations on the right fibre, we help with the configuration and selection of a suitable dosing device.

You can also find more information at: [krampeharex.com](http://krampeharex.com)

\* The fiber diameter can be 0.175 mm and/or 0.200 mm and/or 0.220 mm. Subject to change without notice. All specifications are only a general description of our products.

#### INFO

- Application examples
- > Fibres for Ultrahigh compressive fibre reinforced concrete for overlay
- > Precast concrete elements
- > Security applications

#### SAFETY



Protective glasses



Gloves

#### PACKAGING (Standard)



**Bags**  
20 kg Bag  
1200 kg Palett



**Big Bag**  
500 kg Big Bag  
1000 kg Palett

#### STORAGE

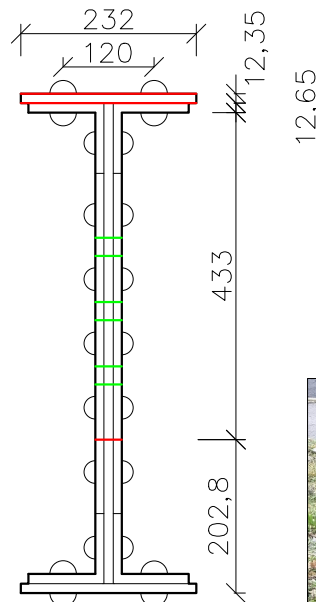
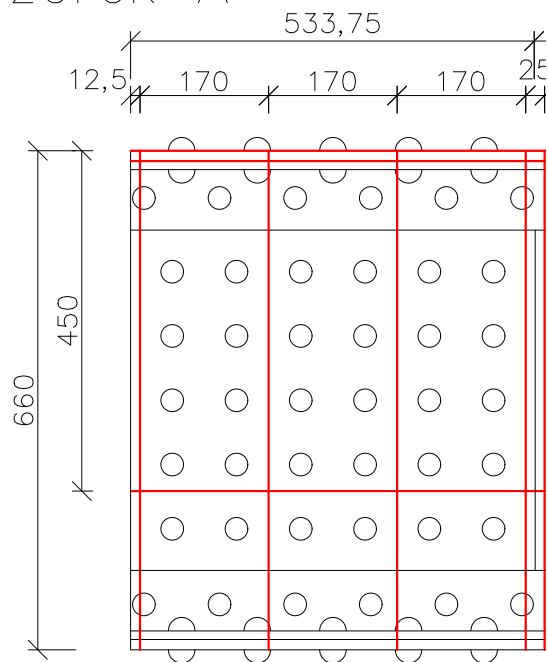


Keep Dry

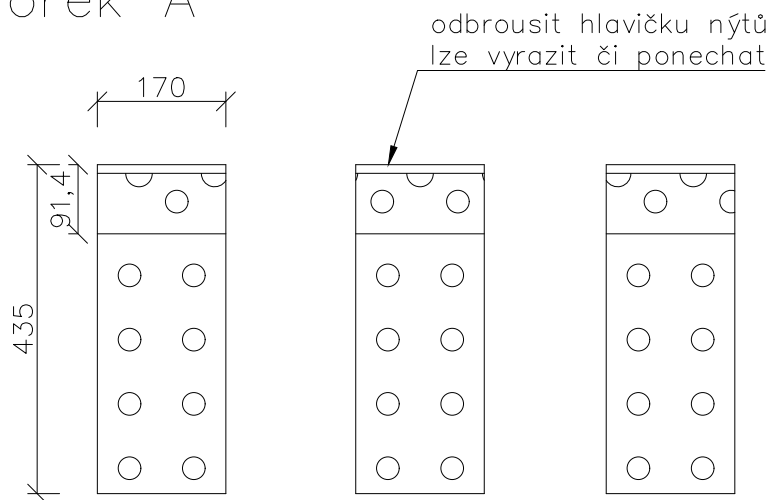
# Příloha C


## Výkresy

# Vzorek A

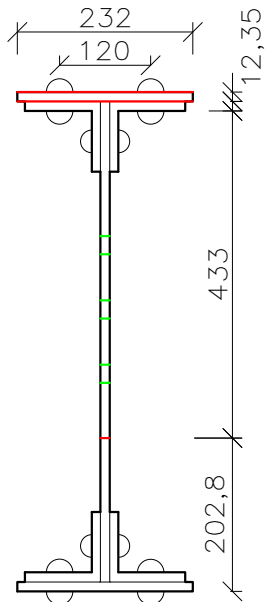
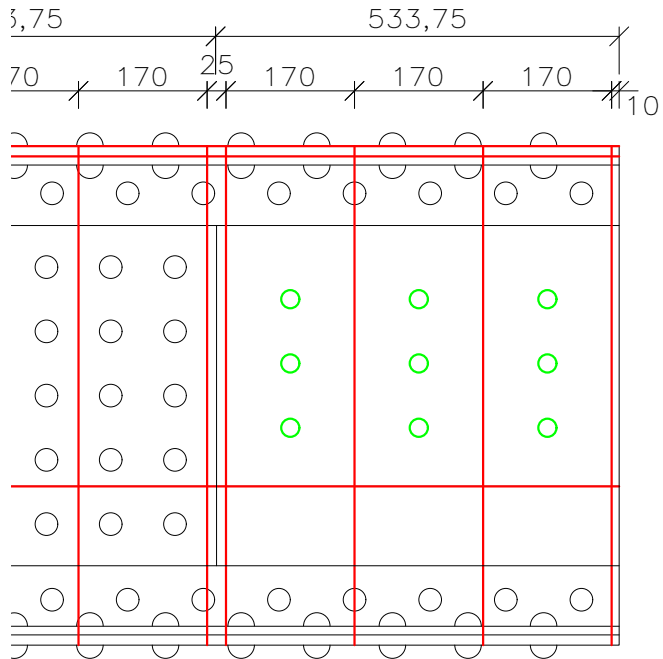


# Vzorek A



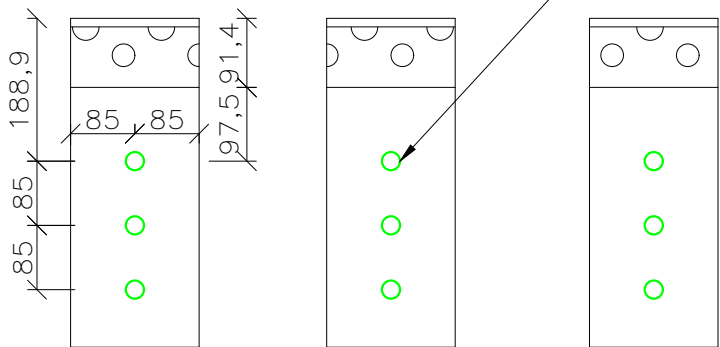
Zpracoval Martina Starýchfojtů	Konzultant	Školní rok 2025	Fakulta stavební ČVUT 
Akce: Zesílení podpor ocelových mostů pomocí UHPC			Datum 03/2025
Výkres: Vzorek A			Měřítko M 1:10
			Číslo výkresu 9


# Vzorek B



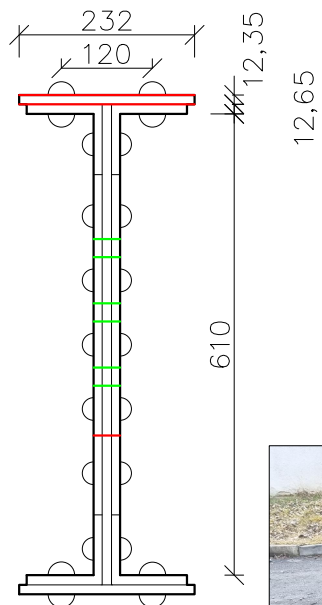
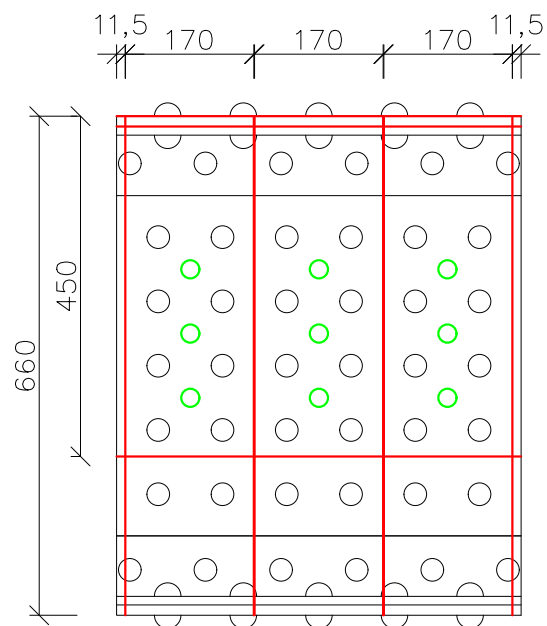
# Vzorek B

prostup 20/25 mm  
lze zvolit dle možností výroby

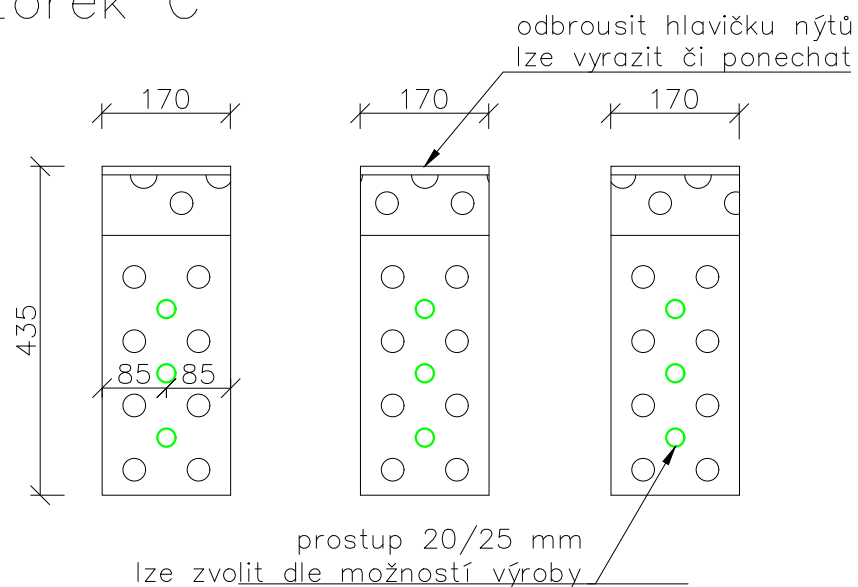



Zpracoval Martina Starýchfojtů	Konzultant	Školní rok 2025	Fakulta stavební <b>ČVUT</b> 	
Akce: <b>Zesílení podpor ocelových mostů pomocí UHPC</b>			Datum	03/2025
Výkres: <b>Vzorek B</b>			Měřítko	M 1:10
			Číslo výkresu	8

# Vzorek C

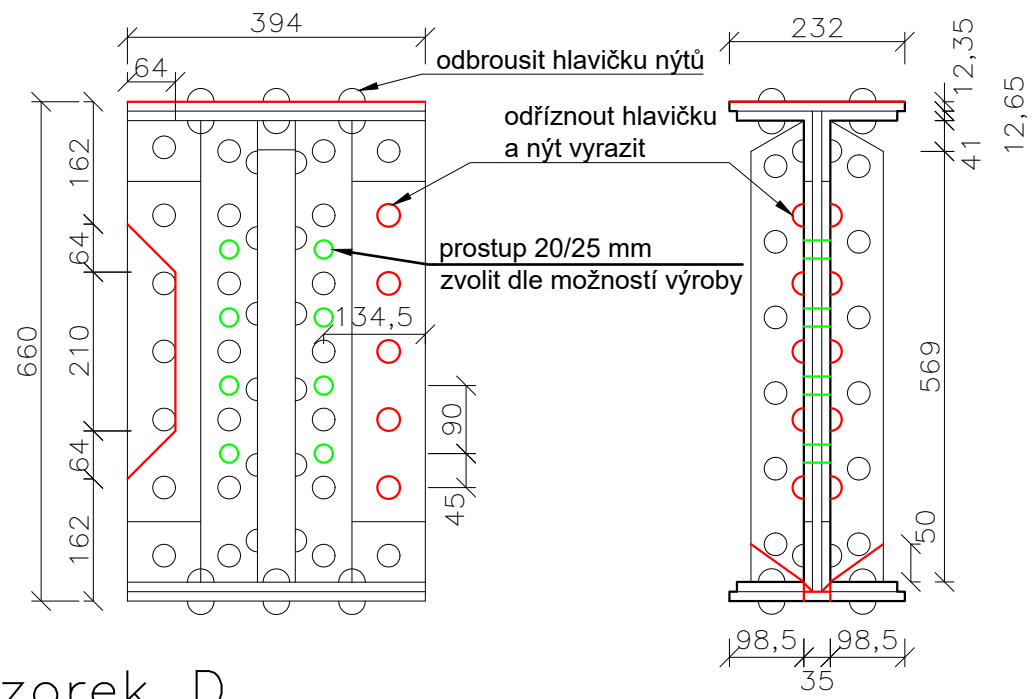


# Vzorek C

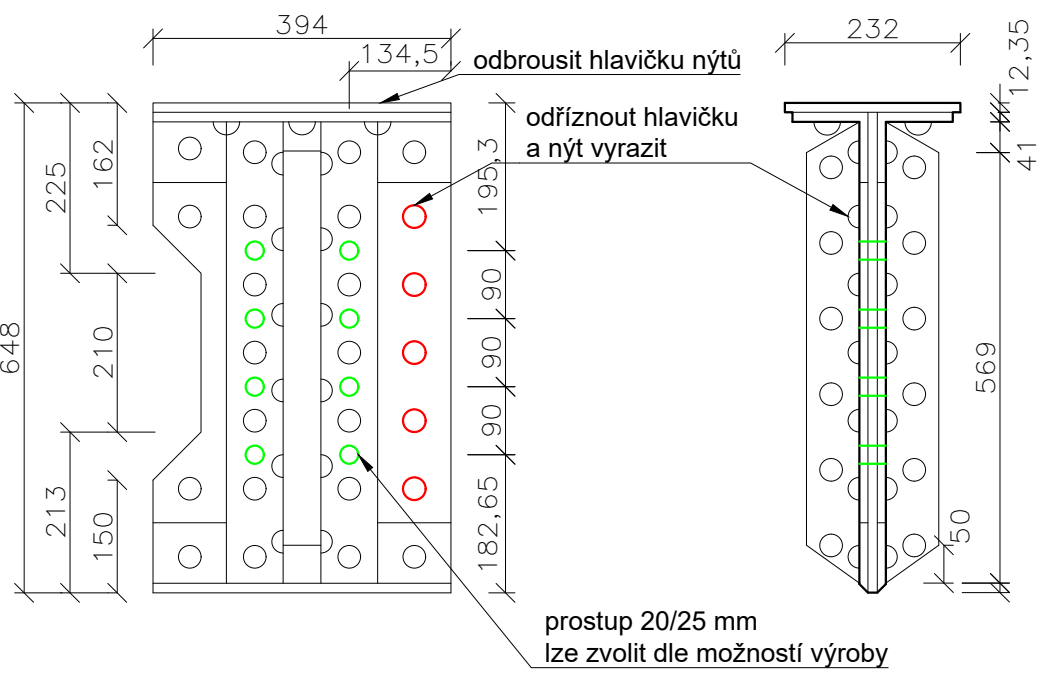



Zpracoval Martina Starýchfojtů	Konzultant	Školní rok 2025	Fakulta stavební ČVUT 
Akce: Zesílení podpor ocelových mostů pomocí UHPC			Datum 03/2025
Výkres: Vzorek C			Měřítko M 1:10
			Číslo výkresu 7

# Vzorek D – před řezu

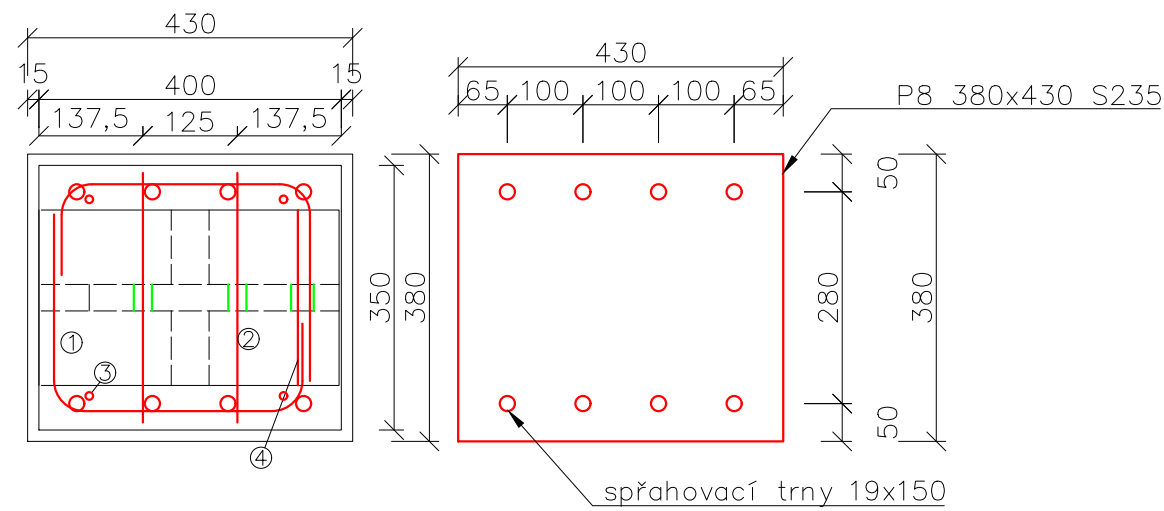
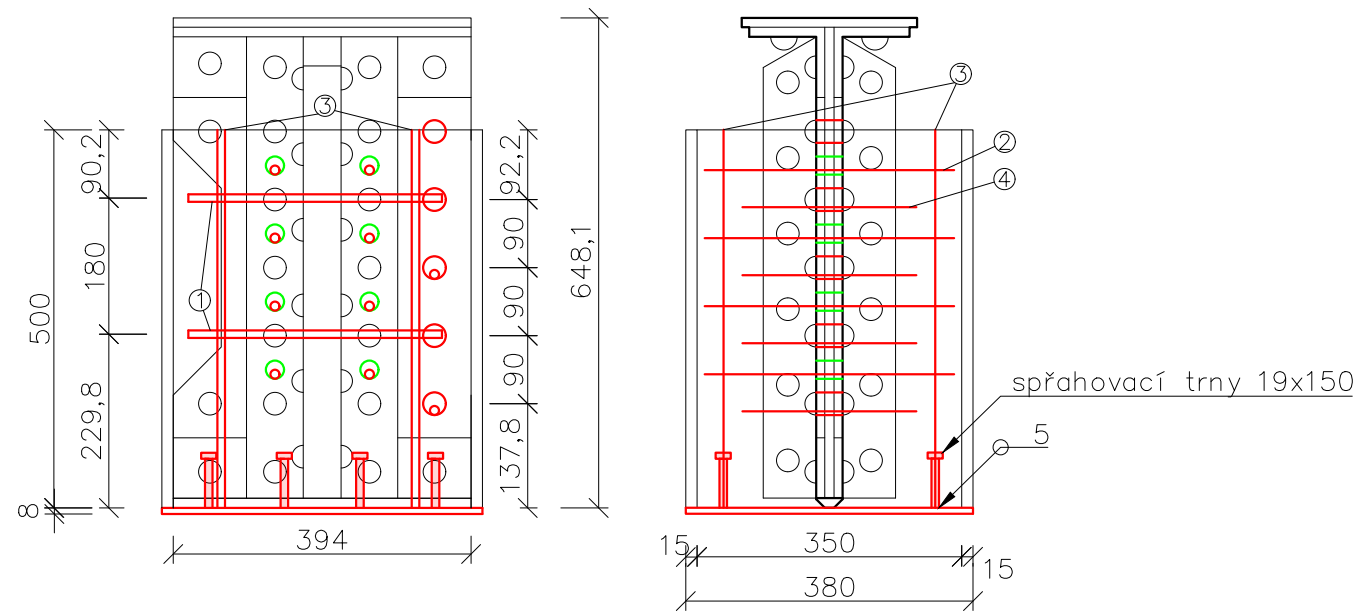


# Vzorek D

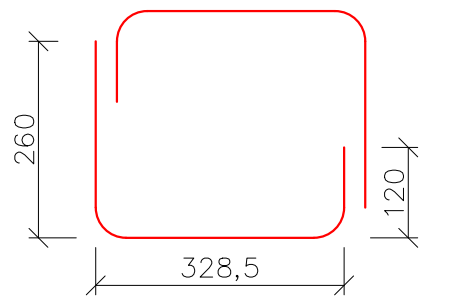


Zpracoval Martina Starýchfojtů	Konzultant	Školní rok 2025	Fakulta stavební <b>ČVUT</b> 	
Akce: <b>Zesílení podpor ocelových mostů pomocí UHPC</b>			Datum	03/2025
Výkres: <b>Vzorek D</b>			Měřítko	M 1:10
			Číslo výkresu	6

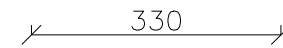
# Vzorek D



①  $\varnothing 10$ , 4ks, L=710mm



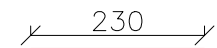
②  $\varnothing 12$ , 8ks, L=330mm



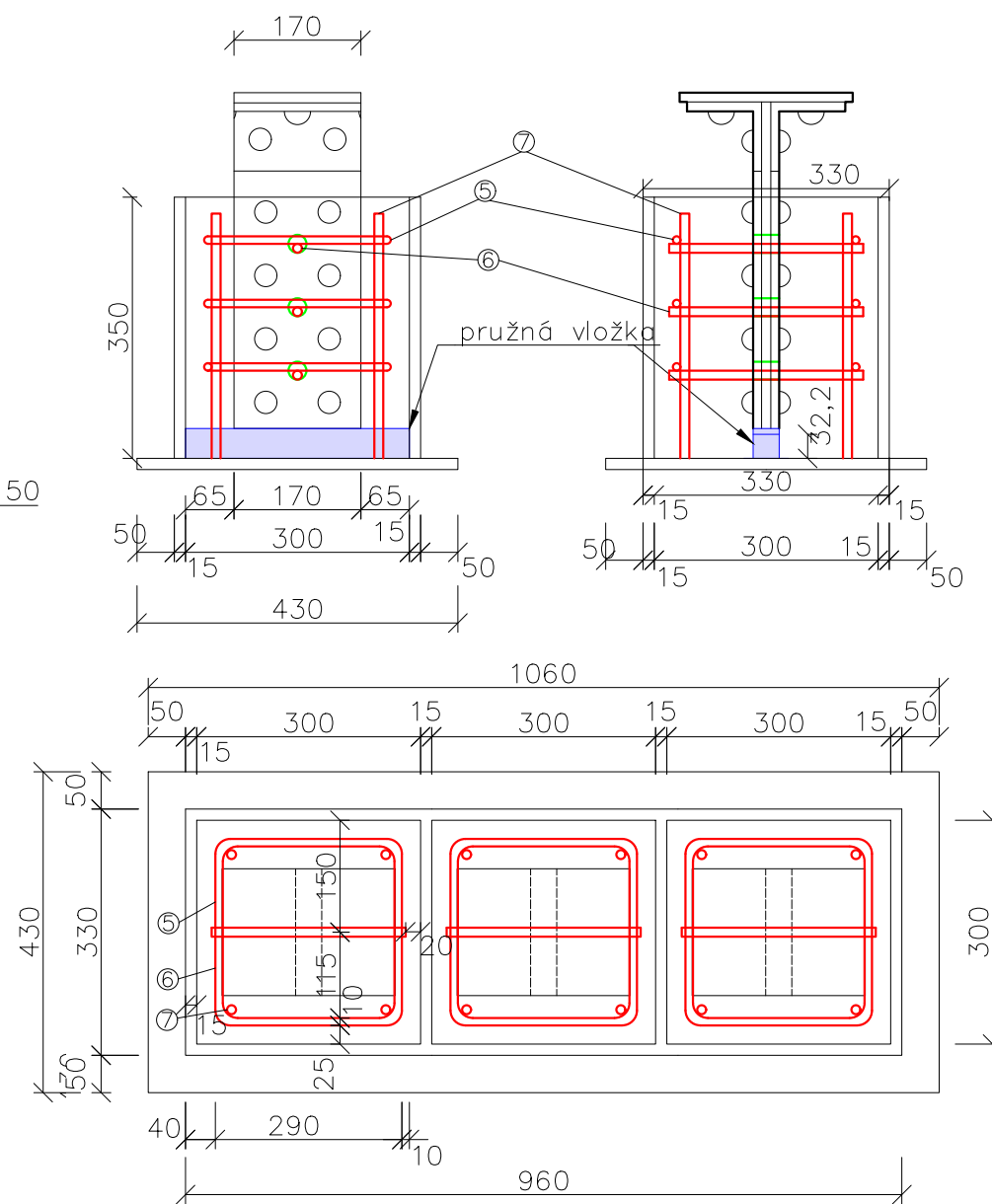
③  $\varnothing 12$ , 4ks, L=500mm



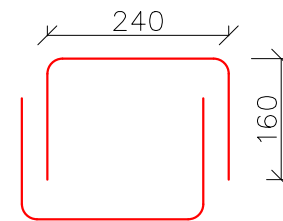
④  $\varnothing 10$ , 2ks, L=500mm



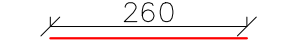
# Vzorky A, B, C



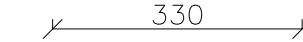
⑤  $\varnothing 10$ , 54ks, L=560mm



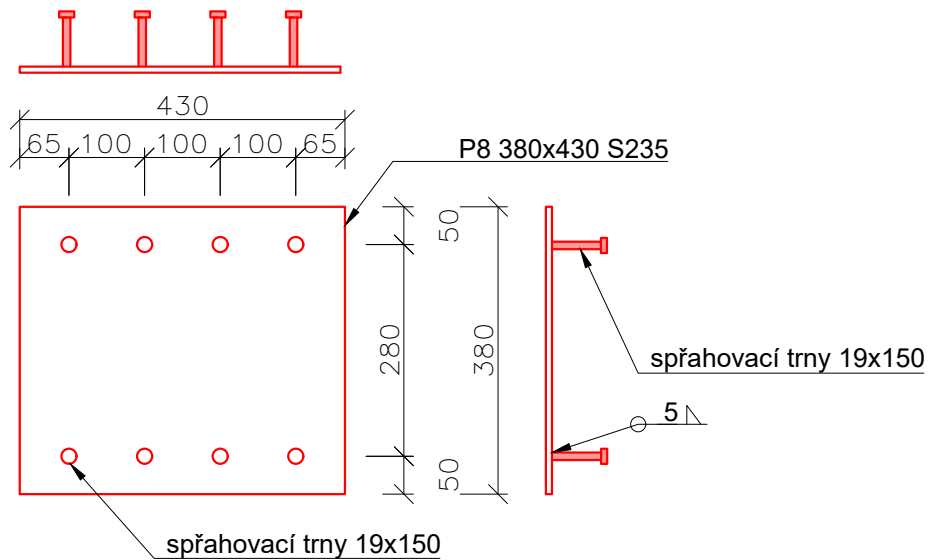
⑥  $\varnothing 12$ , 27ks, L=260mm




⑦  $\varnothing 12$ , 36ks, L=330mm



Zpracoval Martina Starýchfojtů	Konzultant	Školní rok 2025	Fakulta stavební ČVUT
Akce: Zesílení podpor ocelových mostů pomocí UHPC			Datum 03/2025
Výkres: Bednění vzorků s výztuží			Měřítko M 1:10
			Číslo výkresu 3



Zpracoval Martina Starýchfojtů	Konzultant	Školní rok 2025	Fakulta stavební <b>ČVUT</b> 	
Akce: <b>Zesílení podpor ocelových mostů pomocí UHPC</b>			Datum	03/2025
Výkres: <b>Plech</b>			Měřítko	M 1:10
			Číslo výkresu	10