

Diplomová práce



České  
vysoké  
učení technické  
v Praze

**F1**

Fakulta stavební  
Katedra konstrukcí pozemních staveb

## Předpínaný textilní beton

Experimentální ověření potenciálu předpínaného  
textilního betonu

**Tomáš Blažek**

Vedoucí práce: Ing. Tomáš Vlach  
Obor: Konstrukce pozemních staveb  
Leden 2020



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Blažek** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **438103**  
Fakulta/ústav: **Fakulta stavební**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra konstrukcí pozemních staveb**  
Studijní program: **Stavební inženýrství**  
Studijní obor: **Konstrukce pozemních staveb**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Výroba desek z předepnutého textilního betonu**

Název diplomové práce anglicky:

**Production of prestressed textile reinforced concrete slabs**

Pokyny pro vypracování:

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Tomáš Vlach, katedra konstrukcí pozemních staveb FSV**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **25.09.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **05.01.2020**

Platnost zadání diplomové práce: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
Ing. Tomáš Vlach  
podpis vedoucí(ho) práce

\_\_\_\_\_  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Jiří Máca, CSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta





# SPECIFIKACE ZADÁNÍ

Jméno diplomanta: Bc. Tomáš Blažek

Název diplomové práce: Experimentální ověření potenciálu předpínaného textilního betonu

Základní část: Konstrukce pozemních staveb podíl: 100 %

Formulace úkolů: - shrnutí současného stavu formou rešerže  
- návrh způsobu ověření potenciálu předpětí  
- návrh, zhotovení a ověření předpínací formy  
- výroba vzorků a provedení zatěžovací zkoušky  
- vyhodnocení výsledků a diskuze

Podpis vedoucího DP:.....



Datum: 25.9.

Případné další části diplomové práce (části a jejich podíl určí vedoucí DP):

2. Část: \_\_\_\_\_ podíl: \_\_\_\_\_ %

Konzultant (jméno, katedra): \_\_\_\_\_

Formulace úkolů: \_\_\_\_\_

Podpis konzultanta:.....

Datum: .....

3. Část: \_\_\_\_\_ podíl: \_\_\_\_\_ %

Konzultant (jméno, katedra): \_\_\_\_\_

Formulace úkolů: \_\_\_\_\_

Podpis konzultanta:.....

Datum: .....

4. Část: \_\_\_\_\_ podíl: \_\_\_\_\_ %

Konzultant (jméno, katedra): \_\_\_\_\_

Formulace úkolů: \_\_\_\_\_

Podpis konzultanta:.....

Datum: .....

Poznámka:

Zadání včetně vyplněných specifikací je nedílnou součástí diplomové práce a musí být přiloženo k odevzdané práci. (Vyplněné specifikace není nutné odevzdat na studijní oddělení spolu s 1. stranou zadání již ve 2. týdnu semestru)



## Poděkování

Rád bych zde vyjádřil poděkování mému vedoucímu Ing. Tomáši Vlachu za přátelský přístup a ochotu při psaní této diplomové práce. Nemalý dík patří všem mým kolegům z UCEEBu, za velkou ochotu a trpělivost při zodpovídání mých dotazů. Velký dík patří celé mé rodině, která při mne stála a podporovala mne po celou dobu mých studií. Stejně velké poděkování patří i mé přítelkyni Johance, která mě vždy dokázala motivovat a povzbudit do další práce.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, pouze za odborného vedení vedoucího Ing. Tomáše Vlacha. Dále prohlašuji, že veškeré podklady, ze kterých jsem čerpal, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

V Praze, 5. ledna 2020



## Abstrakt

Tato diplomová práce pojednává o potenciálu předepnutého textilního betonu. Princip předpětí, který je dnes běžně používanou součástí výstavby, je kombinován s rozvíjející se technologií textilního betonu, tj. betonu vyztuženého nekovovou výztuží. Jako výztuž je v této práci použita výztuž uhlíková, která vykazuje nejlepší mechanické parametry v porovnání s výztuží skleněnou nebo čedičovou. V rámci této práce je detailně popsána výroba předpínací formy, stejně jako problematika správně zvolené varianty syčení epoxidovou pryskyřicí. Výsledky jsou prezentovány na zkoušce čtyřbodovým ohybem, která poskytuje dostatečnou představu a základním ohybovém chování kompozitu.

### **Klíčová slova:**

vysokohodnotný beton, textilní výztuž, předpínání, forma, pryskyřice

### **Vedoucí práce:**

Ing. Tomáš Vlach  
Katedra konstrukcí pozemních staveb,  
Thákurova 7,  
166 29 Praha 6 - Dejvice

## Abstract

This diploma thesis deals with the potential of prestressed textile concrete. The prestressing principle, which is nowadays a commonly used part of construction, is combined with the developing technology of textile concrete, ie concrete reinforced with non-metallic reinforcement. As reinforcement is used in this work carbon reinforcement, which shows the best mechanical parameters in comparison with glass or basalt reinforcement. In this work is described in detail the production of prestressing mold, as well as the issue of correctly selected variant of saturation with epoxy resin. The results are presented in a four-point bend test, which provides a good idea of the basic bending behavior of the composite.

### **Keywords:**

HPC, textile reinforcement, prestressed, prestressing form, epoxy resin



# Obsah

<b>1 Úvod</b>	<b>1</b>	<b>4 Experimentální ověření</b>	<b>37</b>
<b>2 Rešeršní část</b>	<b>5</b>	4.1 Návrh formy na předpínání	37
2.1 Textilní beton	5	4.1.1 Měření skutečné síly vnesené do rovingu	38
2.2 Předpínaný textilní beton	9	4.1.2 Návrh a zhotovení předpínací dráhy varianta 1.	38
2.3 Ztráty předpětí	18	4.1.3 Návrh a zhotovení předpínací dráhy varianta 2.	42
2.3.1 Okamžité ztráty předpětí	19	4.2 Zkouška čtyřbodovým ohybem	45
2.3.2 Dlouhodobé ztráty předpětí	21	4.2.1 Princip zkoušky	45
<b>3 Materiály</b>	<b>23</b>	4.2.2 Výroba vzorků	45
3.1 Složení a základní parametry použitého betonu	23	4.3 Výroba rovingů s teplem vytvrzovanými pryskyřicemi	47
3.1.1 Cement	23	<b>5 Výsledky</b>	<b>49</b>
3.1.2 Superplastifikátory	24	5.1 Vnesená předpínací síla	49
3.1.3 Křemičitý úlet - mikrosilika	24	5.2 Výsledky ohybové zkoušky	51
3.1.4 Tlaková zkouška	26	5.2.1 Sikafloor 156	52
3.1.5 Zkouška v tahu za ohybu	26	5.2.2 LH 300	56
3.1.6 Zkouška konzistence střásáním	27	5.2.3 EPOREZIT EPOVILL-A	57
3.2 Technické textilie	29	5.3 Komplexní výsledky se zahrnutím ztrát předpětí	58
3.2.1 Spolupůsobení průřezu rovingu	30	<b>6 Diskuze</b>	<b>63</b>
3.2.2 Tahová zkouška uhlíkového rovingu	31	<b>7 Závěr</b>	<b>67</b>
3.3 Epoxidové pryskyřice	34	<b>A Přílohy</b>	<b>69</b>

**B Literatura**

**73**





## Obrázky

1.1 Graf principu předpjatého betonu [1] . . . . .	3	2.14 Závislost napětí na nespolepůsobící šířce trhliny [12] . . . . .	15
2.1 Výsledky zkoušky čtyřbodového ohybu na panelech z TRC. [2] . . . . .	6	2.15 Mezní grafy [13] . . . . .	15
2.2 Lávka z TRC, Albstadt. [3] . . . . .	7	2.16 Model ztrát předpětí [14] . . . . .	16
2.3 Budova Ballet am Rhein, Dusseldorf [4] . . . . .	8	2.17 Závislost průhybu na zatížení [15] . . . . .	17
2.4 Graf vybraných zkoušených desek na čtyřbodový ohyb [5] . . . . .	8	2.18 Graf výsledků [16] . . . . .	18
2.5 Graf závislosti ohybové únosnosti na posunu [6] . . . . .	9	2.19 Průřez dutinového panelu tl. 250mm [17] . . . . .	19
2.6 Průřez zkoušených nosníků [7] . . . . .	10	2.20 Schéma kuželíku a kotevní objímky . . . . .	20
2.7 Průběh napětí pro běžnou předpínací výztuž [7] . . . . .	11	2.21 Princip ztráty postupným předepínáním na konzole [1] . . . . .	20
2.8 Uchycení neipregnované výztuže [8] . . . . .	11	3.1 Schéma výroby cementu [18] . . . . .	25
2.9 Ohybová únosnost prvků s čedičem [9] . . . . .	12	3.2 Technologie výroby křemičitého úletu [18] . . . . .	25
2.10 Výsledky zobrazené grafem [9] . . . . .	12	3.3 Schéma tlakové zkoušky a reálná zkouška . . . . .	28
2.11 Počátečního a konečného čtení průhybu [10] . . . . .	13	3.4 Detail uhlíkového rovingu. [19] . . . . .	29
2.12 Tabulka počátečního a konečného čtení průhybu, napětí v GFRP výztuži a v betonu [10] . . . . .	13	3.5 Schéma rovingu [20] . . . . .	31
2.13 Graf porovnání vzniku trhliny [11] . . . . .	14	3.6 Detail uhlíkového rovingu. Převzato z technického listu výrobce. . . . .	32
		3.7 Stanovení průřezových charakteristik [21] . . . . .	32
		3.8 Variantní rozdíl v objímkách. [22] . . . . .	33

3.9 Graf závislosti síly na posunu příčnicku. ....	33	5.5 Graf závislosti napětí na posunu příčnicku v počátku zatěžování. ....	55
4.1 Modul pružnosti uhlíkového rovingu [20] .....	38	5.6 Trhliny vznikající u předepnutého prvku. ....	55
4.2 detail tenzometru .....	39	5.7 Graf závislosti napětí na posunu příčnicku pro vzorky s teplem vytvrzovanou pryskyřicí LH 300. ....	56
4.3 Návrh předpínací formy - varianta 1. ....	40	5.8 Graf závislosti napětí na posunu příčnicku v počátku zatěžování pro vzorky s teplem vytvrzovanou pryskyřicí LH 300. ....	57
4.4 Schéma detailu uchycení rovingu .....	40	5.9 Graf závislosti napětí na posunu příčnicku pro vzorky s teplem vytvrzovanou pryskyřicí EPOREZIT EPOVILL-A. . .	58
4.5 Kotvení rovingů do čelistí .	41	5.10 Graf závislosti napětí na posunu příčnicku v počátku zatěžování pro vzorky s teplem vytvrzovanou pryskyřicí EPOREZIT EPOVILL-A. . .	59
4.6 Návrh předpínací formy - varianta 2. ....	42	5.11 Graf závislosti síly na posunu příčnicku v počátku zatěžování .....	59
4.7 Detail rovingů opatřených chemickou maltou. ....	43	5.12 Graf závislosti napětí na posunu příčnicku v počátku zatěžování pro všechny předepnuté vzorky. ....	61
4.8 Konečná podoba formy včetně napnutých rovingů ...	44	6.1 Graf očekávané únosnosti .	65
4.9 Schéma momentu při zkoušce .....	45	A.1 Závislost síly na posunu příčnicku - Sika Floor 156 ...	70
4.10 Porovnání vzniku a eliminace trhlin .....	46	A.2 Závislost síly na posunu příčnicku - Sika Floor 156 ...	70
4.11 Pohled na pec .....	48		
5.1 Schéma umístění tenzometru .....	50		
5.2 Graf vyjadřující zbytkové napětí v závislosti na čase ..	51		
5.3 Graf závislosti síly na posunu příčnicku .....	53		
5.4 Graf závislosti napětí na posunu příčnicku. ....	54		

A.3 Závislost síly na posunu příčnicku - LH 300 . . . . .	71
A.4 Závislost síly na posunu příčnicku - LH 300 . . . . .	71
A.5 Závislost síly na posunu příčnicku - Eporezit Epovill - A	72
A.6 Závislost síly na posunu příčnicku - Eporezit Epovill - A	72

## Tabulky

3.1 Složení použité směsi HPC	24
3.2 Tabulka pevností . . . . .	27
3.3 Tabulka znázorňující ohybových pevností . . . . .	28
5.1 Tabulka výsledků zbytkového napětí v čase. Délka měření více než tři dny . . . . .	50
5.2 Tabulka znázorňující varianty předpínání . . . . .	52
5.3 Tabulka průřezů pro prvky sycené SIKA pryskyřicí . . . . .	53
5.4 Tabulka ztrát předpětí . . . . .	60
6.1 Tabulka očekávané únosnosti . . . . .	65
A.1 Tabulka výšky všech zkoušených vzorků . . . . .	69



# Kapitola 1

## Úvod

Cílem této diplomové práce je ověření možnosti předepnutí betonového průřezu nekovovou textilní výztuží. Betonová matrice je tvořena vysokohodnotným betonem (HPC z anglického high-performance concrete) s pevností v tlaku měřené na krychle s rozměry 100x100x100 mm přesahující hodnotu 130 MPa. Nekovová výztuž je velmi široký pojem a v rámci této diplomové práce je diskutováno především použití uhlíkové výztuže, která vykazuje nejlepší mechanické parametry v porovnání s dalšími nekovovými výztužemi jakými mohou být výztuž skleněná, popřípadě čedičová.

První aplikace použití textilních výztuží jsou k vidění například v Cáchách v Německu, kde je použito textilních výztuží do subtilních betonových desek [23], které jsou nadále využity jako fasádní panely. Další aplikace je v Mälmo [12], kde došlo k realizaci opláštění administrativní budovy společnosti Kontor. Významnou součástí stavebnictví, kde se lze také setkat s textilním betonem je v mostním stavitelství, kde jsou desky použity jako ztracené bednění mostovky. Takovouto realizaci lze najít například v Benátkách nad Jizerou.

V porovnání s běžným betonem, kdy je dávka cementu zhruba poloviční, má HPC výrazně lepší mechanické a další parametry, úzce související s trvanlivostí. Tyto vlastnosti předurčují HPC k použití v subtilnějších prvcích. Charakterem vysokohodnotného betonu je nízká pórovitost. Tento fakt umožňuje zhotovování konstrukcí s minimální tloušťkou krycí vrstvy, která je podmíněna dokonalým zakotvením rovingů, tedy nekovové výztuže. Fenomén v podobě karbonatace ocelové výztuže je zde eliminován.

Dalším významným faktorem, který je vhodné vzít v potaz při použití HPC, jsou enviromentální výhody, především omezení emisí oxidu uhličitého. Tento plyn, který přispívá ke skleníkovému efektu, je z velké části produkován cementárnami při výrobě cementu. Přestože dávka cementu do jednotky matrice vysokohodnotného betonu je výrazně vyšší v porovnání s betony

běžných pevností, tak celkové množství použité cementové matrice na funkčně stejný prvek vykazující lepší mechanické a trvanlivostní parametry je menší, což dává v konečném měřítku nižší hodnoty produkce oxidu uhličitého díky výsledné úspoře suroviny. Zjednodušeně řečeno, lze konstatovat, že i přestože je dávka cementu vyšší, tak je prvek značně subtilnější a cementu je celkově použito méně v porovnání s konvečními prvky o značně větších hmotnostech [19].

Hlavní cíl této práce je ověření možnosti dalšího vývoje prvků předepnutých textilními výztužemi a ukázání možného potenciálu této varianty vyztužení.

Motivací pro téma Předepnutí vysokohodnotného betonu nekovou výztuží byla vize výroby subtilních stropních deskových prvků, které nemají primárně nosnou funkci, ale budou fungovat i jako ztracené bednění bez nutnosti demontáže s následným vytvořením vlastní stropní konstrukce. Podobným typem konstrukce se ve své práci zabývali i kolegové z University of Cambridge ve svém výzkumu [24], ve kterém využívají kladných vlastností textilního betonu, a to především absence karbonatice a zesilují za pomoci textilních karbono-betonových skořepin klenuté stropy. V návaznosti na další práce shledávám možnost této aplikace jako vhodné a velmi zajímavé řešení i z architektonického směru, kdy prefabrikace potenciálních stropních prvků umožňuje dokonalou kontrolu výroby, eliminaci chyb při provádění a zajištění konstantnosti výroby s využitím vynikajících pohledových kvalit HPC.

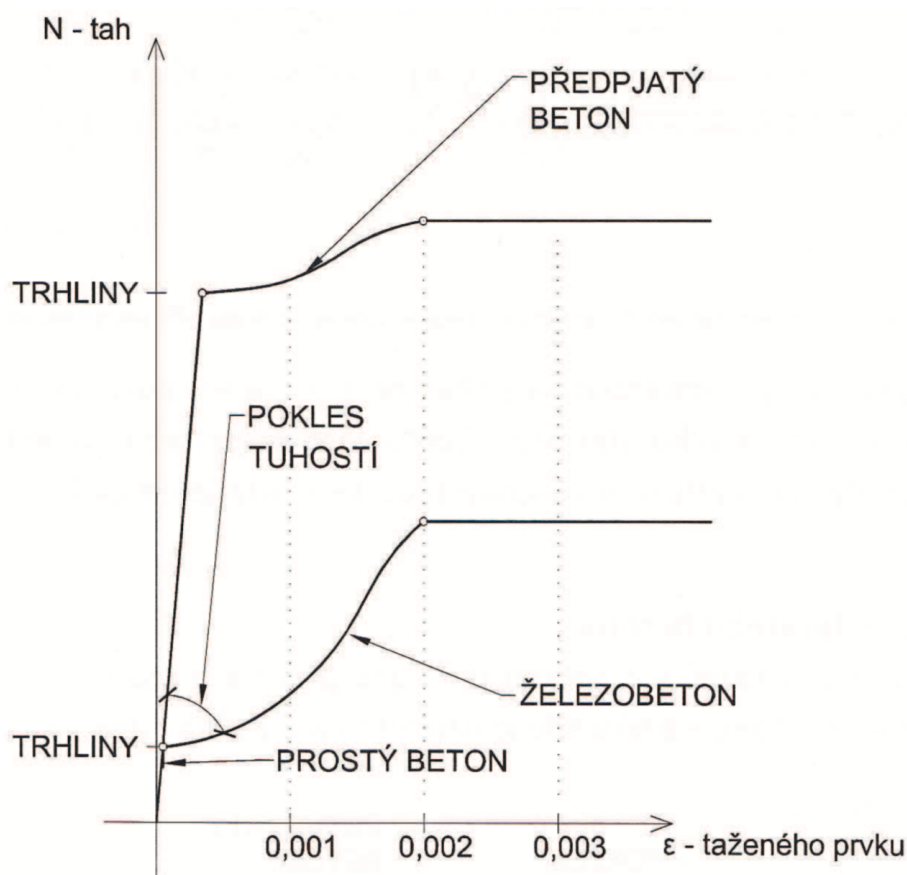
## Princip předpjatého betonu

Základní princip předpjatého betonu spočívá ve vytvoření tahové rezervy za pomoci vnesení tlaku do prvku. Tento jev lze názorně ukázat na následujícím grafu závislosti přetvoření na vnesené tahové síle. Je patrné, že pokud dojde k překročení tahové pevnosti betonu, tak dochází ke křehkému porušení. Tahová pevnost za ohybu betonu je běžně menší než 3MPa.

U překročení ohybové pevnosti železobetonového prvku dochází k rozvoji trhlin, avšak křehký lom je vyloučen a zatížení je přebíráno běžnou betonářskou výztuží. Zde dochází k rozvoji trhlin a následnému zvětšování jejich šířky. Lze konstatovat, že železobetonový prvek je výrazně únosnější než prvek z prostého betonu.

Prvek z předpjatého betonu z počátku vzdoruje díky tlakové rezervě, která do něj byla vnesena předpětím. Po vyčerpání této rezervy začíná beton působit v tahu. Až v případě dalšího zatížení a vyčerpání i tahové rezervy dochází ke vzniku trhlin. Z grafu je patrný odsun vzniku trhlin účinkem tlakové rezervy. (obr. 1.1)

*Prvek z předpjatého betonu je tedy schopen vzdorovat výrazně většímu tahovému zatížení před vznikem trhlin.* [1] Dalším doprovodným projevem snížení množství a šířky trhlin je také zvýšení trvanlivosti předpjatých prvků. Pro



Rozdíl v působení taženého prvku z prostého, železobetonového a předpjatého betonu

**Obrázek 1.1:** Graf principu předpjatého betonu [1]

názornost je zde popsán jednoduchý případ pro prostě podepřený předepnutý nosník.

Tento princip umožňuje prvku o stejných rozměrech vzdorovat většímu ohybovému zatížení před vznikem trhlin. Při stejném zatížení jako u železobetonového prvku - tedy v předpjatém prvku - nedochází k tak masivnímu rozvoji trhlin. Lze se setkat s trhlínami menšími a jejich menší koncentrací. Všechny tyto aspekty mají za následek zvýšení trvanlivosti konstrukce u předpjatých konstrukcí předepnutých ocelovou předpínací výztuží.

V rámci této práce nebude použita běžná ocelové výztuž, ale uhlíkový homogenizovaný roving. Homogenizace bude dosaženo za pomoci epoxidové pryskyřice. Je otázkou, zda bude možné uhlíkovou výztuž dostatečně předepnout tak, aby byl vliv předpětí jasně viditelný.





## Kapitola 2

### Rešeršní část

Výzkum vysokohodnotného betonu probíhá zejména v posledních dvou dekádách. Označení vysokohodnotný beton je částečně zavádějící, jelikož odborná literatura takto označuje betony s prakticky jakoukoliv přidanou hodnotou [25]. Ať už ve formě zvýšení tlakových pevností, ohybových pevností, ale také odolnosti proti mrazu, chemickým rozmrazovacím látkám a dalším. Velká část těchto možných zlepšených vlastností samozřejmě vzájemně koresponduje. Použití textilií v betonu je charakteristické snížením krycí vrstvy, a to z důvodu chemické (korozní) odolnosti vláken a epoxidové matrice. Takto vyztužený beton je označován jako TRC (textile reinforcement concrete, tj. textiliemi vyztužený beton).

Následující rešerše je rozdělena do třech kapitol, a to dle tématu, které jsou pro tuto práci charakteristické. Některé zdroje však lze obsáhnout do více kapitol, jelikož se témata vzájemně prolínají.

### 2.1 Textilní beton

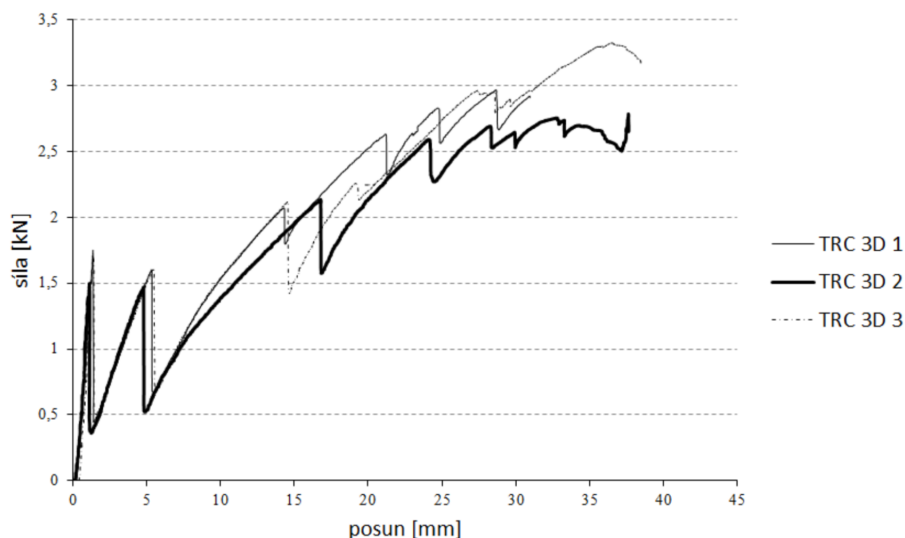
Textilní beton, který lze jednoduše charakterizovat jako beton vyztužený nekovovými textiliemi, a to především uhlíkovými, čedičovými, skleněnými a také organickými vlákny jako jsou např. lněné příze nebo bambusová vlákna. U textilního betonu se lze v poslední době setkat s jeho častějším užíváním v praxi, což je mimo jiné dáno jeho silným teoretickým základem, který přichází ze špičkových technických univerzit. Za zmínku stojí například Technická Univerzita v Drážďanech a Cáchách, které lze v Evropě označit za špičku nejen v tomto oboru. Použití textilií v rámci aplikací lze již vidět v běžně používaných konstrukčních prvcích především však primárně nenosného charakteru, jako jsou fasádní pláště nebo městský mobiliář.

V rámci tématu použití nekovových výztuží je nutné se zaměřit nejen na materiál dané výztuže, ale také na formu, resp. tvar. Tvarů a forem výztuží je dnes velké spektrum např: pruty, sítě, rovingy, rohože a další. Každá uvedená varianta je charakteristická také svými mechanickými vlastnostmi, které jsou přímo ovlivněny množstvím daného materiálu stejně jako jako vzájemným zapojením jednotlivých fibril. V rámci této práce bude ověřen předpoklad v podobě lepších mechanických vlastností u prvků sycených epoxidovými pryskyřicemi, kde lze předpokládat lepší spolupůsobení celého průřezu.

**Vlach, Laiblová a Ženíšek [2]** se ve své práci zabývají možnostmi alternativního vyztužení fasádních panelů z HPC za pomoci technických textilií. Konkrétně se jedná o 3D skelnou textilii. Pro ověření byly zvoleny běžné zkoušky dle ČSN EN 12390-3, tj. zkouška čtyřbodovým ohybem (obr. 2.1).

Autoři zde detailně rozdělují způsob porušení vyztužených desek do třech základních fází. Ve fázi první, kde je beton charakterizován elastickým chováním a absencí zapojení výztuže vzhledem k její malé ploše. Ve fázi druhé, kde dochází k rozvoji trhlin, se textilní výztuž chová lineárně a je vidět maximální tahová kapacita jednotlivých mezitrhlinových segmentů. V třetí fázi dochází k plastické deformaci textilní výztuže a následnému kolapsu desky.

Výsledkem je pozitivní zhodnocení možnosti použití skleněné textilie z důvodu dostatečně "bezpečného průběhu" po vzniku první trhliny, kdy průřez, po zapojení textilní výztuže, je schopen dále přenášet zatížení a je dosaženo vyšších hodnot síly než při dosažení první trhliny.



**Obrázek 2.1:** Výsledky zkoušky čtyřbodového ohybu na panelech z TRC. [2]

**Vogel [3]** se ve své práci zabývají využitím textilního betonu ve stávajících objektech. Autoři zde přináší pohled na realizace konstrukcí nosného charakteru, především lávek, skořepin a v rámci nenosných prvků také fa-

sádních panelů. První experimentální lávku lze nalézt v Německu. Lávka byla postavena na základě úzké spolupráce předního výzkumného ústavu v oblasti textilních betonů, kterým je Technická Univerzita Dresden a stavební společností Betonwerk Ochatz. Lávka byla zhotovena s rozměry 8,6m délky, a 2,5m šířky. Tloušťka segmentů, které zde jsou použity je pouze 30mm. Další aplikací textilií v betonu je značně rozsáhlejší stavba, kterou je 100m dlouhá lávka. Dle výpočtů je zde 50% úspora materiálu oproti klasické železobetonové konstrukci.



Obrázek 2.2: Lávka z TRC, Albstadt. [3]

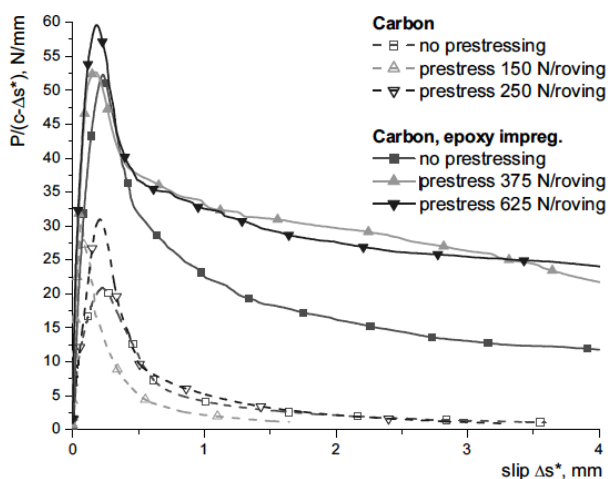
**Novotná a kolektiv** [4] se ve své práci zabývá možností aplikace textilního betonu jako možnosti pro výrobu fasádních panelů. (obr. 2.3). Autorka zde na reálném prvku vyzdvihuje možnost umístění skleněné výztuže do betonu a s tím spojené výhody nekovových výztuží a s tím spojené možnosti zachování minimální krycí vrstvy tak, aby nedocházelo k prokreslení výztuže na povrch a s tím spojenému snížení architektonického vjemu. Autorka zde poukazuje na snížení dopadu na životní prostředí, což lze předpokládat především ve fázi dopravy prvků na místo realizace. Všechny tyto aspekty jsou podpořeny snížením spotřeby primárních zdrojů a s tím znovu spojené eliminaci uhlíkových plynů, které prokazatelně ovlivňují zemskou atmosféru.

**Markus Krüger, Hans-Wolf Reinhardt a Martin Fichtlscherer** [12] se v této práci zabývají soudržností předepnutých uhlíkových a aramidových



Obrázek 2.3: Budova Ballet am Rhein, Dusseldorf [4]

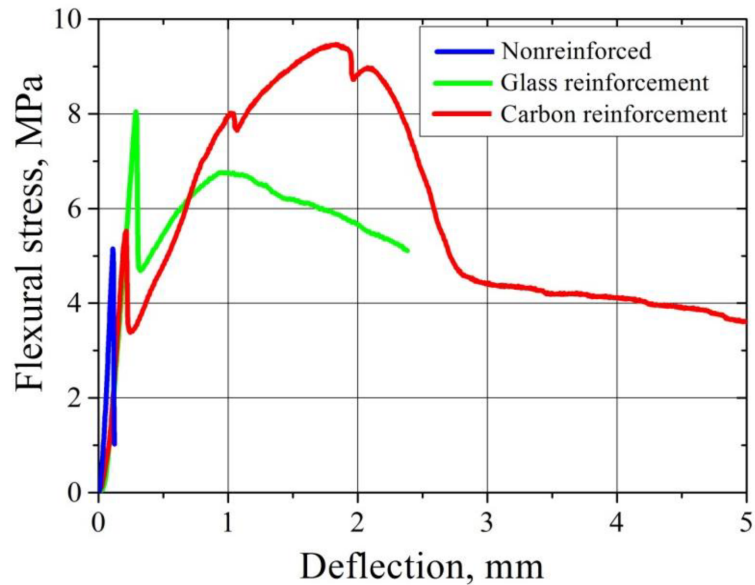
vláken v cementovém kompozitu o tlakové pevnosti kolem 75 MPa po 28 dnech. Autoři zde narážejí na odlišné chování textilní výztuže od FRP výztuží, které jsou dnes již běžně předpínány. Problematiku shledávají v nehomogenitě průřezu složeného z jednotlivých fibril, které společně nespolutupůsobí. Zásadním výsledkem autorů je použití epoxidové pryskyřice, která zajišťuje výrazné zlepšení spolupůsobení průřezu. Tento fakt dokládají na tahové zkoušce, kdy je viditelný patrný nárůst pevnosti v tahu, která roste zhruba na polovinu teoretické pevnosti. Autoři zde na grafu závislosti předpínací síly ku nespolutupůsobící délky na šířce trhliny dokládají lepších výsledků pro kompozity s vyšším předpětím.



Obrázek 2.4: Graf vybraných zkoušených desek na čtyřbodový ohyb [5]

Anna Volkova, Alexey Payko, Sergey Semenov, Oleg Stolyarov a Boris Melnikov [6] se v této práci zabývají ohybovou pevností textilních kompozitů. Alternativní výztuž je zde ve formě skleněné a uhlíkové textilie.

Další variantou je zkoušení vzorků bez výztuže, tak aby bylo porovnání kompletní. Všechny varianty s vyztužením ukazují na pozitivní vliv v rámci ohybové pevnosti, což lze předpokládat. Ohybová únosnost kompozitních prvků koresponduje s tahovou únosností jednotlivých materiálů, tedy prvky vyztužené uhlíkovou výztuží vykazují nejvyšší hodnoty únosnosti. Veškeré zkoušky byly provedeny na vzorcích tvaru kvádrů a odzkoušeny na trojbodový ohyb. Za zmínku stojí posunutí vzniku první trhliny, kde je nejlepší varianta ve formě prvků vyztužených skleněnou výztuží (obr. 2.5).



Graf závislosti ohybové únosnosti na posunu příčnicku pro nepředepnutou výztuž, skleněnou výztuž a uhlíkový roving

**Obrázek 2.5:** Graf závislosti ohybové únosnosti na posunu [6]

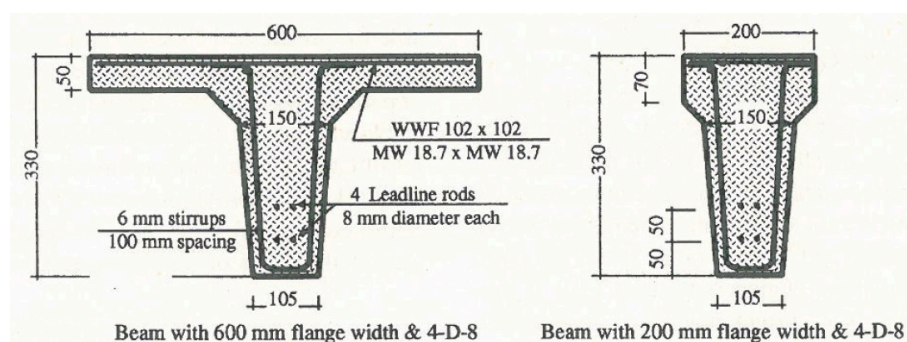
## 2.2 Předpínaný textilní beton

Na začátek je vhodné věnovat alespoň obecně jeden odstavec předpínaným konstrukcím, kde je jako předpínací výztuž použita v podobě kabelů a lan z ocelí vysokých pevností až 2000 MPa. Předpínaný beton a jeho princip lze označit za již běžně používaný systém, a to především u vysokorozponových staveb jako jsou mosty nebo stropní desky, kde je zapotřebí minimalizovat umístění svislých nosných konstrukcí, sloupů. V současnosti může být chápán jako rizikový stavební prvek pro laickou veřejnost, kdy dochází k progresivním kolapsům mostů ať již ve světě, např. Janovský most, tak i v České republice, tj. Trojská lávka. V současné době (prosinec 2019) je stále nejasná přesná příčina kolapsu výše uvedených konstrukcí.

Předpínání textilních konstrukcí je v určitém směru již poměrně známou

technologickou variantou. Jedná se o variantu s předpínanými CFRP pruty, které lze uchytit do standardních předpínacích zařízení. Jedná se o nekovovou výztuž ve formě prutů, které jsou svým tvarem podobné ocelovým. Další variantou jsou však konstrukce, kdy je výztuž s výrazně menšími průřezy, ale s výrazně hustší sítí. Oba tyto systémy mají své výhody a nevýhody, které charakterizují jejich použití. Jak již bylo řečeno v úvodu této kapitoly, tak obě tyto možnosti vykazují pozitiva především v trvanlivosti.

**Amr A. Abdelrahman, Sami H. Rizkalla** [7] se v této práci zabývají jedním z prvních předepnutých betonových prvků za pomoci CFRP výztuží (carbon fiber reinforced polymer - kompozitní uhlíková výztuž). Výztuž je uložena do bednění tvaru T profilu. Délka nosníku je 6,2m. Detail průřezu je patrný z obrázku (obr. 2.6). Z výsledků je patrný odlišný způsob porušení u prvků vyztužených CFRP výztuží a prvků vyztužených běžnou předpínací výztuží. U CFRP prvků dochází k menšímu množství trhlin a jejich následnému rozvoji, ale u ocelových kabelů je patrný rozvoj většího množství trhlin. Celková únosnost při stejném předpětí je charakteristická větší hodnotou pro CFRP vyztužený nosník (obr. 2.7). Dalšími výsledky autorů je měření šířky trhlin.



**Obrázek 2.6:** Průřez zkoušených nosníků [7]

**W. Brameshuber, T. Brockmann** [8] se v této práci zabývají komplexním přehledem technologie výroby kompozitních betonových prvků. V poslední kapitole mimo jiné rozebírají možnost předepnutí impregnovaných a neimpregnovaných textilií. Narážejí na problém v podobě malé příčné pevnosti rovingu, která je zásadní u neimpregnovaných výztuží, kdy dochází k polámání jednotlivých fibril rovingu. Autoři zde ukazují návrh předpínacího zařízení pro neimpregnované i impregnované rovingy, které mají zásadní rozdíly právě z důvodu nepřenesení napětí v rámci průřezu a tím způsobené již zmíněné polámání. Právě způsob uchycení neimpregnovaných rovingů pomocí prosycení konců pryskyřicí a následnému sevření mezi dva profilované ocelové plechy je s úpravou použita i v této práci (obr. 2.8).

**Yunxing Du, Mengmeng Zhang a Fen Zhou, Deju Zhu** [9] se ve své práci zabývají aplikací vrstev čedičových textilií do betonového prvku. Dochází zde ke srovnání výsledků v závislosti na množství vrstev. Jednotlivé vrstvy



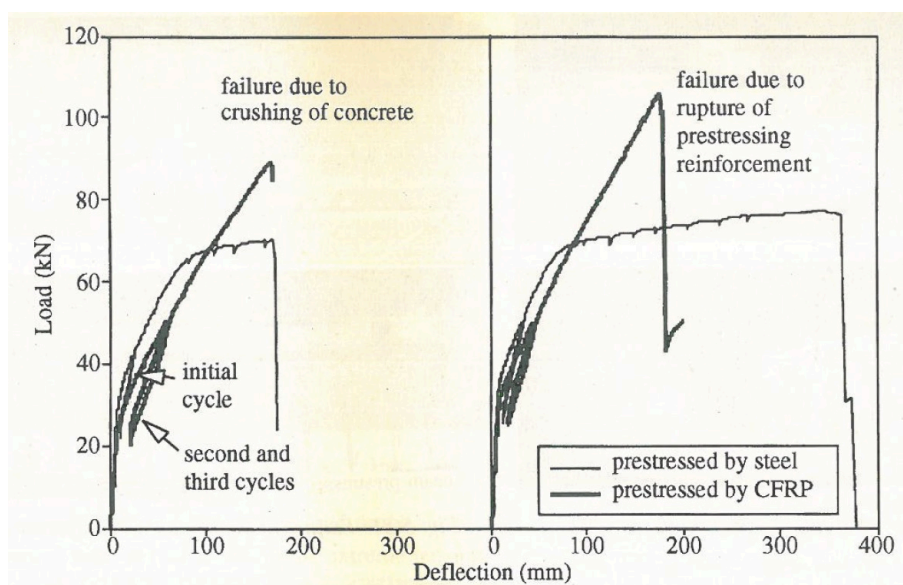
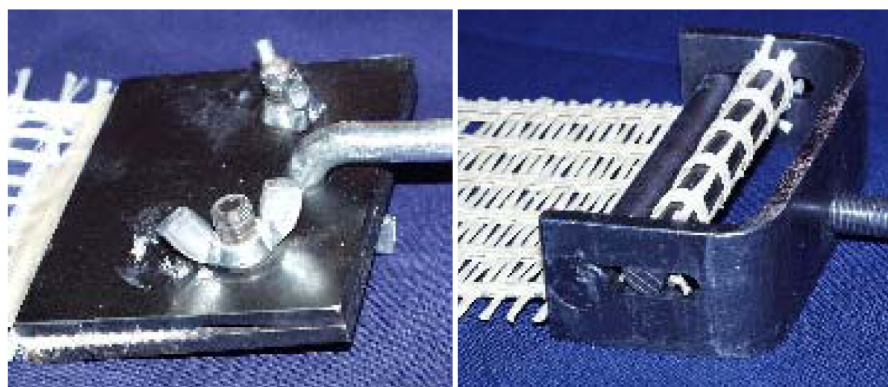


Fig. 6—Load-deflection of beams prestressed by CFRP and steel

Průběh napětí na průhybu pro běžnou předpínací výztuží vyztužený nosník (tenká čára) a pro CFRP vyztužený nosník (silná čára)

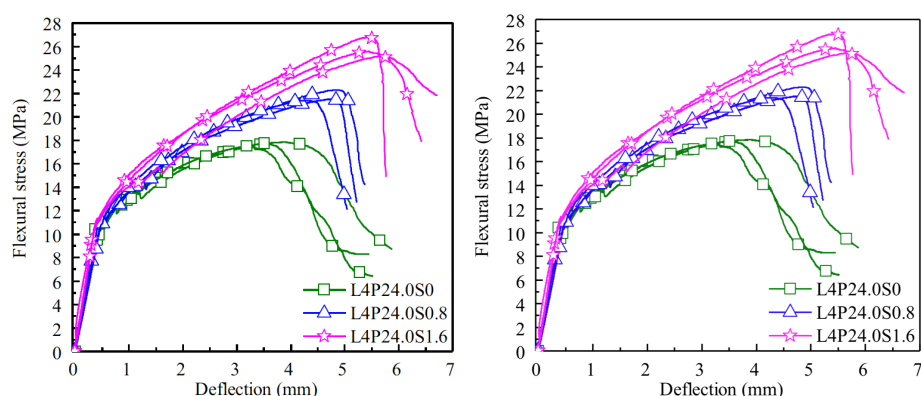
**Obrázek 2.7:** Průběh napětí pro běžnou předpínací výztuž [7]



Ukázka uchycení neimpregnované výztuže mezi dva profilované (levý obrázek), uchecení, kde je umožněné navíjení a tím předpínání (pravý obrázek)

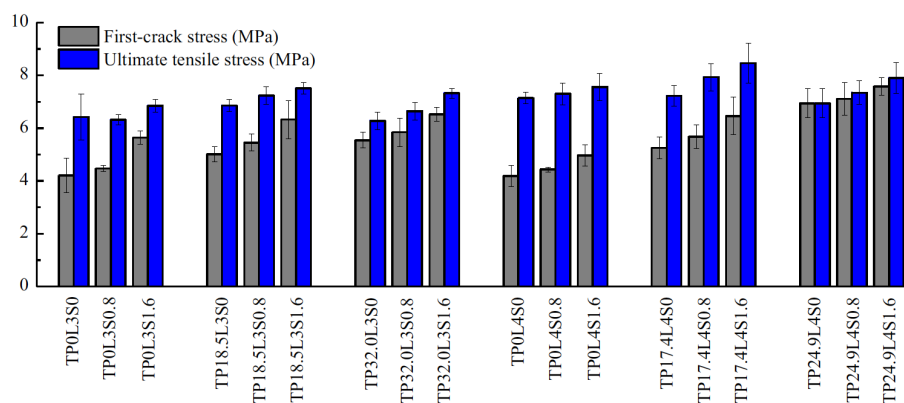
**Obrázek 2.8:** Uchycení neimpregnované výztuže [8]

jsou předepnuty za pomoci jednoduchého zařízení, u kterého dochází vždy po 24 h ke kontrole napětí a případnému dopnutí vrstev. Při absenci výrazné ztráty napětí ve vrstvě po 24 h dochází k zabetonování. Výsledky ukazují, že jedna nebo dvě vrstvy nemají pozitivní vliv na únosnost prvku. Při aplikaci tří, čtyř, nebo pěti vrstev, dochází k nárůstu únosnosti prvku v tahu. (obr. 2.10) Další alternativa pro předepnuté prvky je zde ukázána jako alternativa s cementovou matricí a přidáním rozptýlené výztuže v podobě ocelových drátků. Tento typ matrice poskytuje další zvýšení tahové pevnosti prvku. Práce nadále poukazuje na ztrátu předpětí u TRC (textile reinforcement concrete)



Vlevo uvedeny prvky se čtyřmi vrstvami výztuž. Vpravo prvky s pěti vrstvami výztuže. V obou variantách zahrnuty sady s předpětím

**Obrázek 2.9:** Ohybová únosnost prvků s čedičem [9]



Vyjádření výsledků za pomoci grafu, kde je viditelný vliv množství vrstev výztuže a koncentrace drátků, v závislosti na napětí. Barvy odlišují vznik první trhliny a maximální dosaženou únosnost

**Obrázek 2.10:** Výsledky zobrazené grafem [9]

Mohamed Zawama, Khaled Soudkia, Jeffrey S. Westa [10] se ve své práci zabývají tématem poklesu napětí v FRP prutových výztužích po jejich předepnutí. (obr. 2.12) Dále pak dotvarováním nosníků, resp. zvětšujícím se průhybu v závislosti na míře zatížení, velikosti předpětí a



délce trvání zatížení. Míra zatížení je zde volena v hodnotě 33% teoretické maximální hodnoty únosnosti prvku. Míra předepnutí výztuží je volena na 25, resp. 40% tahové pevnosti. Způsob předepnutí je standardním způsobem za pomoci předpínacího zařízení běžně používaného pro ocelové předpínací lana a tyče. Výsledky jsou shrnuty do několika kategorií. Poukazují na, dle autorů neměřitelný, pokles napětí lan. Dále poukazují na absenci zásadního vlivu tlakové pevnosti betonu na dlouhodobé výsledky zatížení. Poukazují na nepřímou souvislost mezi dlouhodobou deformací a průměrem FRP výztuží.

Initial and final readings for deflection, concrete strains and GFRP strains for all sustained load beams.

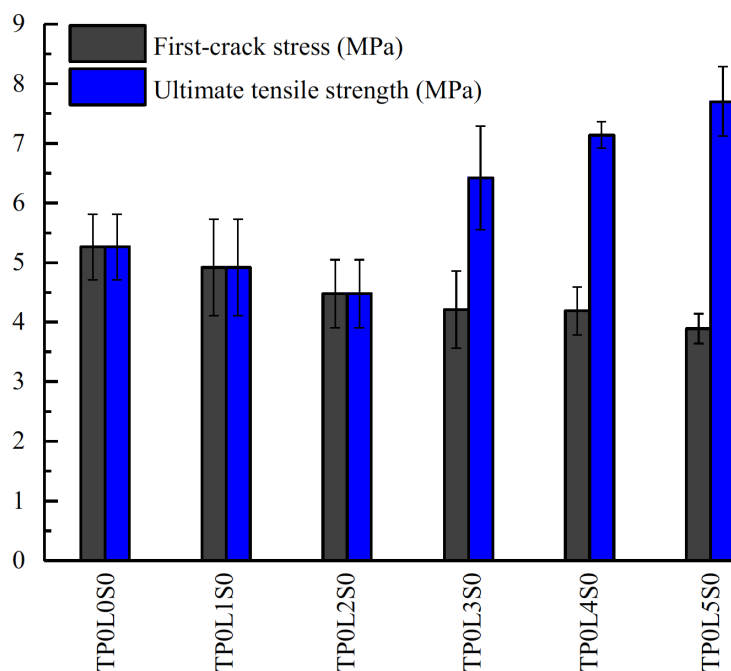
Beam	Days	Initial reading			Final reading		
		Deflection (mm)	Concrete strain ( $\mu\text{s}$ )	GFRP strain ( $\mu\text{s}$ )	Deflection (mm)	Concrete strain ( $\mu\text{s}$ )	GFRP strain ( $\mu\text{s}$ )
N2516-35	300	5.6	-390	4810	9.3	-788	5260
N25-16-60	300	37	-2100	10,770	53.6	-3387	N/A
N25-16-80	300	48	-2140	13,000	66.2	-4640	N/A
H40-16-35	183 <sup>a</sup>	3.5	-312	7595	5.8	-690	8050
H40-16-60	300	24	-1280	12,553	38.5	-2210	N/A
H40-16-80	230 <sup>a</sup>	47.5	-2550	13,500	58.6	-3288	N/A
N40-12-35	300	4.7	-202	8000	8.8	-395	8210
N40-12-60	300	22.5	-1242	15,950	31.2	-1945	16,890
N40-12-80	300	60	-2096	17,912	80.8	-2906	N/A
N40-16-35	300	4.5	-528	7775	9.1	-800	8036
N40-16-60	300	28.5	-1744	14,161	36.7	-2315	14,521
N40-16-80	300	51.8	-2221	16,600	72.1	-3800	N/A

<sup>a</sup> Technical error occurred where strain gauges and LVDTs stopped recording readings.

**Obrázek 2.12:** Tabulka počátečního a konečného čtení průhybu, napětí v GFRP výztuži a v betonu [10]

**Yunxing Du, Mengmeng Zhang a Fen Zhou, Deju Zhu** [11] zde navazují na svou práci z roku 2017 a zabývají se zde ohybovou pevností předepnutých betonových desek vyztužených čedičovou výztuží. Autoři zde srovnávají celou řadu variant jak dle množství a umístění výztuže, stupeň předpětí, tak i s možností úpravy cementové matrice přidáním ocelových drátků, a to v různých koncentracích (obr. 2.13). V těchto dvou kritériích je výzkum obdobný s již zmiňovaným výzkumem uskutečněným v roce 2017. Ohybová pevnost je zjišťována standardním způsobem na vzorcích zkoušených na čtyřbodový ohyb. Způsob předepnutí je totožný s autory dříve použitým systémem. Autoři zde ověřují skutečnost, kdy množství předepnutých vrstev, které je obsaženo v kompozitu, má pozitivní dopad na vznik první trhliny. Stupeň předpětí, který autoři vyjadřují poměrem předepnutí ku změřené tahové pevnosti rovingu, nemá zásadní vliv na konečné pevnosti, ale pozitivně ovlivňuje míru napětí při vzniku první trhliny. Posledním závěrem autorů je pozitivní vliv příměsi ocelových drátků na konečnou únosnost kompozitu.

**Markus Krüger, Hans-Wolf Reinhardt, Martin Fichtlscherer** [12] se v této práci zabývají soudržností předepnutých uhlíkových a aramidových vláken v cementovém kompozitu o tlakové pevnosti kolem 75 MPa po 28 dnech. Autoři zde narážejí na odlišné chování textilní výztuže od FRP výztuží, které jsou dnes již běžně předpínány. Problematiku shledávají v nehomogenitě průřezu složeného z jednotlivých fibril, které společně nespolečně působí. Zásadním výsledkem autorů je použití epoxidové pryskyřice, která zajišťuje výrazné zlepšení spolupůsobení průřezu. Tento fakt dokládají na tahové zkoušce, kdy je viditelný patrný nárůst pevnosti v tahu, která roste zhruba na polovinu

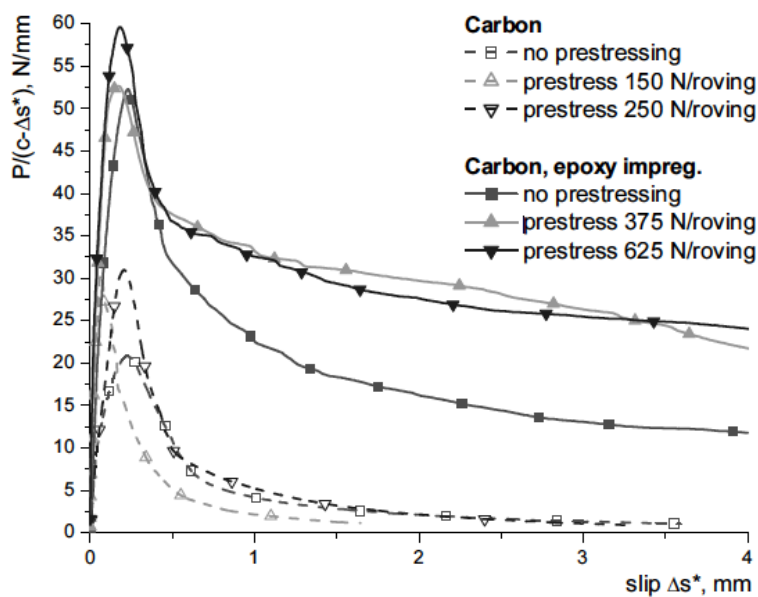


Porovnání vzniku první trhliny u ohýbaných prvků s různým množstvím drátků.

**Obrázek 2.13:** Graf porovnání vzniku trhliny [11]

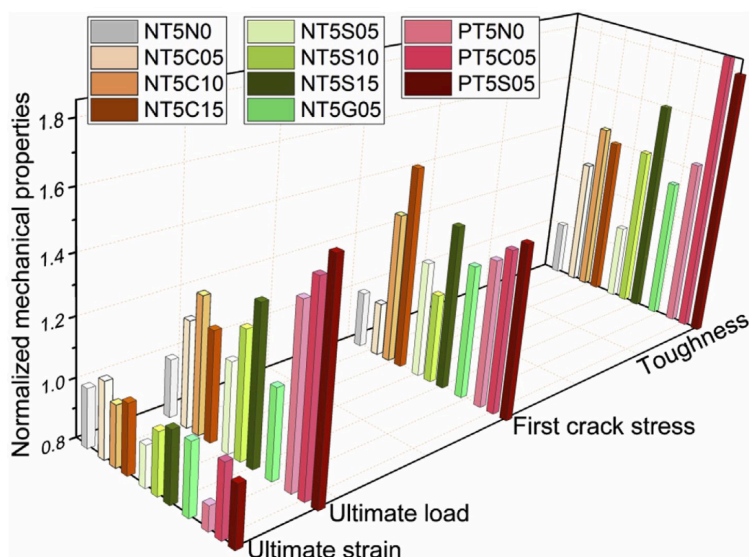
teoretické pevnosti. Autoři zde na grafu závislosti předpínací síly ku nespolečupůsobící délce na šířce trhliny dokládají lepších výsledků pro kompozity s vyšším předpětím (obr. 2.14).

Deju Zhua, Sai Liua, Yiming Yaob, Gaosheng Lia, Yunxing Dua, Caijun Shia [13] se v této práci zabývají problematikou tahové pevnosti cementového kompozitu s různými variantami doplnění matrice vláknou. Základní prvky kompozitu tvoří cementová matrice vyztužená pěti vrstvami čedičové výztuže. Cementová matrice je zde postupně doplňována různými vlákny s různými koncentracemi. Těmi jsou vlákna uhlíková, ocelová a skleněná. Nedílnou součástí sady variant je i varianta s předpnutou čedičovou výztuží, kdy je matrice znovu doplňována již zmiňovanými vlákny. Autoři se zde zabývají iniciací první trhliny, následným rozvojem trhlín a maximální únosností. Z výsledků, ke kterým autoři dospěli, je patrný zejména vliv ocelových a uhlíkových vláken na tahovou pevnost kompozitu, a to jak při vniku první trhliny, tak i při kolapsu (obr. 2.15). Nejlepších výsledků je však dosaženo, pokud je průřez předem předpnut čedičovou výztuží. Při této variantě jsou nejlepší výsledky patrné pro kombinaci s ocelovými vlákny. Předpnutí je dosaženo za pomoci jednoduchého principu navíjení textilie a následného měření síly přepočítané na metr délky textilie. I přestože prvotní napnutí je na 22 KN/m, vnesené napětí po třech dnech od zabetonování je pouze 17,8 KN/m. Následně prvek zraje a po 28 dnech od zabetonování je zkoušen.



Závislost napětí na nespolupůsobící šířce trhliny, viditelný pozitivní vliv epoxidové pryskyřice a předepnutí

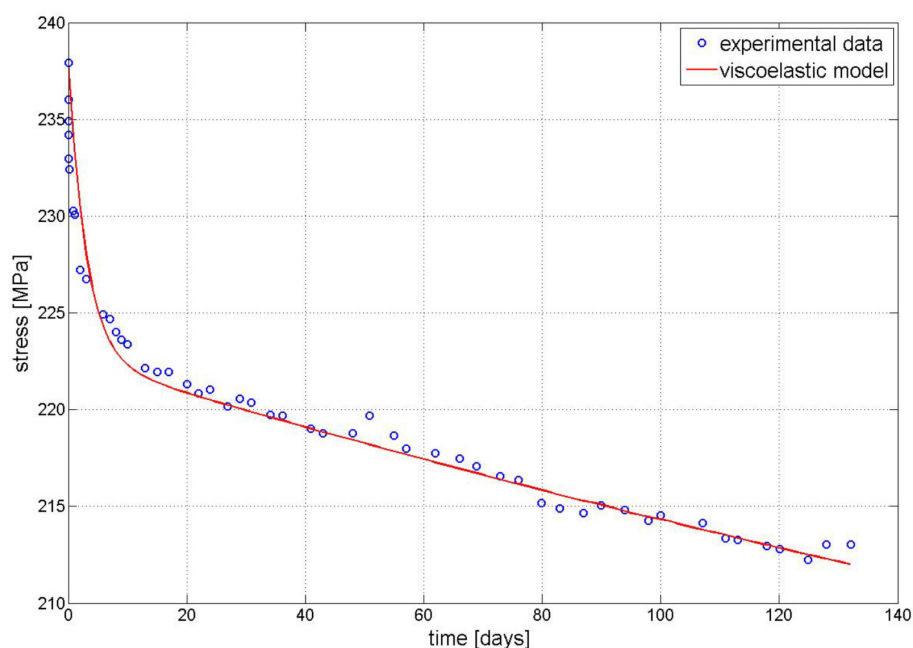
Obrázek 2.14: Závislost napětí na nespolupůsobící šířce trhliny [12]



Grafy mezního napětí, mezního zatížení, inicializace první trhliny a houževnatosti na mechanických vlastnostech pro jednotlivé varianty kompozitů s vlákny.

Obrázek 2.15: Mezní grafy [13]

**J. Fornůsek, P. Konvalinka, R. Sovják a J. L. Vítek [14]** se v této práci zabývají předpětím GFRP (glass fibre reinforced polymers), kterými jsou průmyslově vyráběné prvky od společnosti Prefa Komposity a.s. Brno. Autoři zde porovnávají v technickém listu uvedené hodnoty modulu pružnosti, tahové pevnosti a teplotní roztažnosti, které vykazují vyšší hodnoty, než v již zmiňovaném technickém listu. Pouze hodnota tahové pevnosti není přesně změřena z důvodu limitní hodnoty trhacího přístroje. Předpínací tyče byly následně zabetonovány do průřezu 600x200 mm (š x v) a následně dodatečně předepruty, a to po 14 dnech od zabetonování. Hodnota předpětí je volena na 32 kN, které odpovídá napětí zhruba 215 MPa, což v důsledku znamená předpětí tyčí na úrovni 37% tahové pevnosti. Takto zhotovený průřez je vybetonován v délce 4500mm a zkoušen čtyřbodovým ohybem, kdy umístění zatížení je vždy 1300 mm od podpor. Výsledky měření jsou porovnány s autory vytvořeným viskoelastickým modelem (obr. 2.16). Autoři zde docházejí k závěru, že ztráta předpětí relaxací výztuže je značná a po 132 dnech činí její hodnota 10,5%. Dále autoři poukazují za nedostatečnou délku měření, která by v optimálním případě měla být dva roky a více. Dílčím výsledkem je také postup a schéma předpínání

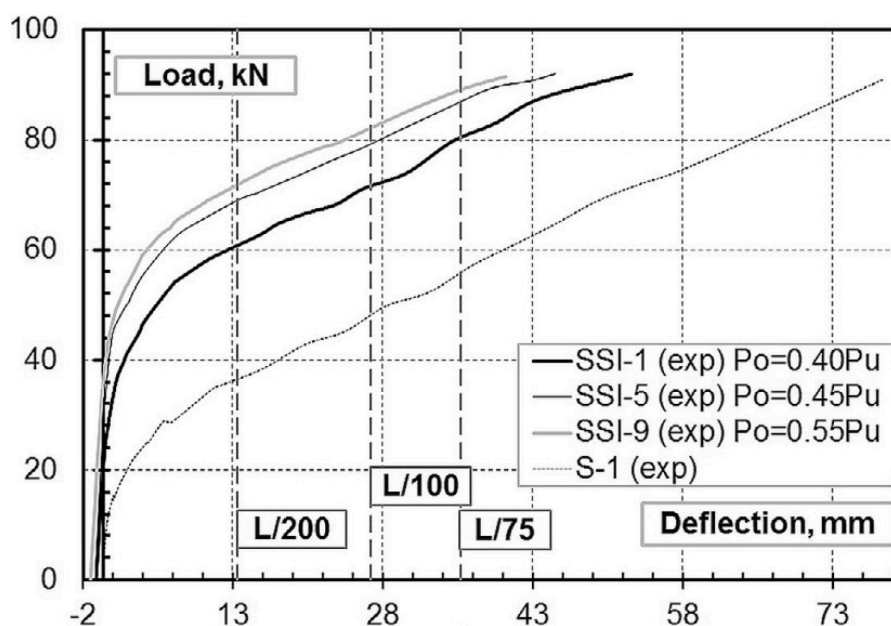


*Model ztrát předpětí na GFRP výztuži, porovnání experimentálně zjištěných dat a viskoelastického modelu*

**Obrázek 2.16:** Model ztrát předpětí [14]

**Mantas Atutis, Juozas Valivonis, Edgaras Atutis [15]** se ve své práci zabývají ohybovou pevností BFRP (basalt fibre reinforced polymers) předeprnutých na variantní poměrné hodnoty tahové pevnosti. Autoři zde nastiňují potenciál nekovových výztuží při užití ve speciálních konstrukcích, kde je nutná zvýšená míra trvanlivosti, která může být při použití klasické

betonářské výztuže nižší. Konkrétně se zde jedná o vyztužení zásobníků např. na kyselinu sírovou. Zkoušky byly provedeny na prvku o rozměrech 150x300 mm (š x v), kde předpínací výztuž byla umístěna na osu průřezu v osově vzdálenosti 50 mm od spodní hrany průřezu. Varianty předepnutí jsou voleny jako 40, 45 a 50% tahové pevnosti výztuže. Jak je patrné z následujícího grafu, tak míra předepnutí výztuží má pozitivní přínos na míru průhybu při daném zatížení (obr. 2.17).

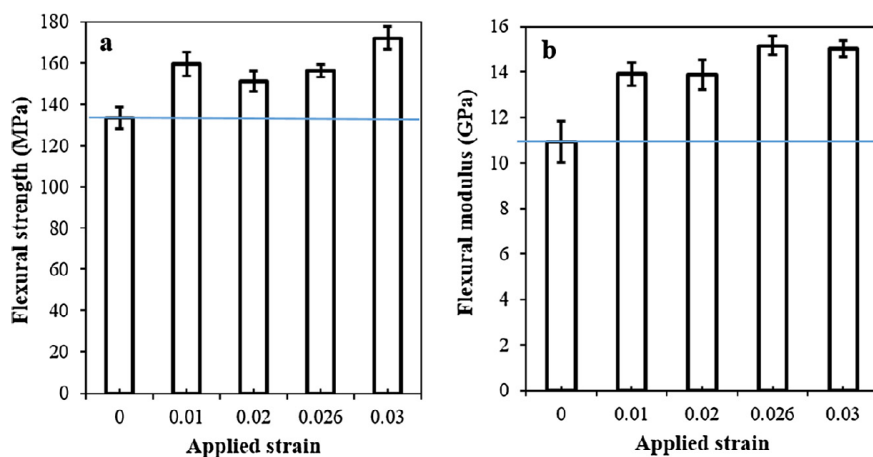


Závislost průhybu na zatížení pro jednotlivé varianty předpětí, které jsou dány jako poměr napínací síly ku limitní tahové pevnosti výztuže

Obrázek 2.17: Závislost průhybu na zatížení [15]

Badar Munir Zaidi, Kevin Magniez a Menghe Miao [16] se v této práci zabývají předepnutím příze, které jsou částečně twistovány. Autoři zde poukazují na nesmírně pečlivou přípravou vzorků, především organické příze, kdy právě přírodní původ s přirozenou vlhkostí vláken má zásadní vliv na konečné výsledky. V rámci této práce jsou však vlákna pečlivě vysušena tak, aby došlo ke ztrátě vlhkosti. Vzorky jsou kondicionovány po dobu 24 hodin při 100 C a 65% vlhkosti. Samotná výroba se skládá z několika zásadních technologických kroků. Twistování, kde autoři poukazují na jeho zásadní vliv ve formě příčné porušení, kde dochází k negativnímu vlivu v podobě až dvacetinásobného zvětšení rychlosti příčné porušení u twistovaných vzorků. Předepnutí vzorků spočívá v nanesení pryskyřice, následném předepnutí a poté zkoumání ztrát předepnutí při prvních 60 sekundách. Hmotnost nanesené epoxidové pryskyřice je v poměru 1:1, pryskyřice:hmotnost příze. Velikost twistování je různá a v závislosti na ní, jsou odlišné i výsledky ohybových zkoušek kompozitu. Velmi důležitým faktorem, který má také vliv na konečnou ohybovou pevnost, je stupeň předepnutí vláken, jak je patrné na obrázku (obr. 2.18). Z něj je patrný nárůst únosnosti až od 34% u prvků, předepnutých

na hodnotu 0.03. Toho bylo dosaženo posunem příčnicku.



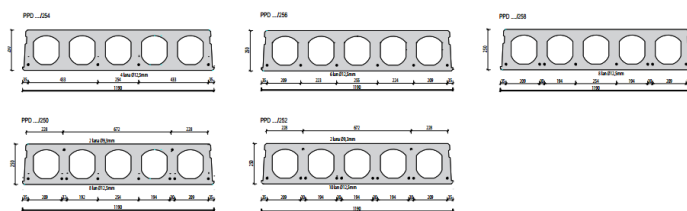
Graf výsledků s patrným nárustem únosnosti až o 34% v závislosti na předpětí

Obrázek 2.18: Graf výsledků [16]

## 2.3 Ztráty předpětí

Tento odstavec se zabývá ztrátami předpětí, které jsou stěžejní pro návrh předpínaných konstrukcí. Ztráty lze dělit dle mnoha variant, autorem zvolená varianta je však již od počátku dělení dle okamžiku, kdy ke ztrátám dochází, a to na okamžitě a dlouhodobé. V rámci této práce je kladen důraz na variantu předem předpjaté konstrukce, a technologie výroby bude tedy výhradně touto cestou. Ztráty však jsou zde pro názornost rozebrány jak pro předem předepnuté, tak i pro dodatečně předepnuté konstrukce. Jako základní, snadno představitelnou předem předepnutou konstrukci, jsou označovány dutinové stropní panely typu Spiroll, které lze v České republice také nalézt pod obchodními značkami, např. Goldbeck, nebo Partek. Technologie výroby je v podobě napnutí a předepnutí předpínacích lan na drahách dlouhých až 100m. Následně dochází ke kontinuální betonáži ze speciálních vozíků, jedoucích po drahách, kdy je použit beton vyšších pevností, nejčastěji C50/60 [26]. Takto vybetonovaná dráha je následně ponechána do té doby, než je dosaženo 50-60% tlakové pevnosti betonu, kdy je předpětí vneseno. Průřez předepnutých panelů je vylehčen dutinami (obr. 2.19) z důvodu snížení vlastní tíhy, při optimálním zachování únosnosti.

Ztráty lze vyjádřit jako pokles napětí v závislosti na úměrné změně relativního přetvoření. Dalším parametrem, který přímo-úměrně vstupuje do výpočtu je modul pružnosti. Jelikož se však tato práce primárně nezabývá ztrátami předpětí v detailním měřítku a jelikož byly detailně zkoumány přede-



Obrázek 2.19: Průřez dutinového panelu tl. 250mm [17]

vším ztráty na ocelových konstrukcích, tak není věnováno ztrátám maximální zaměření.

$$-\Delta\Sigma = -\Delta\epsilon \cdot E$$

$\Delta\Sigma$  - změna napětí

$\Delta\epsilon$  - relativní zkrácení

E - Youngův modul pružnosti

### 2.3.1 Okamžité ztráty předpětí

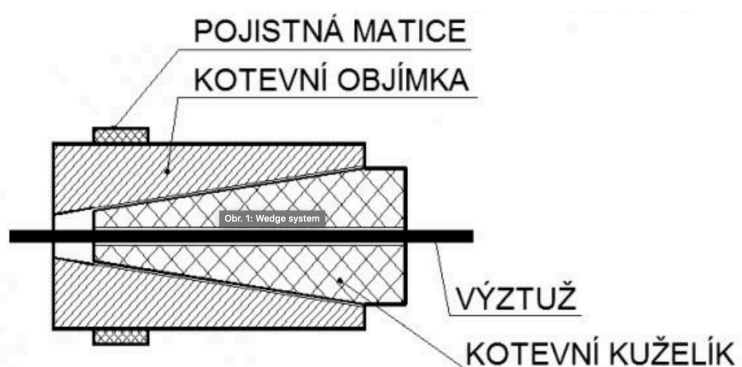
Okamžité ztráty jsou ty, ke kterým dochází v čase mezi napínáním až do doby zakotvení. V následujícím textu jsou tyto ztráty rámcově rozebrány tak, aby byl zajištěn dostatečný přehled.

**Ztráty třením** Ke ztrátě třením dochází vlivem zvlnění kabelu v kabelovém kanálku, a to zvláště v místech významného zakřivení kanálku. Tyto ztráty jsou tedy patrné pouze u dodatečně předpjatých konstrukcí. V rámci této práce není výztuž vkládána do kabelových kanálků. Ztráta třením je tedy eliminována

**Pokluz v kotvě** Zde je nutno poznamenat, že u pokluzu v kotvě dochází pouze u dodatečně předepnutých konstrukcí. Princip spočívá v zakotvení a sevření lana do ozubených kuželíku, které mají ozubený povrch, a nekloužou tedy po výztuži. Následně je lano předepnuto, a poté uvolněno. Kuželíky jsou vtlačovány do kotevní objímky. Pokud již nedochází k posunu kuželíků a lana do kotevní objímky, tak je lano zakotveno. V rámci textilních betonů lze předpokládat opatření konců výztuží kotevními objímkami a lze tedy tuto ztrátu také předpokládat.

**Pružné přetvoření betonu** Předpětí si lze snadno představit jako jakoukoliv jinou sílu působící na konstrukci. Pokud na těleso působí síla, dochází k

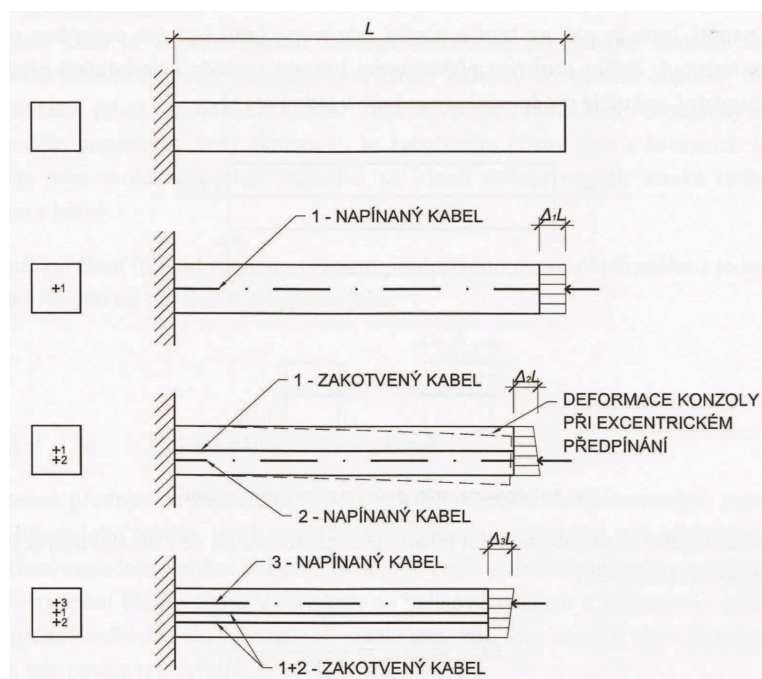




Obrázek 2.20: Schéma kuželíku a kotevní objímky

jeho zkrácení. Při zkrácení tělesa (např. nosníku) tedy dochází ke zkracování i předpínacího lana, a tím snižování napětí v něm vneseném. Ztrátu pružným přetvořením betonu lze zaznamenat jak pro předem předepnuté konstrukce, tak i pro dodatečně předepnuté konstrukce. U dodatečně předepnutých konstrukcí lze eliminovat zkrácení prvku opětovným předepnutím za pomoci předpínací pistole, ale to pouze pokud je předpínání provedeno v jedné etapě. I v rámci této práce lze předpokládat, že dojde k projevení ztráty z důvodu pružného přetvoření betonu

**Postupné předpínání** V reálných konstrukcích jsou prvky předpínány postupně. Není běžné, aby byly prvky napínány v jedné fázi. Postupné předpínání vede k postupnému zkracování prvku, a tím ke ztrátám předpětí.



Obrázek 2.21: Princip ztráty postupným předepínáním na konzole [1]



**Krátkodobá relaxace** Ztráta relaxace výztuže je dána materiálovou povahou oceli. Ocel - jako mnoho jiných materiálů – má krystalickou strukturu, která se "přeuspořádá" vlivem zatížení. Tento fenomén zajistí prodloužení výztuže, a tím snížení napětí.

**Přetvoření napínacího zařízení** Akce, kterou je dle fyzikálních zákonů předpínací síla, vyvolá stejně velkou reakci opačného směru, která má tendenci deformovat předpínací zařízení, a tím může docházet ke ztrátám předpětí.

**Ztráta rozdílem teploty předpínacího zařízení a předpínacího kabelu** K této ztrátě dochází z principu Hookova zákona, kdy dochází ke změně délky vlivem rozdílných teplot.

**Stlačení spár při postupném předpínání** Vlivem spínání segmentových konstrukcí, které nemají dokonale na sebe doléhající povrch dochází ke stlačení těchto spár, a tím ke snížení předpětí. S degradacemi z důvodů nedostatečného dotmelení spár na konstrukci dochází k dnes diskutovaným problémům v souvislosti s degradacemi mostních lávek a mostů obecně.

### ■ 2.3.2 Dlouhodobé ztráty předpětí

Dlouhodobé ztráty vznikají v průběhu celé životnosti konstrukce od zakotvení předpínací výztuže. Následně je znovu uveden rámcový přehled dlouhodobých ztrát.

**Dlouhodobá relaxace předpínacích lan** Dlouhodobá relaxace má – podobně jako krátkodobá – význam v podobě "přeuspořádání" krystalické mřížky.

**Dotvarování a smršťování** Dotvarování je dle definice chápáno jako změna deformace vlivem dlouhodobého zatížení. Změna deformace zapříčiňuje znovu pokles napětí. Dotvarování je časově závislý jev, který je z velké části ovlivněn dobou vnesení napětí na konstrukci. Smršťování je fenomén závislý na mnoha faktorech. U vysokopevnostních betonů, kde je použita velká dávka cementu, hraje právě tento fakt jednu z klíčových rolí. Dalšími jsou způsob ošetřování, který je znovu závislý na množství cementu. Ošetřování je nejčastěji prováděno vodou, která je vázaná na cement jako hydraulicky aktivní pojivo.



## Kapitola 3

### Materiály

#### 3.1 Složení a základní parametry použitého betonu

V rámci této diplomové práce byl použit vysokohodnotný beton, který po 28 dnech zrání dosahuje krychelných pevností v tlaku 130 MPa. Rozlité směsi na rozlévacím stolku je 30 cm. Tahová pevnost betonu za ohybu měřená na jednobodovém ohybu přesahuje 15 MPa. [18]. Základní komponenty směsi jsou uvedeny v tabulce 3.1. Veškeré pevnostní charakteristiky jsou doloženy zkouškami dle EN 12390-3 [27] pro tlakovou zkoušku a dle EN 12390-5 [28] pro zkoušku za ohybu. Obě charakteristiky jsou diskutovány níže.

##### 3.1.1 Cement

Cement je základním komponentem betonové směsi, betonového kompozitu. Dle složení jej lze rozdělit do pěti základních skupin CEM I - CEM IV. V komerční praxi je častěji k vidění označení s číselnou hodnotou vyjadřující pevnost po 28 dnech. Například cement s označením 42,5 znamená cement, který po 28 dnech vykazuje tlakové pevnosti na válcích převyšující hodnotu 28 MPa. Z chemického hlediska je zásadní podíl slínekových minerálů, které mají vliv na výslednou reologii betonu. Dalším zásadním parametrem cementu je jeho jemnost, která se běžně pohybuje kolem 400m<sup>2</sup>/kg [29]. Výroba cementu a s ním spojená konečná jemnost, která má zásadní vliv na konečnou pevnost betonu, se skládá z mnoha kroků a zjednodušeně je vyjádřena ve schématu níže (obr. 3.1).

Složka	$\rho$ <i>kg/m<sup>3</sup></i>	<b>m</b> <i>kg</i>	<b>V</b> <i>m<sup>3</sup></i>
CEM I 42,5R	3110	689	0,222
Křemičitý písek	2650	975	0,368
Mikrosilika	2100	177	0,084
Křemenná mouka	2650	329	0,124
Superplastifikátor	1025	29,4	0,029
Voda	1002	173	0,173
Celkem		2374	1,000

**Tabulka 3.1:** Složení použité směsi HPC

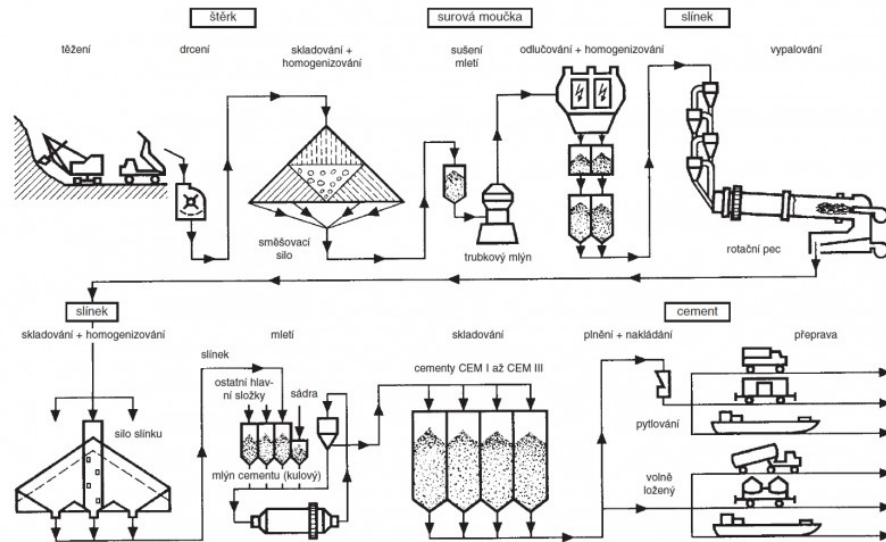
### 3.1.2 Superplastifikátory

Revolučním zvratem v technologii betonu je použití superplastifikátorů - polymerních látek, které výrazně snižují vodní součinitel. V posledních třiceti letech byly hlavními složkami superplastifikátorů syntetické, ve vodě rozpustné polymery, např. sulfonyl melanin-formaldehyd kondenzát (SMF), sulfonylanftalenformaldehyd kondenzát (SNF) a modifikované lignosulfáty bez obsahu cukrů (MLS) [29]. Použitím těchto přísad bylo dosaženo výrazného nárůstu mechanických parametrů betonu a snížení pórovitosti. Negativem byla snížená doba zpracovatelnosti. Z tohoto důvodu jsou dnes používány látky na bázi polymerů polykarboxylátů (PC), které potlačují ztrátu zpracovatelnosti [29].

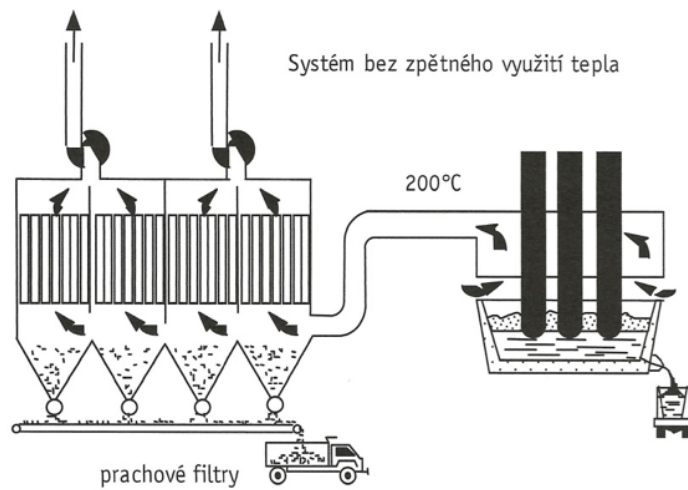
### 3.1.3 Křemičitý úlet - mikrosilika

Křemičitý úlet, který je někdy označován jako mikrosilika, je vedlejší produkt při výrobě křemíku a jiných slitin křemíku (obr. 3.2) [30]. Samotná výroba křemíku probíhá v obloukové peci za přítomnosti uhlí (palivo), a to chemickou redukcí. Během redukce vzniká plynný SiO, který se v horní části pece ochlazuje, následně dochází ke kondenzaci takto vzniklého plynu, a poté k oxidaci do formy velmi malých částic SiO<sub>2</sub>, které se zachytávají na filtrech. Klasifikovat křemičitý úlet lze jako minerální příměs s podílem dalších jemných částic, jako jsou části elektrod, zbytky paliva a další. Tyto minoritní složky mikrosiliky jsou dány technologií výroby. Souhrnně však křemičité úlety obsahují 80 až 98% amorfního SiO<sub>2</sub> [31] ve tvaru kulatých zrn. Velikost těchto zrn se pohybuje standardně v intervalu 0,1 μm až 0,2 μm. Měrný povrch takto vzniklých zrn je tedy cca 15000 až 30000 m<sup>2</sup>.kg<sup>-1</sup>. Mikrosilika jsou dnes základní složkou vysokopevnostních betonů, kde mají nezastupitelnou úlohu právě díky své jemnosti. Příměsi obsahující mikrosiliku vykazují nižší pórovitost, a tím zlepšení mechanických vlastností.

V kombinaci se superplastifikátory jsou křemičité úlety nejdůležitějším



Obrázek 3.1: Schéma výroby cementu [18]



Obrázek 3.2: Technologie výroby křemičitého úletu [18]

technologickým prvkem v rámci kompozitu HPC.

### ■ 3.1.4 Tlaková zkouška

Tlaková zkouška betonu patří dnes již ke standardním zkouškám prováděných v rámci výroby prefa konstrukcí s denní pravidelností. V rámci této práce byla tlaková pevnost zjištěna na základě zkoušky dle normy [27]. Princip tlakové zkoušky obecně spočívá ve vyvození limitního napětí, při kterém dochází k destrukci vzorku. Dle základního vztahu mechaniky lze napětí vyjádřit přímo úměrně síle působící na těleso a nepřímo úměrně ploše, na kterou síla působí. Tato skutečnost je reprezentována následujícím vztahem [3.1].

$$\sigma = \frac{F}{A} [MPa] \quad (3.1)$$

Výsledek je běžně reprezentován hodnotami uváděnými v MPa (mega pascal), tj. v N (newton) na mm (milimetr). Obecně je na akademické půdě známo, že vysokohodnotný beton je beton, jehož tlaková pevnost je vyšší než 110 MPa. Je nutné poznamenat, že tyto výsledky jsou měřeny na válcích, které obecně poskytují nižší pevnost, než je tomu na krychlích, a to z důvodu obecně vyšší výšky vzorku, kdy dochází k dřívějšímu porušení příčným tahem než je tomu u krychlí.

Samotná zkouška setrvává z celé řady úkolů, kterými jsou: vybetonování vzorků, kondicionování (v tomto případě 20-21 C a vlhkost 50-60%), následné změření, zvážení a destrukce na lisu. Velikost vzorků je 100x100x100 mm (š x v x h), tyto rozměry jsou převzaty z normy.

V rámci tohoto experimentu byly odzkoušeny tlakové pevnosti směsi uvedené výše [3.1], a to ve 3, 10 a 28 dnech, které korespondují se dny, kdy je předpětí vneseno do prvku (třetí den), kdy je prvek z časových důvodů zkoušen (desátý den) a referenční hodnota, dle normy [32] pro 28. den.

Výsledné pevnosti jsou souhrnně uvedeny v tabulce níže [3.2].

### ■ 3.1.5 Zkouška v tahu za ohybu

Druhou ze základních zkoušek ke zjištění základních charakteristik betonu je tahová zkouška [33].

	čas zkoušení [dny]	a [mm]	b [mm]	h [mm]	F <sub>crit</sub> [N]	σ <sub>crit,c</sub> [MPa]	σ <sub>avg,c</sub> [MPa]
KR1.01	3	100	100	99,89	517231,9	51,78	52,14
KR1.02	3	100	100	99,71	522391,1	52,39	
KR1.03	3	100	100	101,2	528902,4	52,26	
KR2.01	10	100	100	100,9	1264599,2	125,33	118,15
KR2.02	10	100	100	99,7	1119892,7	112,33	
KR2.03	10	100	100	103,6	1210052,9	116,80	
KR3.01	28	100	100	101,7	1400021,3	137,66	130,40
KR3.02	28	100	100	101,9	1310562,5	128,61	
KR3.03	28	100	100	103,3	1290451,6	124,92	

Tabulka znázorňující tlakové pevnosti v jednotlivých časových krocích.

Tabulka 3.2: Tabulka pevností

V rámci běžně dostupných katalogů výrobců se tato hodnota neudává, a to z důvodu toho, že beton není standartně navrhován na ohybové namáhání. V rámci výpočtu kritického napětí v krajních vláknech průřezů je však dobré tuto hodnotu znát.

Tato hodnota je také důležitá pro následný výpočet předpokladu zatížení, při kterém vznikne první trhлина i u předepnutého průřezu, přičemž do tohoto výpočtu vstupuje v pozitivním smyslu právě i předpínací síla, která vytváří tlakovou rezervu. Zkouška je fakticky prováděna na trámečcích 40x40X160 mm (š x v x d). Takto uvedená zkouška není oficiálně vedena jako zkouška v tahu za ohybu pro betony standartních zrnitostí, ale jedná se o zkoušku pro zjištění ohybové pevnosti cementového tmele - cementu [33].

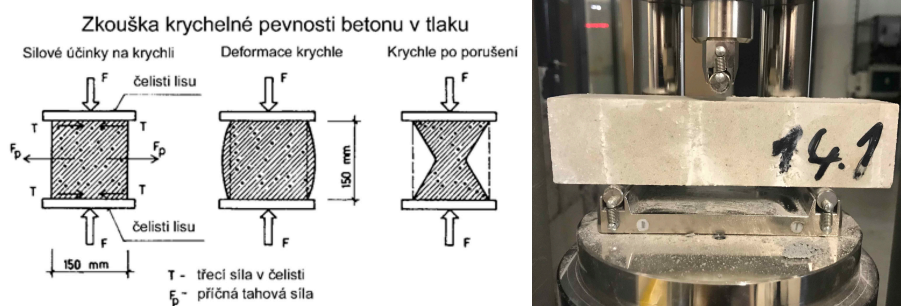
Zkouška sestává z úkonů v podobě vybetonování vzorků, kondicionování (v tomto případě 20-21 C a vlhkost 50-60%), následného změření, zvážení a poté destrukce na lisu tříbodovým ohybem a poté zjištění kritické síly. Výpočet kritického napětí je dán vztahem uvedeným níže.

$$\sigma_t = \frac{M_{(cr)}}{W} [MPa] \quad (3.2)$$

Výsledky zkoušky v tahu za ohybu referenční směsi jsou patrné z následující tabulky. Vzorky byly znovu zkoušeny ve třech časových intervalech tak, jako je tomu u předchozí zkoušky v tlaku [3.1.4].

### 3.1.6 Zkouška konzistence střešáním

Beton jako kompozitní materiál se skládá z celé řady kameniva různé frakce, cementu, vody a dalších přísad a příměsí. To vše má vliv na konzistenci betonu. Způsob charakterizování konzistence sestává z celé řady zkoušek,



(levý obrázek), reálná zkouška tahu za ohybu (pravý obrázek)

**Obrázek 3.3:** Schéma tlakové zkoušky a reálná zkouška

	čas zkoušení [dny]	b [mm]	h [mm]	l [mm]	$F_{crit}$ [N]	$\sigma_{crit,t}$ [MPa]	$\sigma_{avg,t}$ [MPa]
TR1.01	3	40	39,98	160	1764,9	4,14	4,60
TR1.02	3	40	38,78	160	2055,1	5,12	
TR1.03	3	40	39,49	160	1889,2	4,54	
TR2.01	10	40	40,02	160	3399,8	7,96	7,93
TR2.02	10	40	40,12	160	3123,9	7,28	
TR2.03	10	40	39,97	160	3638,2	8,54	
TR3.01	28	40	40,01	160	6501,6	15,23	15,83
TR3.02	28	40	40,36	160	6962,0	16,03	
TR3.03	28	40	40,21	160	7001,7	16,24	

Tabulka znázorňující ohybové pevnosti v jednotlivých časových krocích.

**Tabulka 3.3:** Tabulka znázorňující ohybových pevností

jejichž volba je závislá na vybavení laboratoře, ale především na tom, kolik času a jak jednoduchá je zkouška v rámci měření in-situ.

Nejrozšířenější zkouška je zkouška konzistence Abramsovým kuželem, kde se měří míra sednutí kužele po předem stanoveném postupu zhutňování kužele. Tato zkouška, jak již bylo řečeno, je velmi častá právě z důvodu jednoduchosti. Vhodná je ale především pro betony, kde je použita standartní frakce kameniva.

U betonů jemných frakcí je pro samotnou výrobu velmi často použit superplastifikátor, a to v objemu, který zajišťuje dokonalé rozlití i po zhutnění. Tyto betony jsou nazývány somozhutnitelné (SCC - self compacted concrete). Tento fakt vede k rozhodnutí využít jiný typ zkoušek než pro standartní betony běžných frakcí. Zkouška, která byla zvolena, je zkouška rozlití na rozlévacím stolku [34]. Tato zkouška poskytuje výsledky měřitelné v mm (milimetr). V rámci této práce byla použita pouze jedna směs, která vykazovala na rozlévacím stolku rozlití větší 30 mm. Tuto směs lze bezpečně označit jako SCC.

V rámci experimentů byly použity dva základní materiály. Vysokohodnotný



beton, který je v tomto případě navržen s ohledem na životní prostředí. Předchozí vyjádření může být velmi zavádějící, jelikož beton z historického hlediska obsahuje cement a kamenivo, které jsou označovány jako prvotní suroviny a v současné době jsou tématem mnoha studií, které zkoumají možný potenciál jejich druhotného využití. Důležitým faktorem výroby cementu je spotřeba energie, a to nejen při těžbě primární suroviny, kterou je vápenec, ale především při následné technologii výroby, která je detailněji rozvedena v následující podkapitole. Beton je druhým nejpoužívanějším materiálem na planetě a je nepravděpodobné, že by došlo k jeho okamžité eliminaci ve stavebnictví. Myšlenka redukce oxidu uhličitého, který se váže s výrobou betonu, respektive všech jeho komponentů, je správná a nezbytná pro udržitelnost stavebnictví. V následujícím textu budou detailněji rozebrány jednotlivé komponenty betonu. Jak je již v tomto odstavci poukázáno, tak autor si je vědom uhlíkové stopy betonu, ale v rámci této práce není zhotovena žádná studie LCA (Life Cycle Assessment - posouzení životního cyklu), která by podpořila masovější využití textilního betonu.

## 3.2 Technické textilie

Pro textilní betony se používají různé druhy a různé materiály technických textilií. Na trhu existuje několik materiálů, které se dají využít. Vhodné jsou nekorozivní materiály s velkou pevností v tahu a s vysokým modulem pružnosti. Nejčastěji se používají vlákna z alkalivzdorného skla, uhlíku, aramidu či čediče.



**Obrázek 3.4:** Detail uhlíkového rovingu. [19]

Existuje však i několik studií o využití různých přírodních vláken. Filamenty (vlákna) či rovingy (svazky několika vláken) se zpracovávají na netkané, tkané či různě pletené textilie s 2D, 3D nebo dokonce s cylindrickou strukturou. Nejčastěji jsou textilie uspořádány do mřížkovitých tvarů s oky zhruba trojnásobnými až čtyřnásobnými, než je největší zrno kameniva v betonové směsi.

Textilie jsou většinou uspořádány do perlinkové tkané vazby, osnovní pleteniny či trojrozměrné pleteniny. Jednotlivé rovingy jsou navíc opatřeny povrchovou úpravou z různých pryskyřic či jiných polymerů, která slouží jako ochrana před různými agresivními prostředími a zároveň dává textiliím pevný tvar. Takováto impregnace se provádí strojově na hotových textiliích nebo již při výrobě rovingů na povrchu každého svazku vláken. Stále více se zdokonalují postupy, jakými jsou samotné textilie vyráběny. Moderní technologie jako jsou samotné pletací stroje, ale především scannery, výpočetní programy pro numerické modelování a 3D tisk umožňují analyzovat přesné podmínky, navrhnout výztuže na míru nebo dokonce připravit či přizpůsobit výztuže během stavby.

Pozitivní hledisko pro použití technických textilií je jejich trvanlivost a eliminace krycí vrstvy z důvodu absence fenoménu v podobě karbonatice ocelové výztuže. Nelze však tvrdit, že trvanlivost výztuží je dokonalá. Je také velmi závislá na stupni agresivity okolního prostředí. Zásadní vliv má především kyselé prostředí, ve kterém dochází k úbytku tahové pevnosti [19]. Pro alkalické prostředí, kterým je beton charakteristický, je stupeň degradace nižší, přesto však patrný. Nutná je tedy ochrana výztuže tak, aby byla zajištěna její trvanlivost.

V současné době se lze na trhu setkat se širokou paletou technických textilií, které jsou již běžně používány. Jedním z těchto velmi známých využití je skleněná textilie, vkládaná do vrstvy jemné cementové suspenze s běžně používaným označením “perlinka”. Obecně se jedná o nekorozivní materiály s velkou tahovou pevností a vysokým modulem pružnosti. Mezi nejčastěji používaná patří již zmiňovaná skleněná vlákna, a to pro svou cenu a snadnou použitelnost. Dalšími jsou čedičová vlákna. Čedič je běžně dostupná vyvřelina, se kterou se lze dnes již také běžně potkávat v komerčních výrobcích. Za zmínku stojí tepelná izolace z čedičových vláken, která vykazuje vysoké požární odolnosti. V běžné praxi se s ní setkáme například pod označením Rockwool. Dalším a v této práci používaným materiálem, který je již běžně používaný v podobě rohoží nejen do betonu je uhlík (ang. carbon). Uhlík v současné době poskytuje nejvyšší tahové pevnosti při zachování vysokého modulu pružnosti.

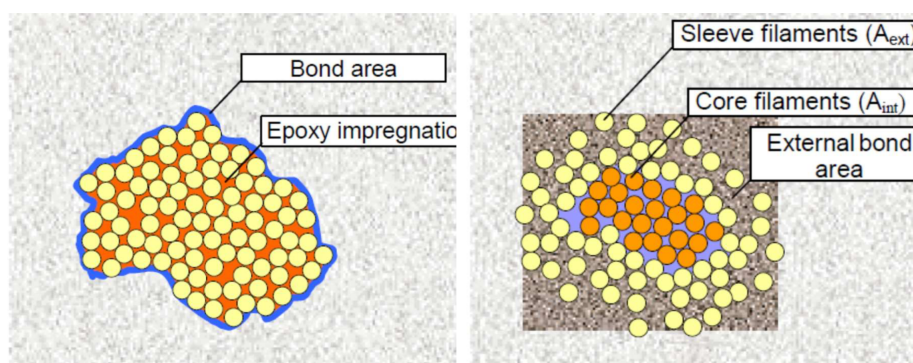
#### ■ 3.2.1 Spolupůsobení průřezu rovingu

Jak již bylo uvedeno výše, technické textilie jsou svazky nekonečných vláken. Tato vlákna mají sama o sobě vysokou tahovou pevnost, jsou však velmi náchylná na porušení lomem. Svazky jsou vyráběny v různých tloušťkách, které jsou reprezentovány jednotkou TEX. TEX je jednotka, která udává váhu rovingu v gramech na 1000 m délky. Standartně se lze setkat s hodnotami 600 TEX, 1800 TEX, ale také 3200 TEX. Ze znalosti hustoty lze následně dopočítat plochu průřezu [3.3]. S rostoucí gramáží roste i únosnost rovingu. Výsledná

únosnost však nedosahuje teoretické únosnosti jednoho vlákna rovingu, a to z důvodu postupného zapojování průřezu a nedostatečně distribuci napětí po průřezu [8]. Z tohoto důvodu je nutné zajistit spolupůsobení jednotlivých vláken. Jako základní varianty lze uvést dvě:

$$A = \frac{T_r}{\rho \cdot 1000} [mm^2] \quad (3.3)$$

1. twistování - stočení rovingu, kdy dochází ke zlepšení spolupůsobení vláken na průřezu [35]
2. prosvycení epoxidovou pryskyřicí - pryskyřice se vsákne mezi vlákna a vytvoří téměř homogenní prut [5]



*Roving impregnovaný pryskyřicí (vlevo). Roving neimpregnovaný pryskyřicí (vpravo)*

**Obrázek 3.5:** Schéma rovingu [20]

### 3.2.2 Tahová zkouška uhlíkového rovingu

Jak již bylo uvedeno v předchozí kapitole (kap. 3.2) rovingy jsou svazky nekonečných vláken. Zjištění základních pevnostních charakteristik je tedy závislé na samotných vláknech. Vlákna však v rámci průřezu nespolečně působí a jejich spolupůsobení je zajištěno až za pomoci pryskyřice [3.5]. Takto zhotovené vzorky působí jako celistvý prut, avšak přidáním pryskyřice může být snížen některý ze základních parametrů, kterými jsou tahová pevnost v jednoosém tahu a modul pružnosti. Tyto dva parametry jsou reprezentovány i v technickém listu, a to právě pro jednu fibrilu.

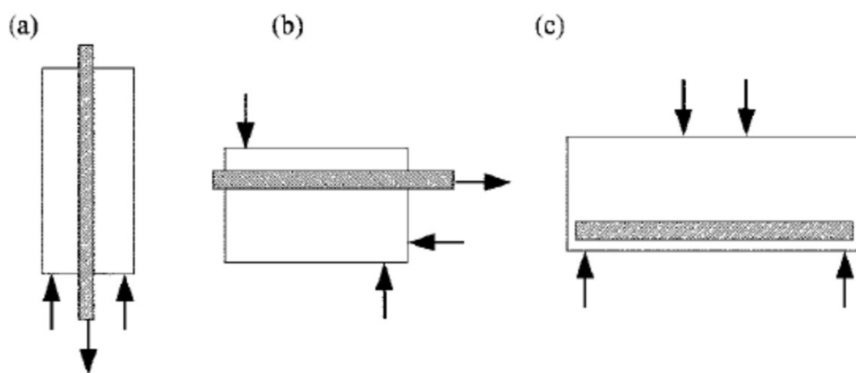
V České republice není v současné době norma, která by se zabývala tahovým zkoušením nekovových vláken, rovingů, nebo provazců. Za zmínku stojí norma na zkoušení ocelových materiálů v tahu za pokojové teploty [36].

typ výztuže	délková hmotnost 0°/90° [tex]	pevnost v tahu [MPa]	modul pružnosti [GPa]	objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	průřezová plocha [mm <sup>2</sup> ]
Toreyca® 24K	1650	4900	230	1800	0,917

**Obrázek 3.6:** Detail uhlíkového rovingu. Převzato z technického listu výrobce

Tato norma však neposkytuje uspokojující výsledky ani postupy pro zkoušení rovingů.

Z tohoto důvodu je nutné použít Americkou normu ACI 440.R3-04 [21]. Tato norma nabízí několik způsobů zjištění průřezových charakteristik FRP výztuže.



*Příklady stanovení průřezových charakteristik. a) jednoose zatěžovaný prut, b) koncový prvek nosníku, c) čtyřbodový ohyb*

**Obrázek 3.7:** Stanovení průřezových charakteristik [21]

Příprava vzorků pro zkoušení je důležitým a velmi diskutovaným tématem v rámci této zkoušky. Především část objímk, které jsou dle normy použity v kovové variantě. Tato dramatická změna průřezu však vede ke vzniku místa, kde dochází ke koncentraci napětí a vzniká místo, které je kritické a náchylné k porušení, a to nesprávným způsobem, smykem. Téma objímk je diskutováno v práci kolektivu pod vedením R. Rypla [22]. V rámci této práce je autoři zaměřili především na dokonalé uchycení do objímk z epoxidové pryskyřice. Možnost použití epoxidové pryskyřice dále rozvádí i T. Vlach [37]. Autoři v rámci této práce dospívají k výsledkům za použití pouze epoxidových objímk, které korespondují s výsledky s použitím ocelových objímk. Eliminuje se kritické místo na přechodu z rovingu na ocelový profil a zároveň je zjednodušena příprava takovýchto vzorků.

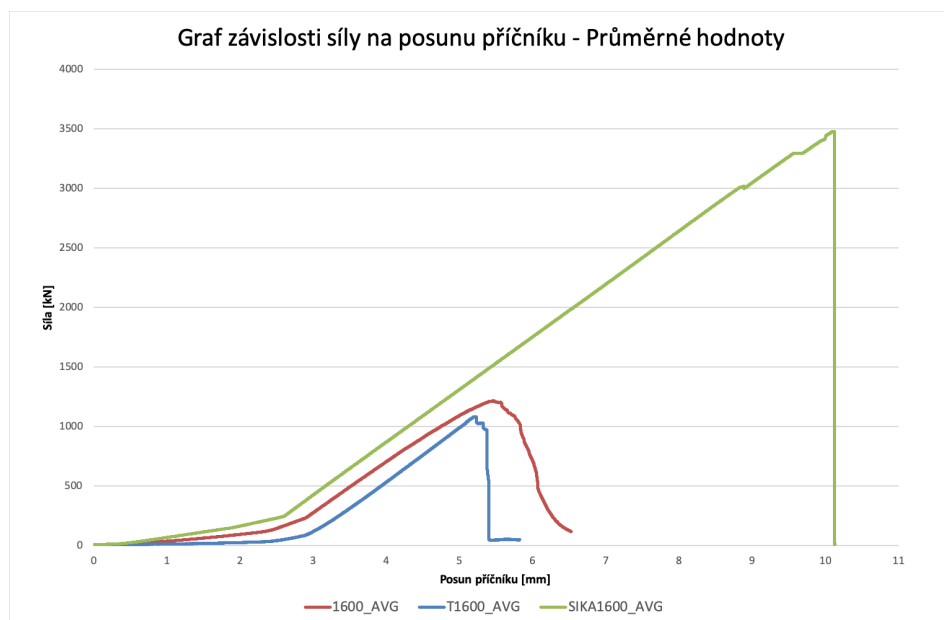
V rámci této práce byly zkoušeny uhlíkové rovingy o váze 1700 TEX. Číslovka značí jeden kilometr rovingu v kilogramech. Rovingy této gramáže byly vyrobeny ve třech základních variantách. První je varianta bez impregnace, ve které se předpokládají nejhorší výsledky tahové pevnosti. Druhou variantou



*Ocelová objímka a objímka z epoxidové pryskyřice.*

**Obrázek 3.8:** Variantní rozdíl v objímkách. [22]

je varianta s prosycením epoxidovou pryskyřicí, kde se předpokládá vyšší únosnost než u varianty první. Třetí variantou je varianta s twistováním, v podobě jedné otáčky na každých 6 cm. Tzn. 5 otáček na cca 30 cm dlouhý vzorek. Rychlost zatěžování byla zvolena jako závislá na posunu příčnicku, a to hodnotou 2 mm/min. Tato rychlost by měla poskytovat dostatečně přesné výsledky a koresponduje s rychlostí zatěžování, uváděných v jiných pracích [2]. Počet vzorků pro jednotlivá měření bylo celkem pět pro každou variantu a statisticky byly vybrány tři, které jsou statistickým výběrem. Výsledky jsou patrné z následujícího grafu.



*Hodnoty referenčních průběhů uhlíkového rovingu pro jednotlivé varianty. Modře - twistovaný neimpregnovaný vzorek. Červeně - netwistovaný neimpregnovaný vzorek. Zeleně - netwistovaný impregnovaný vzorek*

**Obrázek 3.9:** Graf závislosti síly na posunu příčnicku.

Z grafu je jasně patrný potenciál v podobě rovingů sycených epoxidovou pryskyřicí, které jsou na grafu znázorněny zeleně. V tomto případě dochází k zapojení celého průřezu v tahu, a tím oddálení progresivnímu kolapsu. Naopak u vzorků nesycených se hodnota síly při přetržení pohybuje na cca 1/3 síly při přetržení u syceného rovingu. I z tohoto důvodu budou následně předpínány rovingy sycené. Dalšími důvody jsou prokazatelně vyšší soudržnost mezi betonem a rovingem a také jednodušší práce se sycenými rovingy.

### ■ 3.3 Epoxidové pryskyřice

Nedílnou součástí průřezu kompozitu je v rámci této práce i epoxidová pryskyřice. Výsledky tahových zkoušek byly v rámci této práce již diskutovány a jednoznačně z nich vyplývá vyšší využití průřezu rovingu, který je prosycen epoxidovou pryskyřicí. Zároveň je nutné přihlédnout i k pozitivnímu vlivu opískování povrchu rovingu, které zajišťuje vyšší soudržnost s betonem [18].

U obou výše zmíněných důvodů bylo v rámci této práce nutné navrhnout pryskyřici, kterou se budou rovingy sytit. Po konzultaci s vedoucím práce a ze znalosti problematiky textilních betonů bylo vhodné přihlédnout k často diskutované otázce požární odolnosti textilního betonu, kdy lze předpokládat kritické místo v otázce požární odolnosti právě u epoxidové pryskyřice.

Paralelně s touto prací byly zkoušeny vzorky s pryskyřicemi, které by měly vykazovat vyšší odolnost vůči požáru a jejich výsledky jsou zahrnuty v diplomové práci Bc. Richarda Fürsta.

Níže jsou popsány čtyři pryskyřice, které byly použity v rámci této práce

#### ■ Pryskyřice použité v rámci této práce

##### **Sikafloor 156**

Nízkoviskózní dvousložková epoxidová pryskyřice. Nejčastěji se používá pro penetraci betonových podkladů a cementových stěrek. Poměr plnidla a tvrdidla je 3:1. V tomto poměru vykazuje lepidlo nejlepší mechanické parametry. Způsob nanášení je celoplošně s přihlédnutím k možnému přidání filleru pro snížení tekutosti. Tahová přídržnost udávaná výrobcem je 1,5 MPa. (informace převzaty z technického listu výrobce)

##### **MapeWrap 21**

Dvousložková epoxidová pryskyřice s vysokou tekutostí. Vyvinuta speciálně

pro použití přímo na stavbách. Poměr míchání plnidla:tvrdidlu je 4:1 hmotnostních dílů. Po zamíchání zůstává zpracovatelná po dobu 40 minut. Tvrдне při běžné pokojové teplotě. Přídržnost k betonu je  $> 3$  MPa. (informace převzaty z technického listu výrobce)

#### **LH 300 + tuzidlo H287**

Velmi kvalitní, středně viskózní nízkomolekulární pryskyřice pro laminování dílů z vysokou odolností (až do 160C). Nutno temperovat při 90 C po dobu min. 3 hod. Tato pryskyřice byla testována a používána při výrobě forem a dílů pro chlazení brzdového systému na vozech Škoda Fabia WRC. I přesto, že tyto díly byly vystaveny teplotám přesahujícím 250 C a zároveň neustálým nárazům, plně vyhovely extrémním nárokům na pevnost a tepelnou odolnost. Teplotní odolnost 160 C je teplotou, při které nedochází ke změnám mechanických parametrů a vlastností. (informace převzaty z technického listu výrobce)

#### **EPOREZIT EPOVILL-A**

Epoxid pro výrobu prepregů se zvýšenou tepelnou odolností. Je důležité s ním pracovat při konstantní teplotě a nízké vlhkosti vzduchu. Hlavní aplikace systému je v energetice (transformátory, výkonové tranzistory), telekomunikačním průmyslu, kondenzátorech a jiných formách. Systém vytvrzuje pouze nad 80 C. Vytvrzený systém může mít oranžově-červený nádech. (informace převzaty z technického listu výrobce)





## Kapitola 4

### Experimentální ověření

#### 4.1 Návrh formy na předpínání

Nedílnou součástí výroby předepnutých prvků obecně je předpínací dráha. Tento prvek bývá dnes standardně vybavením každé větší výrobní železobetonových prefabrikovaných konstrukcí, přičemž v souvislosti s dynamikou současného stavebního průmyslu je velkou konkurenční výhodou a zároveň prvkem, který je permanentně využíván, především pro mostní konstrukce, stropní panely a další. Standardní předpínací dráha může zaručit konstantní výrobky o rozponu v řádech desítek metrů.

Návrh samotné dráhy je založen na návrhu dle autorů W. Brameshuber, T. Brockmann [8] [38]. Autoři se ve své práci mimo jiné zabývají potenciálem předepnutých textilních skleněných výztuží. Autoři zde testují jednoduché zařízení fungující na principu dostatečně tuhého uchycení průmyslově vyráběné skleněné textilie za pomoci mechanických čelistí a jejich následného napnutí. Tento princip je pro laboratorní podmínky dostatečný, a tudíž byl zásadní inspirací pro návrh předpínací dráhy. Princip spočívá v upnutí epoxidovou pryskyřicí prosycených uhlíkových rovingů do ocelových čelistí a jejich následném posunu, a tím napnutí těchto rovingů na příslušnou hodnotu. Z tohoto systému vyvstávají dva základní problémy.

- měření skutečné síly vnesené do rovingu
- uchycení rovingu do kleští jeho následné drcení

### 4.1.1 Měření skutečné síly vnesené do rovingu

Napětí ze znalosti posunu příčnicku a modulu pružnosti je přímo úměrné posunu a modulu pružnosti. Posun příčnicku je vyvolaný pootočením šroubů v závitech a lze ho měřit posuvným měřidlem s přesností 0,01 mm. Zásadní pro tuto metodu je znalost modulu pružnosti syceného rovingu (obr. 4.1). Jeho hodnota je převzata z bakalářské práce Jiřího Žalského [20]. Dalším nezbytným parametrem pro přepočítání na konečnou sílu je znalost plochy průřezu, která byla změřena v závislosti na změně hmotnosti rovingu po sycení pryskyřicí. Ze znalostí všech těchto parametrů je výpočet patrný dle následujícího vztahu.

Vzorek	F <sub>max</sub> [N]	F <sub>max,pr.</sub> [N]	σ <sub>r</sub> [MPa]	σ <sub>r,prům</sub> [MPa]	σ <sub>c</sub> [MPa]	σ <sub>c,prům</sub> [MPa]	l <sub>0</sub> [mm]	R [V]	Δl [mm]	ε <sub>c</sub> [-]	ε <sub>c,prům</sub> [-]	E <sub>r</sub> [MPa]	E <sub>r,prům</sub>	E <sub>c</sub> [MPa]	E <sub>c,prům</sub>
S-H1	3109	3169	3438,8	3506	916	933	130	0,495	1,80	0,0138	0,0142	248574	246664	66188	65679
S-H2	3087		3414,5		909		132,5	0,494	1,79	0,0135		252076		67120	
S-H3	3052		3376,0		899		126	0,506	1,84	0,0146		231385		61611	
S-H4	2877		3182,4		847		127	0,447	1,62	0,0128		248863		66265	
S-H5	3490		3860,4		1028		127	0,506	1,84	0,0145		266682		71009	
S-H6	3400		3761,3		1002		132	0,529	2,14	0,0162		232402		61881	
S-P1	2720	3094	3008,8	3423	801	912	125	0,588	1,62	0,0130	0,0129	231584	266730	61664	71022
S-P2	2998		3316,7		883		131,5	0,447	1,62	0,0124		268560		71509	
S-P3	3354		3710,6		988		131,5	0,494	1,79	0,0136		271864		72389	
S-P4	2880		3185,7		848		129,5	0,4	1,45	0,0112		283877		75588	
S-P5	3261		3607,9		961		130	0,494	1,79	0,0138		261322		69582	
S-P6	3288		3637,9		969		129	0,482	1,75	0,0136		267980		71355	
S-P7	3159		3495,0		931		131	0,447	1,62	0,0124		281921		75067	

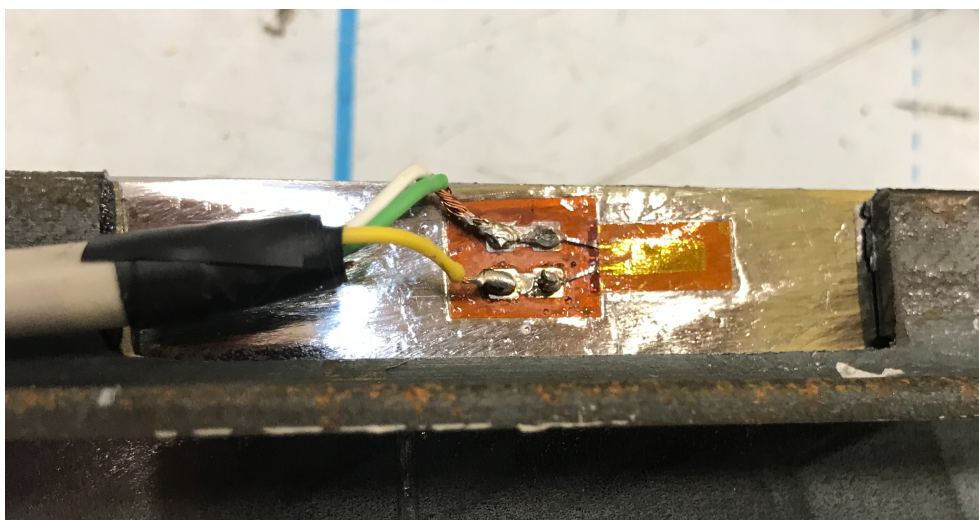
Obrázek 4.1: Modul pružnosti uhlíkového rovingu [20]

Tenzometrické měření napětí ze znalosti přetvoření konstrukce spočívá v měření napětí za pomoci tenzometru (obr. 4.2), které je založeno na změně napětí ve vodiči v závislosti na deformaci vodiče. Je předpoklad, že tento způsob je nejpřesnější, avšak časově a finančně náročný. V tomto případě by měl sloužit především k prvotnímu ověření formy.

Síla vnesená do závitu momentovým klíčem, kterou lze následně přepočítat ze znalosti momentu, který je nastaven právě na momentovém klíči, je možno snadno získat. Tato metoda však nebude v následující práci dále použita a diskutován.

### 4.1.2 Návrh a zhotovení předpínací dráhy varianta 1.

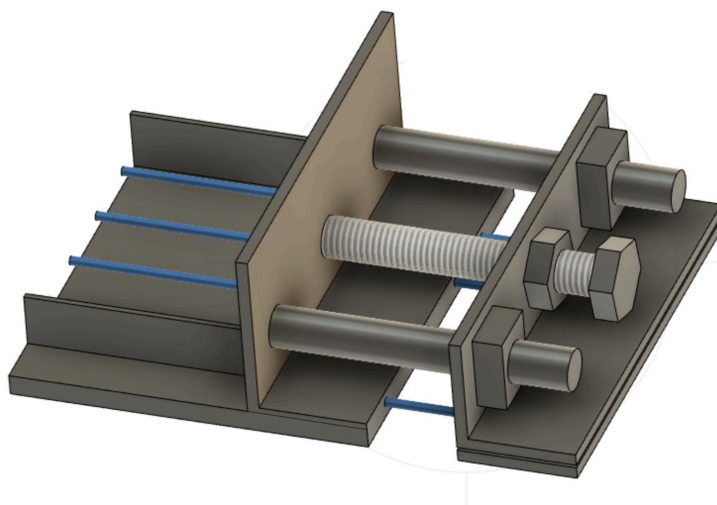
Pro naše laboratorní podmínky je však nutné předpínací dráhu značně omezit tak, aby prvky, které následně budou zkoušeny a u kterých bude ověřena jejich teoretická a skutečná únosnost, bylo možné odzkoušet v běžných podmínkách zkušebny. Jako optimální velikost předpínací dráhy byla po konzultaci zvolena dimenze, která bude zajišťovat kontinuální prvky o rozměrech 20 x 100 x 1200 mm (v x š x l). Forma byla zhotovena z běžně dostupných ocelových prvků, tj. úhelníků, pásoviny, šroubů a matek (obr. 4.3). Dráha je svými rozměry navržena tak, aby ze vzniklého prvku bylo snadno možné vyřezat tři menší



**Obrázek 4.2:** detail tenzometru

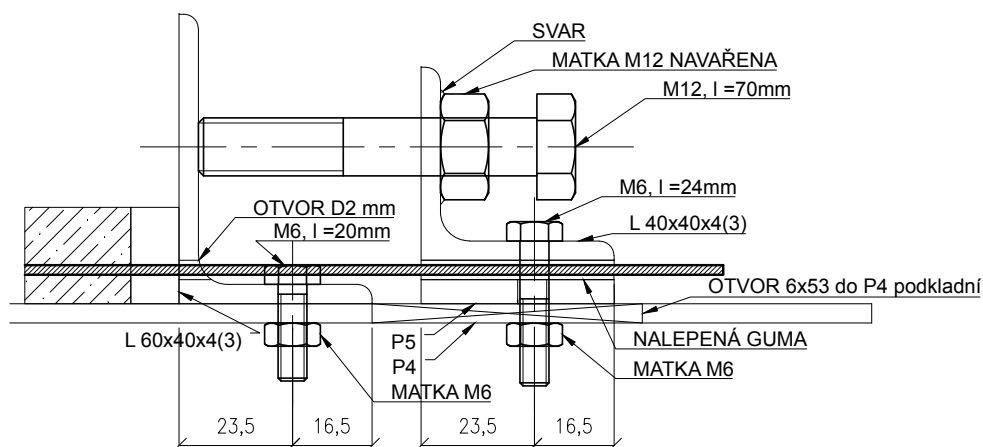
prvky, které lze zkoušet na 4-bodový ohyb. Tato zkouška, kdy je zajištěn konstantní průběh momentů mezi zatěžovacími příčnicí, poskytuje jednu variantu výsledků. Zkouška byla zvolena s ohledem na předchozí výsledky, posbírané v průběhu autorovy stáže na UCEEBu (Univerzitní Centrum Energeticky Efektivních Budov) a jejich následném porovnání s výsledky dosaženými při předchozím zkoušení nepředepnutých prvků.

**Uchycení rovingu** je předpokládáno tak, jako je tomu při tahovém zkoušení rovingů, kdy dochází k sevření prosyceného rovingu mezi ocelové profily a následnému utažení. Problematika sevření s sebou nese celou řadu problémů v podobě drcení konců rovingů v porovnání s dostatečným sevřením, tím eliminací posunu v rámci ocelových profilů (obr. 4.4). Profily jsou svírány za pomoci šroubů a matek, kdy je do spodního plechu (pásovina tl. 5 mm) za pomoci závitníků připraven závit M6. Do tohoto závitu je následně šroubován běžný šroub M6 délky 10 mm. Z důvodu drcení rovingu mezi příčnicí je prostor vyložen tuhou pryží, která zajišťuje eliminaci drcení přímo na ocelových profilech. K drcení může docházet z důvodu křehkosti konců rovingu, které je podpořeno faktem, že na prosycený roving je nanesen písek, který následně zásadně napomáhá soudržnosti mezi rovingem a betonem. Po dostatečném stažení ocelových profilů, které není nijak měřeno, např. za pomoci momentového klíče, jsou rovingy napínány. Napínání rovingů je podpořeno drobnou konstrukční úpravou na opačné straně formy, která umožňuje částečné napnutí ještě před samotným předpínáním. Tato možnost umožňuje eliminaci prvotního průhybu rovingů. Systém funguje na velmi jednoduchém principu.



**Obrázek 4.3:** Návrh předpínací formy - varianta 1.

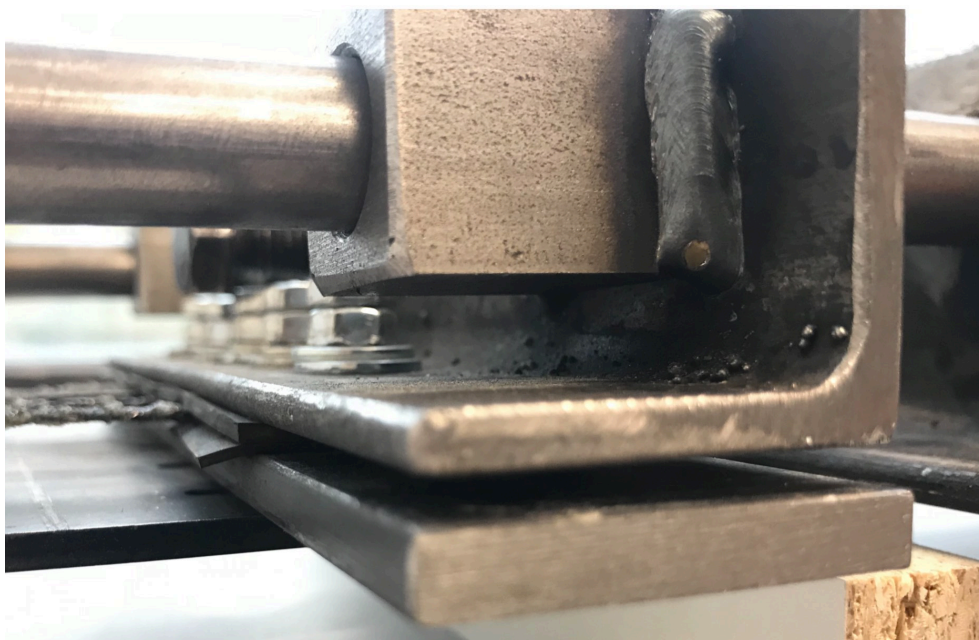
Za pomoci střídání otáčení závitových šroubů dochází k eliminaci průhybů rovingů. Je nutné vzít v potaz, že jsou předpínány všechny čtyři rovingy zároveň, což má za následek skutečnost, že může docházet k částečnému vyššímu předepnutí krajních rovingů v této části výroby. Odstranění této skutečnosti je možné, avšak předpokládá zhotovení zásadně větší formy s použitím vyššího množství materiálu, především oceli. Z časových důvodů, kdy je čekací doba na ocelový výpalek v řádu mnoha týdnů, bylo odpuštěno od varianty přesnější. Lze předpokládat, že pro ověření potenciálu předpínání textilních výztuží nemá tato technologická chyba zásadní vliv. Samotné předpínání je provedeno za pomoci jednoho šroubu, který je opřen do předem vyhloubené jamky v nerovnoramenném úhelníku. Závit, který slouží k posunutí rovnoramenného příčnicku, a tím napínání rovingů.



**Obrázek 4.4:** Schéma detailu uchycení rovingu

**Testování formy** proběhlo v první fázi pouze za použití nejjednodušší varianty, kterou je měření posunu příčnicku. Po změření hodnot a přepočtení

na teoretické vnesené předpětí byly rovingy napnuty na 50% své teoretické únosnosti, tj. 4000 N. Při této fázi bylo předpokládáno, že nedochází ani k posunu v místě sevření konců rovingu v oblasti stisknutém EPD gumou. To se následně ukázalo jako chybná varianta. Po napnutí byly vybetonovány zkušební vzorky. Třetí den od betonáže bylo vneseno předpětí, a to uvolněním šroubu. V této fázi došlo k rozřezání vzorku na tři stejně velké dílčí vzorky o rozměrech 100x20x400mm (š x tl x d). Tyto vzorky byly následně uloženy do místnosti, kde je konstantní teplota pohybující se mezi 20-22 C s vlhkost 50-60%. Po dalších 25 dnech, tj. po 28 dnech od betonáže byla provedena destruktivní zkouška čtyřbodovým ohybem. Po vyhodnocení výsledků vzorky nevykazovaly žádné zvýšení únosnosti v podobě posunutí vzniku první trhliny tak, jak bylo očekáváno. Tento fakt vedl k ověření formy detailněji, a to za pomoci tenzometrů. I přesto byla forma osazena čtyřmi tenzometry a následně provedeno opětovné napínání rovingů s předpokladem vzniku přetvoření při spodním a horním povrchu plechu. Při napínání bylo patrné přeskokování přetvoření, ale s absencí trvalé hodnoty. To vedlo k závěru, že dochází k pokluzu v místě uchycení a sevření v čelistech opatřených EPDM gumou (obr. 4.5). Detailním zaměřením se na tento detail byl zjištěn posun v této oblasti. Tato vada vedla k návrhu opatření v podobě objímek z chemické malty, a tím zabránění pokluzu v čelistech. Výsledek tohoto opatření je rozebírán v následující kapitole.



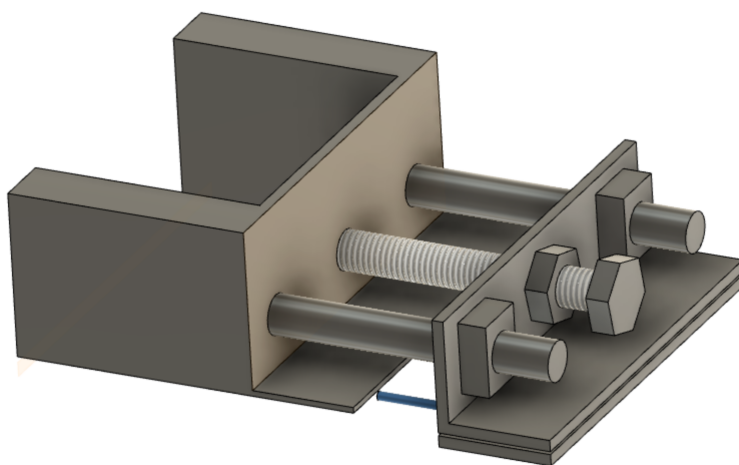
**Obrázek 4.5:** Kotvení rovingů do čelistí

### 4.1.3 Návrh a zhotovení předpínací dráhy varianta 2.

Druhá varianta formy zohlednila dva základní výsledky, které byly zjištěny u první varianty.

- dochází k pokluzu v místě uchycení rovingu
- při silnějším napínání dochází k deformaci plechu, který je po odstranění úhelníků jediným odolávajícím prvkem

**Eliminace obou výše uvedených problémů** je zde názorně diskutována. Spodní plech byl nahrazen dvěma obdélníkovými profily 50x30x2 (obr. 4.4). Tato změna byla zvolena z důvodu běžného přístupu v každé zámečnické dílně a zároveň dostatečné ohybové tuhosti na délku 1,4 m. Z důvodu odstranění podkladního plechu a bočních úhelníků, je nutné v souvislosti s úpravou formy paralelně přemýšlet o samotném bednění, do kterého má být po předepnutí vylit beton, a tím došlo k vytvoření zkušebních segmentů. Odstranění druhého problému, tj. prokluzu v čelistech, a tím odstranění prokluzu, bylo zvoleno s použitím chemické malty, s jejíž použitím byly na koncích rovingu zhotoveny zátky, které se zarazí o hranu plechů, a tím dojde k zabránění dalšího prokluzu.



Obrázek 4.6: Návrh předpínací formy - varianta 2.

**Technologie zhotovení rovingu se zátkami je zde popsána pouze souhrně. Kroky výroby:**

#### 1. zhotovení rovingu potřebné délky

- napnutí rovingu
- prosycení pryskyřicí



- opískování
  - zaschnutí po dobu 24hodin
  - odstřížení z formy
2. zhotovení objímek na jedné straně rovingů
  3. umístění rovingů do formy
  4. sevření rovingů do čelistí (stále jedna strana bez objímek a tedy není eliminace prokluzu)
  5. natažení rovingů (zde dochází k pokluzu) z důvodu eliminace při natažení rovingů vzniklého výrobního průhybu
  6. zhotovení objímek na druhé straně rovingů těsně u čelistí
  7. finální napínání za předpokladu pouze minimálních prvotních prokluzů



*Zakotvení rovingů za pomoci chemické malty jako zarážky.*

**Obrázek 4.7:** Detail rovingů opatřených chemickou maltou

Takto zhotovená forma včetně rovingů byla znovu opatřena tenzometry, v tomto případě po diskuzi pouze dvěma. Po utahování šroubu, a tím vnášení napětí do rovingů, byl v první fázi zaznamenána malá oscilace přetvoření, která je pravděpodobně způsobena dosedáním objímek z chemické malty k čelistem, které zůstávají opatřené EPDM gumou, a to i s přesahem tak, aby dotyk objímek nebyl přímo na ocel. EPDM zde působí podobně jako pryžové ložisko u prefa-betonových konstrukcí.

Po překročení fáze dosedávání je na tenzometrech patrné jasně měřitelné přetvoření. Míra přetvoření byla stanovena na  $120 \mu\text{m}$ . Po zastavení dalšího

předpínání dochází k rychlému poklesu o cca  $30 \mu\text{m}$  k hodnotám kolem  $90 \mu\text{m}$ . Takto předepnutá výztuž byla ponechána 3 dny v klidu, přičemž každý den probíhalo měření tak, aby se zjistilo, jestli není pokles deformace a s tím spojeného napětí na rovingách trvalý. Po třech dnech, tj. v okamžiku předpokládaného vnesení předpětí do průřezu je hodnota ustanovena na cca  $\mu\text{m}$ , a to již po dobu 24h. Nutno zmínit, že z důvodu excentricity napětí vůči příčnicím, na kterých je deformace měřena, je nutné vzít v potaz hodnotu deformace i na spodní hraně příčnicku. Z toho lze usuzovat, že napětí na příčnicích je tvořeno tlakovou normálovou silou a ohybovým momentem. Síla vnesená do rovingů je spočtena dle následujícího vztahu, který je doplněn názorným schématickým doprovodem v podobě schémat pro ilustraci deformaci a napětí od normálové síly a ohybového momentu. Měření, které je důkazem zůstatku napětí na rovingách i po uplynutí třech dní od vnesení předpětí, je dále diskutováno v následující kapitole [5](#).



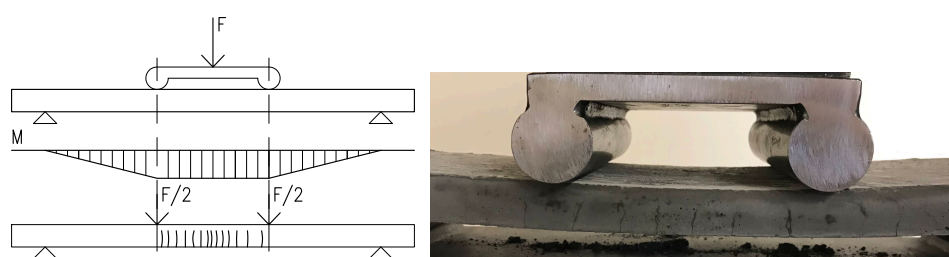
**Obrázek 4.8:** Konečná podoba formy včetně napnutých rovingů



## 4.2 Zkouška čtyřbodovým ohybem

### 4.2.1 Princip zkoušky

Ověření potenciálu předpětí textilních betonů je v rámci této práce prováděno na standartní zkoušce čtyřbodovým ohybem, která je běžnou ohybovou zkouškou se značnou četností, právě u textilních betonů. Její princip spočívá v ohybovém namáhání vzorků, kde je jasně uvedena pozice výztuže, stejně tak jako je dána rozteč podpor a zatěžovacího mechanismu. Zkouška čtyřbodovým ohybem poskytuje z principu rozložení vnitřních sil na konstrukci značné místo, kde může docházet k porušení, a to z důvodu konstantního průběhu momentu v této části. Názorně je tento fakt popsán obrázkem níže.



*Schéma momentu při zkoušce 4-bodovým ohybem (vlevo), skutečný průběh korespondující se schématem (vpravo)*

**Obrázek 4.9:** Schéma momentu při zkoušce

Rychlost zatěžování byla zvolena na hodnotu 0,02 mm/s. Tato rychlost poskytuje dostatečnou jemnost výsledků.

### 4.2.2 Výroba vzorků

Rozměr vzorků pro zkoušky čtyřbodovým ohybem byl zvolen na hodnotu 360x100x20mm (l x š x v). Výroba prvků spočívala z několika základních kroků, které byly uvedeny již dříve [4.1.3](#). Tyto kroky se týkají především samotného napínání. Další nedílnou součástí výroby vzorků je betonáž. Ta probíhala do formy z voděvzdorné překližky, která byla ošetřena separačním prostředkem v podobě odformovacího oleje. Tato forma byla nasazena na ocelový rám tak, aby byly roviny pravidelně rozmístěny v rámci formy. Laminátová forma byla k předpínací ocelové části kotvena pouze za pomoci čtyř šroubů tak, aby byla zajištěna dostatečná vůle a nedocházelo k přenosu napětí skrze právě tyto šrouby a spodní laminátovou desku. Takto připravená forma byla následně zalita betonovou směsí [3.1](#). Směs, jak již bylo řečeno, vykazuje dostatečně samozhutňující parametry, a není tedy nutné další vibrování. Směsi UHPC a HPC obecně vykazují vysokou míru smrštění, které je

zásadně závislé nejen na množství cementu, vody a dalších složkách směsi, ale taky na ošetřování v průběhu tvrdnutí. Z tohoto důvodu byly veškeré vybetonované vzorky vždy zakryty igelitovou fólií, aby se minimalizoval odpar vody. Vzorky byly následně ponechány 3 dny v klidu v teplotě cca 20-22°C a vlhkosti 50-60%. Třetí den bylo do zatvrdlých vzorků vneseno předpětí, a to postupným uvolňováním šroubu za současného měření deformace. Deformace po uvolnění oscilovala na hodnotách kolem 0  $\mu\text{m}$ , což lze považovat za dokonalé. Po vnesení předpětí byly vzorky ponechány další 3 dny ve formě a následně byly odformovány a popsány. První vizuální přezkoumání jasně značí vnesenou tlakovou sílu, která je patrná na eliminaci trhlin na takto subtilním a dlouhém prvku. Eliminace trhlin je názorně prezentována na následujících obrázcích [4.10](#).



*Porovnání vzniku a eliminace trhlin u předepnutého (vlevo) a nepředepnutého (vpravo) prvku.*

**Obrázek 4.10:** Porovnání vzniku a eliminace trhlin

Odformované vzorky byly následně nařezány na tři stejně velké desky o rozměrech cca 360x100x20 mm. Tyto desky byly následně zabaleny do igelitu a ponechány až do desátého dne od betonáže, kdy byly odzkoušeny.

Zkoušení probíhalo standardním zkoušením rychlostí 0,02mm/s jak již bylo popsáno dříve [4.2.1](#).

Výsledky zkoušky jsou detailně znázorněny v dalších kapitolách a to včetně diskuze.

## 4.3 Výroba rovingů s teplem vytvrzovanými pryskyřicemi

Velmi diskutovaným tématem v souvislosti s textilními betony je požární odolnost těchto konstrukcí. Celý kompozit lze rozdělit na dvě základní složky beton a rovingy. Jak bylo zmíněno již dříve [5.1](#). Výsledek v podobě výrazně vyšší únosnosti rovingů sycených epoxidovou pryskyřicí předurčuje právě tento typ ošetření k dalšímu zkoumání. Zásadní otázkou je tedy typ použité pryskyřice, která by měla být dostatečně tvrdá tak, aby výsledek tahové maximálně korespondoval s teoretickou únosností. Zároveň je nutné diskutovat téma požární odolnosti, kde epoxidové pryskyřice v principu neposkytují vysoké odolnosti. V rámci této práce byly celkově zkoušeny čtyři pryskyřice, přičemž pouze jedna z nich byla hned na začátku práce zkoušena na tahovou pevnost a to především z důvodu lepšího pochopení způsobu porušení syceného a nesyceného rovingu. Ostatní varianty pryskyřic byly rovnou připraveny k následné betonáži a to i z časových důvodů.

Z hlediska tepelné odolnosti byly diskutovány s předním českým dodavatelem možnosti použití různých pryskyřic s vyšší tepelnou odolností. Tyto pryskyřice mají bod vytvrzení závislý na vyšší teplotě pohybující se v hodnotách kolem 100C. Z tohoto důvodu bylo nutné sestrojít dostatečně dlouhou pec, která by měla dostatečnou tepelnou odolnost tak, aby byla zajištěna konstantní teplota.

Návrh jednoduché laboratorní pece byl založen na jednoduchém principu komínového efektu stoupajícího teplého vzduchu. Jako základní kostra pece byla použita běžná nerezová trubka tl. 0,2mm, která je používána jako okapový svod. Tato trubka je následně ovinuta nehořlavou minerální vatou tloušťky 140mm a následně obalena silnou igelitovou fólií.

Vyhřívání pece bylo zajištěno za pomoci horkovzdušné pistole s výkonem 1000W. Tato horkovzdušná pistole je na ústí schopna vytvářet teplotu až 500C.

Ověření formy probíhalo jednoduchým způsobem, kdy byla za pomoci běžného vpichového teploměru měřena teplota na druhém konci. Sledovaná hodnota byla při cca. 50% výkonu horkovzdušné pistole na hodnotě 200 C bez známky poklesu.

Samotná výroba teplem vytvrzených rovingů probíhala na UCEEBu (Univerzitní Centrum Energeticky Efektivní Budov), kde byla forma umístěna do svislé polohy, ve které je maximalizován komínový efekt. Do takto umístěné formy byly, za pomoci sekundární konstrukce v podobě dřevěného hranolu, umístěny rovingy. Rovingy jsou nataženy v pozici, kdy se nedotýkají nerezové trubky ani dřevěného hranolu, a je tedy zajištěn dostatek prostoru pro



*Reálný pohled na řez vytvrzovací pece (vlevo). Pohled na teploměr s hodnotou teploty na konci pece.*

**Obrázek 4.11:** Pohled na pec

proudění teplého vzduchu podél celého povrchu rovingů. V rámci jednoho cyklu bylo umožněno vytvrzení až šesti rovingů. Proces vytvrzení trval více než dvě hodiny.

# Kapitola 5

## Výsledky

V rámci této kapitoly budou detailně prezentovány a vysvětleny dosažené výsledky. Výsledky jsou strukturovány dle logické posloupnosti.

### 5.1 Vnesená předpínací síla

Zásadním dílčím cílem této práce je pochopení a ověření způsobu vnesení předpínací síly do betonového průřezu. Z důvodu přesného měření vnesené předpínací síly je nutné zjistit, k jakému poklesu síly v rovingu dochází v prvních třech dnech od napnutí, které odpovídají časovému úseku mezi předepnutím rovingu a vnesení předpětí do zabetonovaného průřezu.

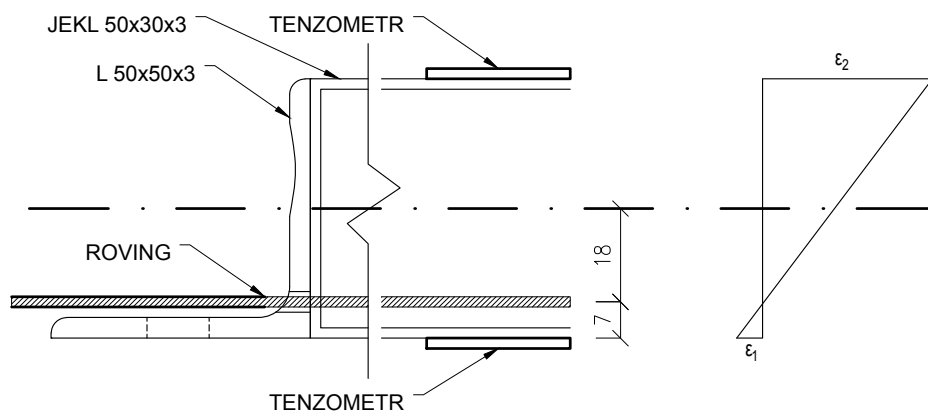
Měření ztrát předpětí v prvních třech dnech probíhalo za pomoci dvou tenzometrů, které byly umístěny na protějšcích příčnicích při horním a dolním povrchu.

Z důvodu excentrického umístění uhlíkových rovingů je nutné zahrnout vliv konstantního momentu, který působí po délce rovingu. Moment s sebou nese část síly vnesené do výztuže.

Ze znalosti deformace tenzometrů lze dopočítat sílu vnesenou do rovingů dle vztahu uvedeného níže. Druhým zásadním parametrem, který lze ze vztahu dopočítat, je excentricita, která by měla v maximální míře korespondovat s reálným uložením rovindů v rámci formy.

Výpočet předpínací síly  $P$  a excentricity  $e$  ze znalosti přetvoření příčniců.

$$\sigma_P + \sigma_{MP} = \sigma_s \quad (5.1)$$



Uložení rovingů včetně teoretické deformace jechlů

Obrázek 5.1: Schéma umístění tenzometru

$$\frac{P}{A} + \frac{P \cdot e}{W} = E \cdot \epsilon_1 \quad (5.2)$$

$$e = \frac{\frac{E \cdot \epsilon_1 \cdot A \cdot W}{P} - W}{A} \quad (5.3)$$

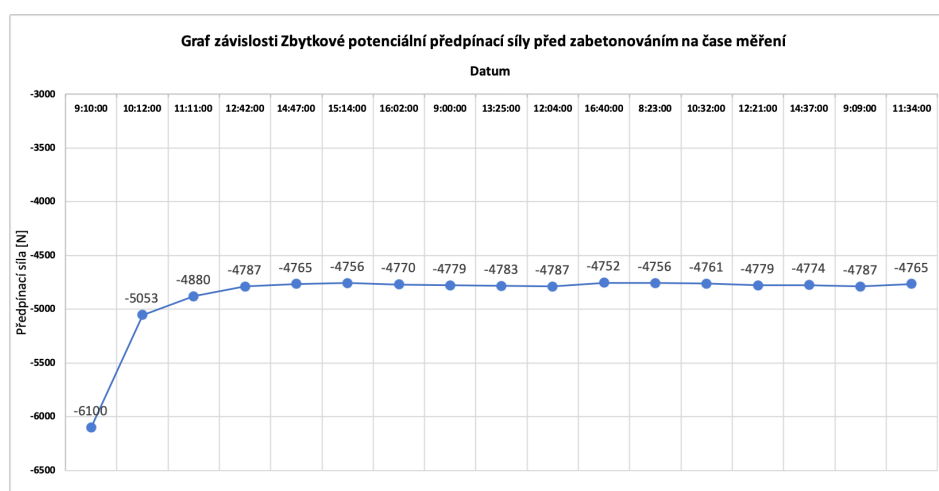
$$-\frac{P}{A} + \frac{P \cdot \frac{\frac{E \cdot \epsilon_1 \cdot A \cdot W}{P} - W}{A}}{W} = E \cdot \epsilon_2 \quad (5.4)$$

$$P = \frac{E \cdot \epsilon_2 - E \cdot \epsilon_1}{-\frac{1}{A} - \frac{1}{A}} \quad (5.5)$$

Pro názornost je zde (tab: 5.1) ukázán výpočet jedné hodnoty předpokládané předpínací síly číselně.

Den	Čas	$\epsilon_1$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\epsilon_2$ [ $\mu\text{m}$ ]	$P_1$ [N]	$P_2$ [N]	e [mm]
16.10.	9:10:00	19,1	-118,9	-6100	-6100	21,65
	10:12:00	16,2	-98,1	-5053	-5053	21,57
	11:11:00	16,1	-94,3	-4880	-4880	21,47
	12:42:00	15,9	-92,4	-4787	-4787	21,44
	14:47:00	15,7	-92,1	-4765	-4765	21,47
	15:14:00	15,7	-91,9	-4756	-4756	21,46
	16:02:00	15,5	-92,4	-4770	-4770	21,52
17.10.	9:00:00	15,7	-92,4	-4779	-4779	21,48
	13:25:00	15,8	-92,4	-4783	-4783	21,46
	12:04:00	15,5	-92,8	-4787	-4787	21,53
	16:40:00	15,5	-92,0	-4752	-4752	21,51
18.10.	8:23:00	15,5	-92,1	-4756	-4756	21,51
	10:32:00	15,6	-92,1	-4761	-4761	21,49
	12:21:00	15,8	-92,3	-4779	-4779	21,46
	14:37:00	15,5	-92,5	-4774	-4774	21,52
21.10	9:09:00	15,8	-92,5	-4787	-4787	21,46
	11:34:00	15,8	-92,0	-4765	-4765	21,45

Tabulka 5.1: Tabulka výsledků zbytkového napětí v čase. Délka měření více než tři dny



**Obrázek 5.2:** Graf vyjadřující zbytkové napětí v závislosti na čase

Jak je názorně vidět z grafu (graf: 5.2) uvedeného výše, po napnutí rovingu dochází v prvních okamžicích k prudkému poklesu vnesené síly. Hodnota poklesu je jmenovitě z -6100N na -5053N, což odpovídá poklesu o cca 20%. Tento pokles může být způsoben řadou faktorů. Zásadním však je protažení rovingu z důvodu nedostatečně tvrdé pryskyřice, kterou byly vzorky syceny. Po tomto poklesu a částečném protažení pryskyřice dochází k zapojení výrazně většího počtu fibril v rámci průřezu a pokles síly je zastaven.

Dále je patrné ustálení přepínací síly na hodnotě oscilující kolem síly -4770N. Oscilace síly v řádu desetin procent je způsobena oscilací tenzometru, a tedy nepřesností v odečítání hodnot.

Kontrola přesnosti měření tenzometru stejně jako přesnosti odečítání může být v podobě jemné oscilace excentricity  $e$  (tab: 5.1).

## 5.2 Výsledky ohybové zkoušky

Jak již bylo řešeno dříve, ověření vlivu předpětí bylo sledováno a bude v rámci této kapitoly vyhodnoceno na zkoušce čtyřbodovým ohybem. Veškeré zkoušení probíhalo na Fakultě stavební ČVUT u Ing. Kokeše.

V rámci této práce měly být zkoušeny čtyři základní sady vzorků, které se liší rozdílnou pryskyřicí, která byla použita pro sycení rovingů. Jedna sada s použitím pryskyřice od společnosti MapeWrap však neumožňovala vnesení dostatečné síly a docházelo k porušení vzorků již při nízkých hodnotách napětí. Předčasná destrukce byla způsobena nedostatečným prosycením rovingů, kdy docházelo k vytvoření pouze slupky z pryskyřice po obvodu průřezu a střed



průřezu nebyl plně zapojen při napínání. Tato pryskyřice tedy nevykazuje dostatečnou tuhost po vytvrnutí a je vhodná spíše jen pro sycení rovingů.

V následující tabulce je přehledně ukázán typ pryskyřice, síla rovingu vyjádřená v jednotkách TEX a dále síla na kterou byly rovingy napnuty, případně při jaké síle byly rovingy přetrženy. Síla byla dopočítána ze znalosti přetvoření dle vztahu uvedeného dříve (obr: 5.1). Parametr  $M$  značí míru využití rovingů vůči jejich očekávané tahové únosnosti.

Typ pryskyřice	m [Tex]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\epsilon_1$ [ $\mu$ m]	$\epsilon_2$ [ $\mu$ m]	e [mm]	$N_{e1}$ [N]	$N_{e2}$ [N]	$N_{avg}$ [N]	n [ks]	$F_{r1}$ [N]	$F_{rn}$ [N]	M [%]	Porušení [Ano/Ne]	Způsob porušení
Sikafloor 156	800	1777	-69,2	11,9	17,9	2523,3	2478,1	2500,7	4	1599,6	6398,4	39,1%	ano	přetržení na přechodu rovingu skrz úhelník
Sikafloor 156	1600	1777	-72,3	12,7	17,9	2636,4	2644,7	2640,5	4	3199,2	12796,8	20,6%	ano	přetržení na přechodu rovingu skrz úhelník
Sikafloor 156	1600	1777	-62,3	11,7	17,9	2271,7	2436,4	2354,1	4	3199,2	12796,8	18,4%	ne	
Sikafloor 156	3700	1777	-90,2	15,4	17,9	3289,1	3206,9	3248,0	4	7398,2	29592,6	11,0%	ne	
MapeWrap	1600	1777	-70,0	15,0	17,9	2552,5	3123,6	2838,1	4	3199,2	12796,8	22,2%	ano	přetržení uprostřed formy
MapeWrap	3700	1777	-70,0	15,0	17,9	2552,5	3123,6	2838,1	4	7398,2	29592,6	9,6%	ano	přetržení uprostřed formy
LH 300	3700	1777	-89,4	13,8	17,9	3259,9	2873,7	3066,8	4	7398,2	29592,6	10,4%	ne	
Eporezit Epovill-A	3700	1777	-83,2	14,2	17,9	3033,8	2957,0	2995,4	4	7398,2	29592,6	10,1%	ne	

Tabulka znázorňující všechny varianty předpínání dle druhu pryskyřice a síly rovingu. Zeleně jsou označeny varianty, které se podařilo předepnout a byly tedy následně odzkoušeny. Bílé jsou varianty, u kterých došlo k přetržení rovingu a tedy se nepodařilo prvek předepnout.

**Tabulka 5.2:** Tabulka znázorňující varianty předpínání

Výsledky jsou v rámci této práce nejdříve rozděleny dle pryskyřice použité k sycení rovingu. Po prezentaci těchto dílčích výsledků jsou dále popsány výsledky souhrnně tak, aby bylo možné vytvoření komplexního obrázku z hlediska variantního použití pryskyřic.

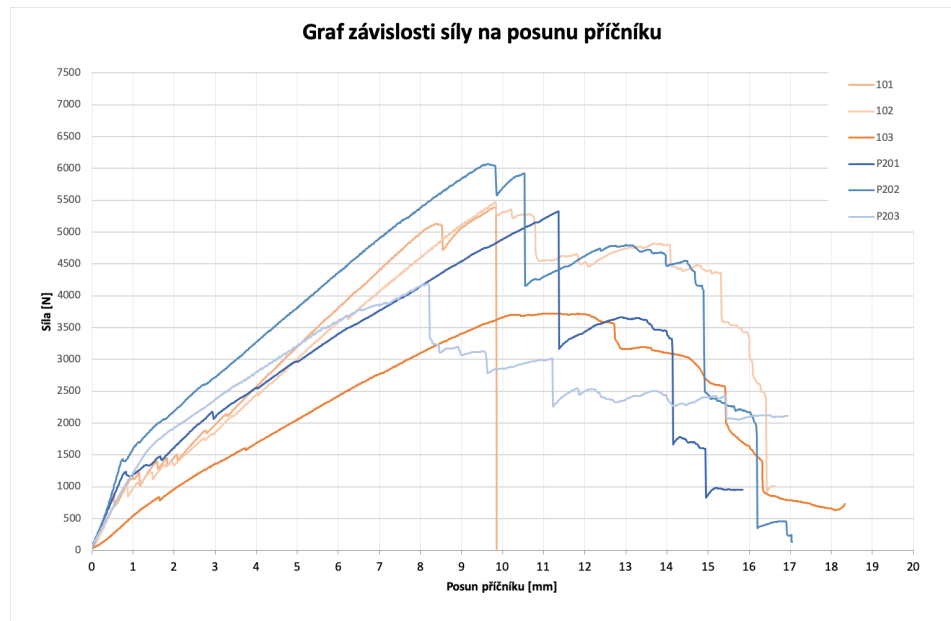
## 5.2.1 Sikafloor 156

Jako první výsledky byly analyzovány výsledky z prvků, kde byla pro sycení rovingu použita pryskyřice Sikafloor 156.

Jak je patrné z grafu, (graf: 5.3) mezi předepnutými a nepředepnutými prvky není na první pohled jasně patrný rozdíl, např. v posunu první trhliny, jak je tomu běžné u předepnutých ocelových konstrukcí.

Graf závislosti síly na posunu nemusí být nejlepším ukazatelem pro hodnocení výsledků, jelikož není nikde zohledněn průřez prvku. Z tohoto důvodu bude detailní rozbor proveden na grafu závislosti napětí na posunu příčnicku. Grafy závislosti síly na posunu příčnicku jsou uvedeny v příloze této práce. K přesné charakterizace je nutné znát rozměry průřezu, které byly v rámci této práce změřeny posuvným měřidlem a jsou uvedeny v tabulce (tab: 5.3).





*Modře jsou znázorněny předepnuté prvky. Oranžově jsou znázorněny nepředepnuté prvky*

**Obrázek 5.3:** Graf závislosti síly na posunu příčniku

Sika nepředepnuté	b	$h_1$	$h_2$	$h_3$	$h_{avg}$
1.01	100,00	19,90	20,10	19,89	19,96
1.02	100,00	19,17	19,10	19,13	19,13
1.03	100,00	17,30	17,01	17,83	17,38
Sika předepnuté	b	$h_1$	$h_2$	$h_3$	$h_{avg}$
2.01	100,00	20,91	21,56	20,33	20,93
2.02	100,00	21,10	20,08	20,60	20,59
2.03	100,00	20,80	21,12	20,61	20,84

**Tabulka 5.3:** Tabulka průřezů pro prvky sycené SIKA pryskyřicí

Výpočet elastického napětí v krajních vláknech je uveden níže:

$$\sigma = \frac{M_f}{W} \quad (5.6)$$

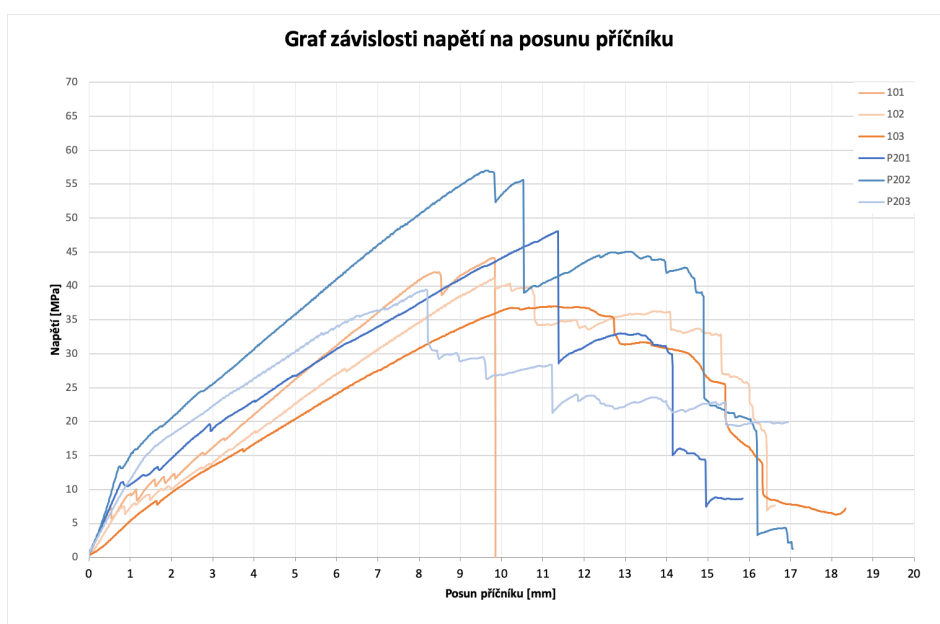
$$M_f = \frac{F}{2} \cdot \frac{L}{3} \quad (5.7)$$

$$W = \frac{1}{6} \cdot b \cdot h^2 \quad (5.8)$$

$$\sigma = \frac{\frac{F}{2} \cdot \frac{L}{3}}{\frac{1}{6} \cdot b \cdot h^2} \quad (5.9)$$

$$\sigma = \frac{F \cdot L}{b \cdot h^2} \quad (5.10)$$

Z grafu závislosti napětí na posunu příčniku (graf: 5.4) je patrné, že u předepnutých prvků dochází ke zvýšení únosnosti. Významnější výsledek je



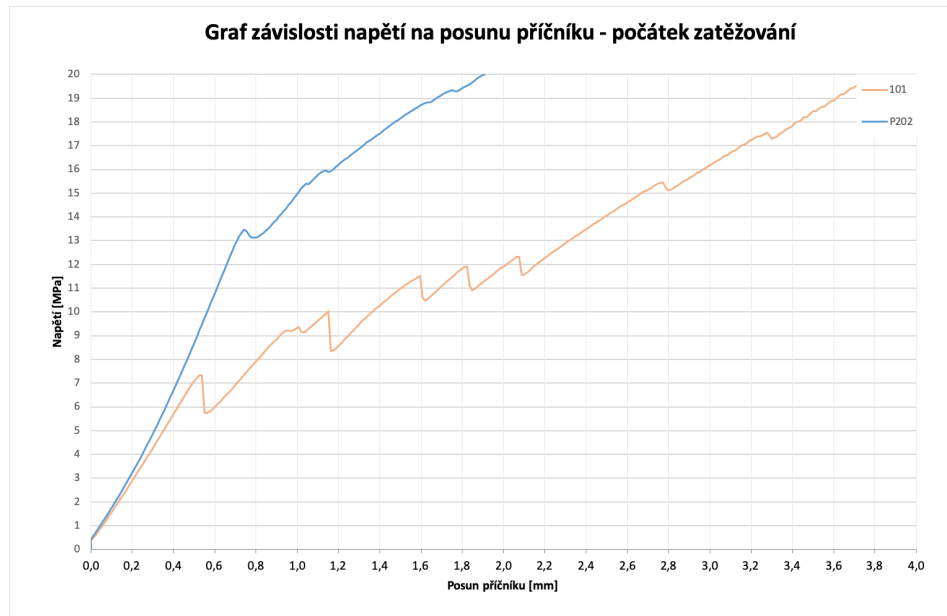
*Modře jsou znázorněny předepnuté prvky. Oranžově jsou znázorněny nepředepnuté prvky*

**Obrázek 5.4:** Graf závislosti napětí na posunu příčniku.

však především v počátcích zatěžování těsně po vzniku první trhliny. Je patrné, že po vniku první trhliny dochází k masivnějšímu rozvoji trhlín s výrazným otevřením u nepředepnutých prvků. U předepnutých prvků je rozvoj trhlín výrazně menší, stejně jako jejich šířka. Názorně je výsledek prezentován na následujícím grafu (graf: 5.5).

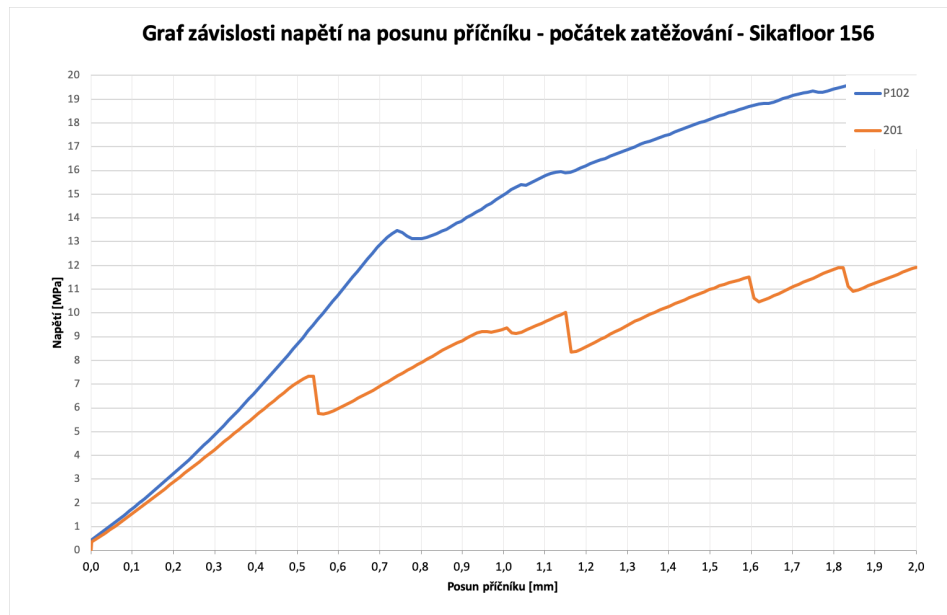
Jak je patrné z grafu, (graf: 5.5) vznik první trhliny je u předepnutých prvků posunut zhruba na dvojnásobnou hodnotu napětí v ohybu. Tento fakt jasně ukazuje pozitivní vliv na vznik první trhliny. Dále je z grafu patrný rozdílný rozvoj trhlín. U nepředepnutého prvku je zřejmý rozvoj většího množství trhlín s výrazně větší šířkou. V tomto případě se jedná o sedm jasně definovatelných trhlín. Předepnutý prvek oproti nepředepnutému vykazují vznik první trhliny při větší hodnotě napětí v ohybu. Zásadní je rozvoj trhlín po vzniku první trhliny, který je minimální. Na grafu nejsou patrné skokové poklesy napětí. Z pozorování v laboratoři a z fotek uvedených dále je však patrné, že drobné trhliny vlasového charakteru vznikají (obr: 5.6). Lze tedy předpokládat, že předpětí má nejen pozitivní vliv na vznik první trhliny, ale stejně tak pozitivně ovlivňuje i rozvoj následných trhlín, které okamžitě uzavírá.

Důležitou součástí výsledků je i objektivní zhodnocení sklonu křivky před vznikem první trhliny. Sklon křivky reprezentující tuhost průřezu je patrně větší u předepnutých prvků. Lze tedy hodnotit, že předepnuté prvky mají před vznikem první trhliny vyšší tuhost.



*Modře jsou znázorněny předepnuté prvky. Oranžově jsou znázorněny nepředepnuté prvky.*

**Obrázek 5.5:** Graf závislosti napětí na posunu příčniku v počátku zatěžování.



*Ve skutečnosti jsou trhliny okem prakticky neviditelné. Jejich zvýraznění bylo dosaženo navlhčením hrany průřezu.*

**Obrázek 5.6:** Trhliny vznikající u předepnutého prvku.

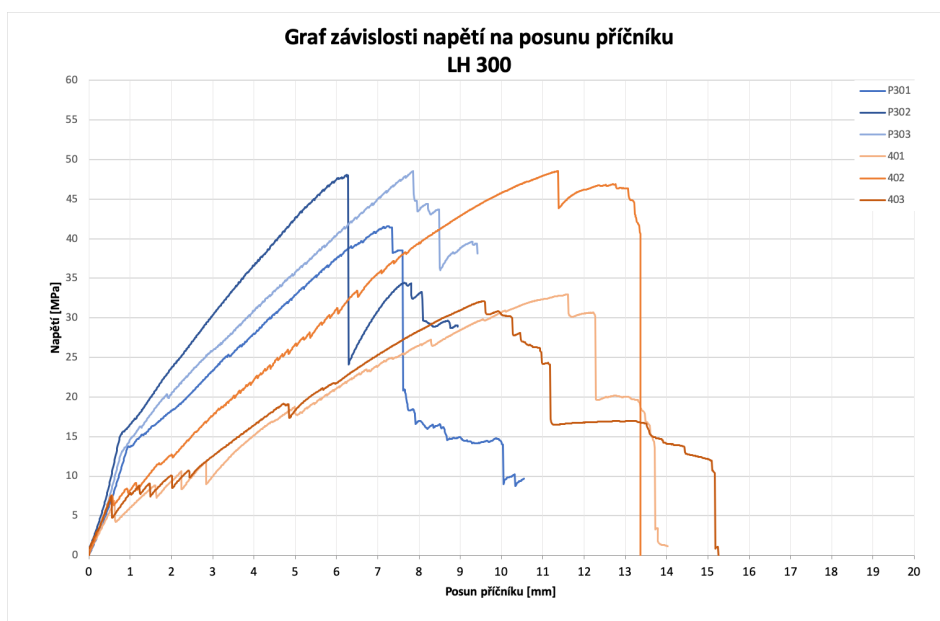
Jak bylo zmíněno v počátku této kapitoly, (obr: 5.2) nejprve byl analyzován první případ s ohledem na další alternativy v podobě jiných použitých pryskyřic, které by měly být výrazně tvrdší, a poskytovat tedy vyšší hodnoty únosnosti z důvodu dřívější aktivace všech uhlíkových fibril v rámci průřezu.

Další výsledky jsou již právě s výše zmíněnými alternativami v podobě teplem vytvrzovaných pryskyřic.

## 5.2.2 LH 300

Druhými výsledky jsou výsledky s epoxidovou pryskyřicí vytvrzovanou teplotou. Pryskyřice byla vytvrzována po dobu 120 minut při teplotě 80C. Po vytvrzení vykazovala drobnou změnu barvy k oranžové.

Pro názornost je znovu uveden graf závislosti napětí na posunu příčniku. V rámci výsledků již není znovu uveden výpočet napětí ze znalosti působící síly. Vztah je dostatečně názorně uveden již dříve (5.6).

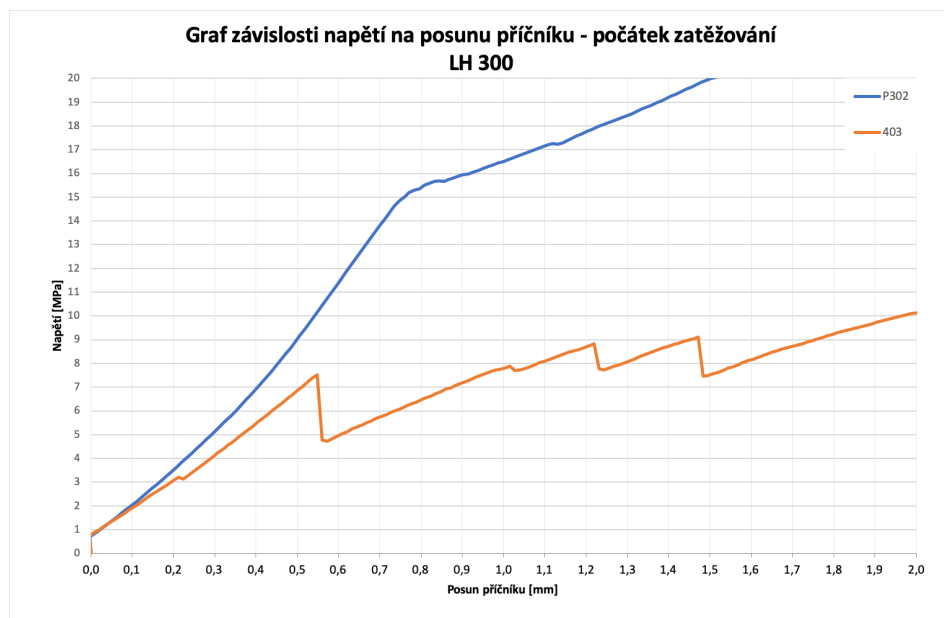


*Modře jsou znázorněny předepnuté prvky. Oranžově jsou znázorněny nepředepnuté prvky.*

**Obrázek 5.7:** Graf závislosti napětí na posunu příčniku pro vzorky s teplem vytvrzovanou pryskyřicí LH 300.

V rámci grafu (graf: 5.7) jsou oranžově znázorněny výsledky nepředepnutých vzorků. Varianta bez předepnutí znovu vykazuje nižší hodnoty při kterých dochází ke vzniku první trhliny. Z hlediska napětí je hodnota vzniku první trhliny okolo 7MPa. Tato hodnota koresponduje s ohybovou pevností referenčních vzorků (tab: 3.3) při normové ohybové zkoušce. Modře jsou v rámci grafu

znázorněny předepnuté vzorky. Předepnuté vzorky vykazují vyšší hodnotu ohybové pevnosti při vzniku první trhliny. Po vzniku trhliny je sklon křivky vyšší což naznačuje vyšší tuhost průřezu.



Modře jsou znázorněny předepnuté prvky. Oranžově jsou znázorněny nepředepnuté prvky

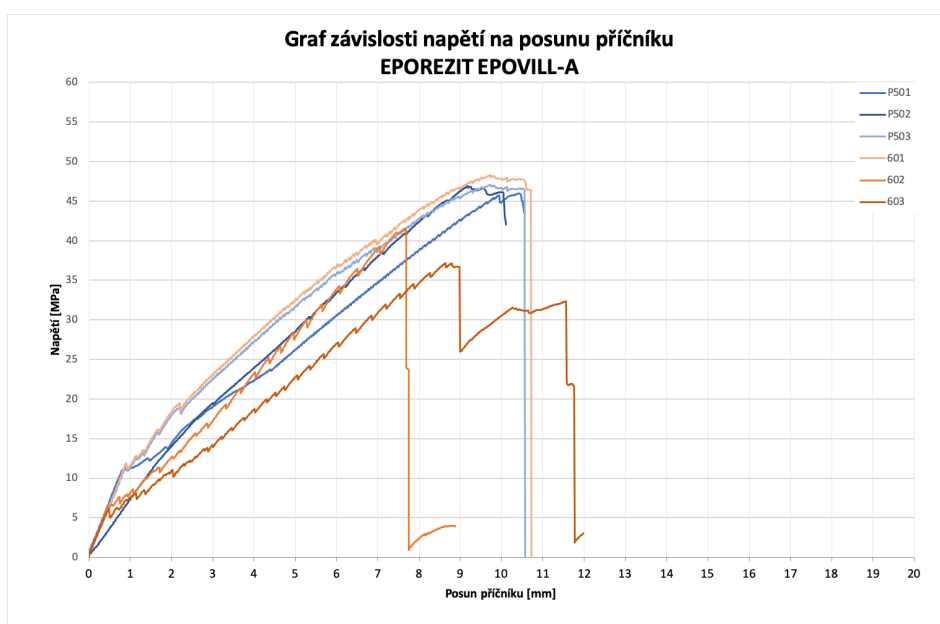
**Obrázek 5.8:** Graf závislosti napětí na posunu příčnicku v počátku zatěžování pro vzorky s teplem vytvrzovanou pryskyřicí LH 300.

Z grafu 5.8, který znázorňuje počátky zatěžování ohraničené třemi milimetry posunu je názorně patrný posun vzniku první trhliny u předepnutých vzorků, které jsou na grafu reprezentovány modrou křivkou. Dalším výsledkem je vznik výrazných trhlin okamžitě po vzniku první trhliny. Trhliny jsou reprezentovány skokovými poklesy hodnoty napětí. Jednoznačně viditelný výsledek nižší tuhosti průřezu reprezentován sklonem křivky.

### 5.2.3 EPOREZIT EPOVILL-A

Jako poslední dílčí výsledek jsou uvedeny grafy s použitím pryskyřice Eporezit Epovill-A, kdy se znovu jedná o teplem vytvrzovanou pryskyřici, jejíž detailní popis byl uveden v dřívějších kapitolách (kap: 3). Z grafu, kde oranžové průběhy znázorňují nepředepnuté prvky a modré průběhy předepnuté prvky, je znovu jasně patrný vliv předpětí v podobě oddálení vzniku první trhliny a to zhruba na hodnotu 13MPa, která je pro 10. den dvojnásobnou hodnotou ohybové únosnosti (graf: 5.9).

V následujícím grafu (graf: 5.10) je znovu přiblíženo na počátek zatěžování tak, aby byl vidět vliv předpětí i před vznikem trhliny. Znovu jsou patrné



*Modře jsou znázorněny předepnuté prvky. Oranžově jsou znázorněny nepředepnuté prvky.*

**Obrázek 5.9:** Graf závislosti napětí na posunu příčniku pro vzorky s teplem vytvrzovanou pryskyřicí EPOREZIT EPOVILL-A.

masivní trhliny u nepředepnutého prvku v porovnání s předepnutým. Posun první trhliny předepnutého prvku je zhruba o 100% dále než je tomu u nepředepnutého referenčního prvku.

### 5.3 Komplexní výsledky se zahrnutím ztrát předpětí

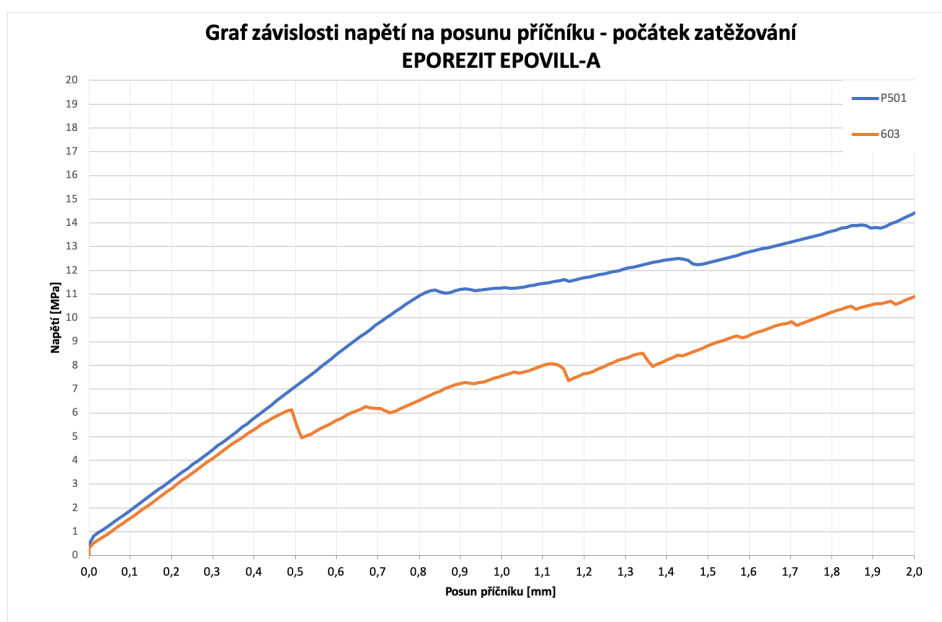
V rámci této podkapitoly budou názorně ukázány výsledky s důrazem na porovnání s předpokládanými výsledky ze znalosti předpínací síly. Základní vztah pro předepnutý průřez je ukázán níže.

Pro odečtení síly, při vzniku první trhliny, byla použita data zaznamenaná v rámci měření. Pro názornost je zde uveden souhrnný graf všech předepnutých vzorků, ze kterých došlo k uvedenému odečtu síly

$$\sigma_{res} = \sigma_P + \sigma_{Pe} \quad (5.11)$$

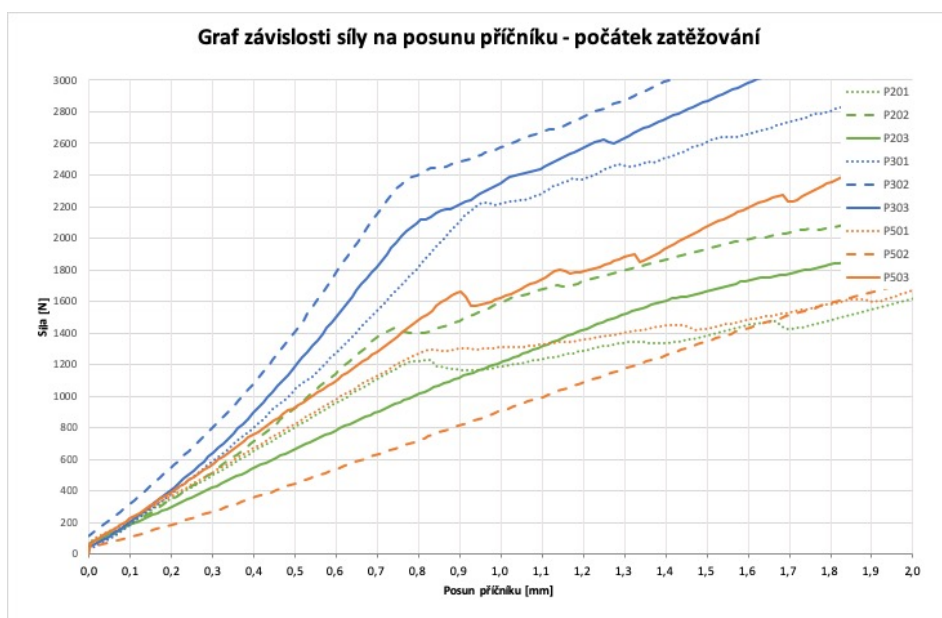
$$\sigma_P = \frac{P}{A_c} \quad (5.12)$$

$$\sigma_{Pe} = \frac{P \cdot e_P \cdot e_d}{I} \quad (5.13)$$



Modře jsou znázorněny předepnuté prvky. Oranžově jsou znázorněny nepředepnuté prvky.

**Obrázek 5.10:** Graf závislosti napětí na posunu příčnicku v počátku zatěžování pro vzorky s teplem vytvrzovanou pryskyřicí EPOREZIT EPOVILL-A.



**Obrázek 5.11:** Graf závislosti síly na posunu příčnicku v počátku zatěžování

$$\sigma_{Mf} = \frac{M_f}{W} \quad (5.14)$$

$$\Delta_\sigma = (\sigma_{res} + \sigma_t) - \sigma_{Mf} \quad (5.15)$$

$\sigma_{res}$  - tlaková rezerva od předpětí

$\sigma_P$  - napětí od předpínací síly

$\sigma_{Pe}$  - napětí od excentricity předpínací síly

$\sigma_t$  - ohybová únosnost betonového kompozity **3.3**

$\sigma_{Mf}$  - napětí od zatížení

$\Delta_\sigma$  - ztráta předpětí vyjádřena v MPa

V tabulce níže jsou strukturovaně uvedeny výsledky pro všechny varianty předpětí.

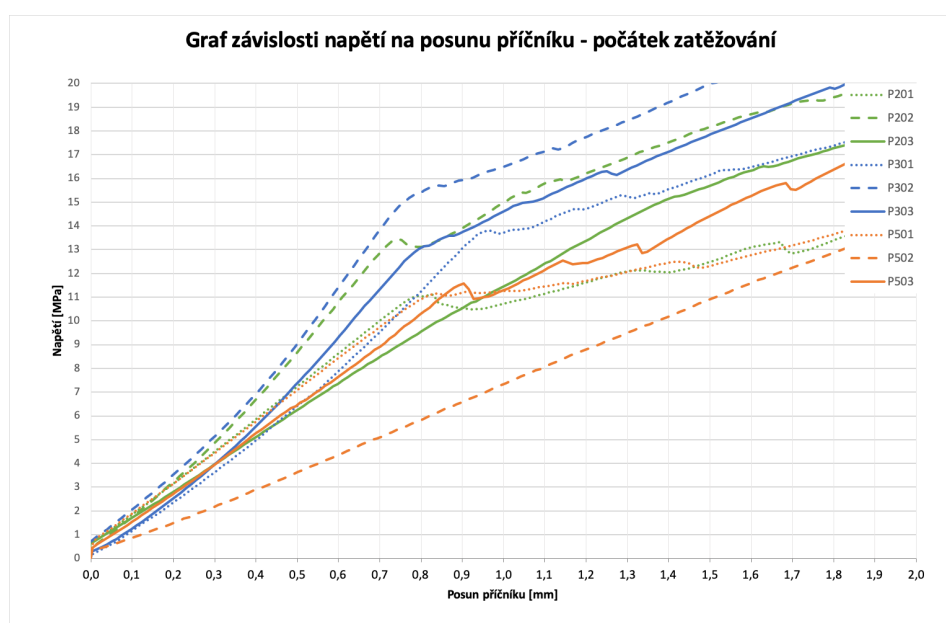
Typ pryskyřice	Č. vzorku	b [mm]	h <sub>avg</sub> [mm]	A <sub>c</sub> [mm <sup>2</sup> ]	F <sub>first</sub> [N]	L [mm]	M <sub>t</sub> [Nm]	e <sub>d</sub> [mm]	e <sub>p</sub> [mm]	W [mm <sup>3</sup> ]	I [mm <sup>4</sup> ]	P [N]	σ <sub>res</sub> [MPa]	σ <sub>t</sub> [MPa]	σ <sub>Mf</sub> [MPa]	Δ <sub>σ</sub> [MPa]
SIKA sikafloor	2.01	100,0	20,9	2090,0	1241	100,0	62,1	10,5	3,5	7280,2	76077,7	3248	3,12	7,93	8,52	2,52
	2.02	100,0	20,6	2062,0	1402	100,0	70,1	10,3	3,5	7086,4	73060,9	3248	3,18	7,93	9,89	1,22
	2.03	100,0	20,8	2084,3	1267	100,0	63,4	10,4	3,5	7240,7	75460,6	3248	3,13	7,93	8,75	2,31
LH 300	3.01	100,0	26,7	2670,0	2340	100,0	117,0	13,4	3,5	11881,5	158618,0	3067	2,05	7,93	9,85	0,13
	3.02	100,0	25,1	2510,0	2100	100,0	105,0	12,6	3,5	10500,2	131777,1	3067	2,24	7,93	10,00	0,17
	3.03	100,0	18,9	1890,0	1320	100,0	66,0	9,5	3,5	5953,5	56260,6	3067	3,43	7,93	11,09	0,27
EPOREZIT epovill-A	5.01	100,0	21,7	2166,3	1293	100,0	64,7	10,8	3,5	7821,7	84721,7	2995	2,72	7,93	8,27	2,39
	5.02	100,0	23,7	2373,7	1539	100,0	76,9	11,9	3,5	9390,5	111449,5	2995	2,38	7,93	8,19	2,11
	5.03	100,0	22,8	2275,7	1664	100,0	83,2	11,4	3,5	8631,1	98207,5	2995	2,53	7,93	9,64	0,82

**Tabulka 5.4:** Tabulka ztrát předpětí

Jak je z výsledků patrné tak u všech variant došlo ke ztrátám předpětí v čase. Příčiny budou diskutovány v další kapitole. Nejnižších ztrát bylo dosaženo u vzorků, kde byla k syčení použita pryskyřice LH300.

Graf souhrnných výsledků (graf: **5.12**) ukazuje na závislosti napětí na posunu příčnicku. Nejvyšší hodnoty napětí při vzniku první trhliny jsou patrné pro epoxidovou pryskyřici LH300. Sklon křivky a sním paralelně jdoucí modul pružnosti je zde také největší pro pryskyřici LH300. Nejhorších výsledků je dosaženo při použití epoxidové pryskyřice SIKA sikafloor 156, což koresponduje i se ztrátami předpětí v čase, jak uvádí tabulka uvedená dříve (tab: **5.4**).





**Obrázek 5.12:** Graf závislosti napětí na posunu příčnicku v počátku zatěžování pro všechny předepnuté vzorky.



## Kapitola 6

### Diskuze

Jak je vidět z výsledků uvedených v předchozí kapitole tak nejlepšími výsledky je dosaženo při použití teplem vytvrzované epoxidové pryskyřice LH300. Pryskyřice vykazovala největší sklon křivky a s tím spojený nejvyšší modul pružnosti. Vzorky vykazují nejvyšší únosnost před vznikem první trhliny stejně jako velmi hladkou křivku po vzniku trhliny. Hladkost křivky, tj. průběh zatěžování, kdy nedochází ke skokovým poklesům napětí, které symbolizují vznikající trhliny je právě zde nejlepší.

Je nutné brát v potaz celou řadu faktorů ovlivňující výsledky. Celý výrobní proces vzorků, který je popsán v dřívějších kapitolách, se skládá z řetězce kroků. Již výroba samotných sycených opískovaných rovingů je velmi náročná na technologii výroby v laboratorních podmínkách. Nedostatečné sycení stejně jako nedokonalé opískování mohou být zásadní pro další výsledky. Opískování a s tím spojená soudržnost v betonu může být jedním z důvodů odlišností výsledků pro jednotlivé epoxidové pryskyřice. Z důvodu trendu, který je pro každou variantu jednoznačný však nelze s jistotou říci, jak moc ovlivňující může technologie výroby být.

Mnohokrát byla zmíněna šířka trhlín vznikající v průběhu zatěžování po vzniku první trhliny. Šířka trhlín je znovu dána dokonalostí zakotvení rovingu v betonovém průřezu stejně jako tvrdostí pryskyřice, která homogenizuje výztuž [12]. I přestože nebylo provedeno zkoušky, které by hodnotily pryskyřice samotné, tak z důvodu téměř stejného vneseného napětí, stejné síly rovingu a maximálně možné stejné technologie výroby lze na základě vypočítaných ztrát napětí při zkoušení vzorku říci, že pryskyřice LH300 je nejužší.

Konečné destrukce bylo ve většině případů dosaženo nadměrným smykovým namáháním, což koresponduje s faktem, kdy průřez není vyztužen výztuží odolávající smykovému namáhání. Stejně tak lze konstatovat, že distribuce napětí nebyla podpořena žádnou příčnou výztuží jak je tomu běžné u běžných

průřezů předepnutých ocelovou výztuží. Veškeré tahové napětí v ohybu bylo koncentrován pouze do rovingů.

Jelikož výrobce pro vytvrzení tepelných pryskyřic uvádí pouze dobu vytvrzení a dobu, po kterou je nutné pryskyřici vytvrzovat, tak zůstává otázkou, zda delší doba vytvrzování nemůže mít pozitivní, nebo také negativní vliv na výslednou tvrdost a s tím spojenou aktivaci výztuže. Zde by bylo nutné dalšími zkouškami ověřit ideální čas vytvrzování pryskyřice tak, aby bylo dosaženo co nejlepšího výsledku.

Jak je patrné z grafu, lze s jistotou říci, že po vzniku první trhliny má předpětí pozitivní vliv na počet a šířku trhlin. Při vytvoření trhliny je síla okamžitě zachycena předepnutými rovingy (tedy dalším lokálním zapojení předepnutého rovingu). Šířka a počet trhlin je bezpochyby jedním ze základních parametrů k zajištění vysoké trvanlivosti konstrukce. Velmi zajímavé by v budoucnu bylo zhotovení zkoušky se střídavým zatěžováním a odtěžováním tak, aby bylo vidět otevírání a zpětné zavírání trhlin a případný vliv plasticity pryskyřice.

Je nutné si uvědomit, že předepnutí bylo z technologických důvodů na straně formy dosaženo pouze na hodnotu kolem 10% tahové pevnosti rovingu. Pokud s takto předepnutými prvky je možné oddálit posun první z hodnoty kolem 7MPa ohybové pevnosti v 10. dni zrání na hodnotu kolem 13 MPa a více, lze tedy konstatovat, že potenciál není dostatečně využit a za předpokladu vyššího napětí lze předpokládat dosažení vyšších hodnot ohybové únosnosti před vznikem první trhliny. V rámci diplomové práce nebyl časový prostor na návrh, ověření a odzkoušení masivnější ocelové formy, kde by bylo dosaženo vyšších předepnutí výztuže a s tím spojené vyšší únosnosti.

Pro názornost potenciálu předpínaných prvků byl však ze získaných znalostí vytvořen odhadovaný graf ohybových únosností pro prvky předepnuté na 10%, to jsou prvky zkoušené v rámci této práce, poté prvky předepnuté na 30% tahové pevnosti rovingu a jako poslední jsou to prvky předepnuté až na 50% tahové pevnosti uhlíkového syceného rovingu. Bez dalšího zkoušení nelze přesně predikovat, jaké by byly ztráty předpětí u takovýchto prvků a jsou tedy pro jednotlivé hranice uvedeny ztráty hodnotově stejné jako je tomu pro vzorky předepnuté na 10%, kde byly ztráty číselně dopočteny [5.4](#). Hodnoty ztrát předpětí jsou nejnižší pro pryskyřici LH300. To koresponduje s nejvyššími dosaženými hodnotami na vzniku první trhliny, které jsou také patrné pro tuto pryskyřici.

Tabulka níže (tab: [6.1](#)) ukazuje predikci únosnosti za předpokladu předepnutí na vyšší hladiny předpětí. Pro zjednodušení byly průřezy zvoleny s dokonalými rozměry 100x20 mm. Hodnota ohybové únosnosti při vzniku první trhliny, zde ukazuje předpokládaný nárůst, který je přímo závislý na míře předpětí.

Průřezové charakteristiky jsou dopočítány zjednodušeným způsobem a to jako běžný obdélník. Vliv výztuže v rámci průřezu není tedy v rámci průřezových charakteristik zahrnut. Plocha výztuže je zde v řádu nižších desítek  $mm^2$ , vůči ploše průřezu, která je  $2000 mm^2$ .

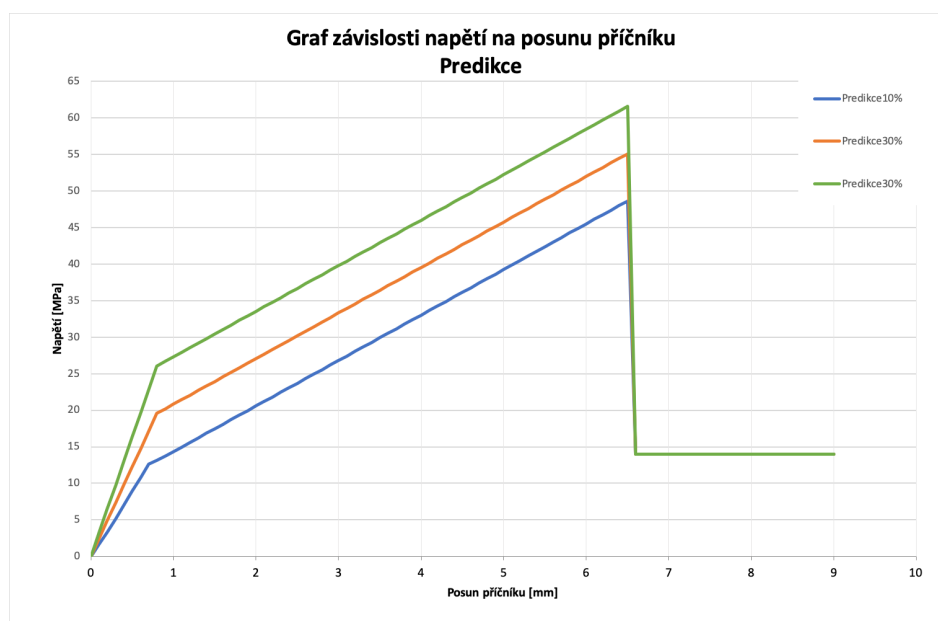
	$F_m$ [N]	M [%]	P [N]	b [mm]	$h_{avg}$ [mm]	$A_c$ [ $mm^2$ ]	W [ $mm^3$ ]	I [ $mm^4$ ]	$e_d$ [mm]	$e_p$ [mm]	$\sigma_{rel}$ [MPa]	$\sigma_t$ [MPa]	$\Delta_p$ [MPa]	$\sigma_{ult}$ [MPa]
LH 300	29592,6	10%	2959,26	100,0	20,0	2000	6666,7	66666,7	11,35	3,50	3,24	9,89	0,03	13,10
	29592,6	30%	8877,78	100,0	20,0	2000	6666,7	66666,7	11,35	3,50	9,73	9,89	0,03	19,59
	29592,6	50%	14796,3	100,0	20,0	2000	6666,7	66666,7	11,35	3,50	16,21	9,89	0,03	26,07

Modře jsou znázorněny prvky předepnuté na 10% tahové pevnosti rovingu. Oranžově jsou znázorněny prvky předepnuté na 30% tahové pevnosti rovingu. Zeleně jsou znázorněny prvky předepnuté na 50% tahové pevnosti rovingu.

**Tabulka 6.1:** Tabulka očekávané únosnosti

Z grafu očekávané únosnosti (graf: 6.1), který je vyjádřen závislostí ohybového napětí na posunu příčnicku, je patrný posun první trhliny pro vyšší hodnoty ohybového namáhání. Napětí při vzniku první trhliny je uvedeno pro jednu hodnotu posunu. Předpokládám tedy vyšší tuhost průřezu. Stejně tak je patrné, že po vzniku první trhliny je směrnice tečny stejná sklonu křivky a předpokládám tedy celkově vyšší hodnotu únosnosti u předepnutých prvků 2.9.

### Zásad



**Obrázek 6.1:** Graf očekávané únosnosti

Hodnoty predikce ohybového napětí byly dopočítány dle vztahu uvedeného

níže a to včetně zahrnutí vlivu ztrát předpětí. Je nutné brát v potaz fakt, že veškeré zkoušky byly provedeny v desátý den od betonáže resp. sedmý den od vnesení předpětí. Prodleva mezi vnesením předpětí a zkoušením může mít pozitivní vliv na ztráty předpětí. Lze předpokládat, že v čase bude předpětí klesat. V běžných železobetonových konstrukcích je ztrát předpětí celá řada (kap: 2.3). V rámci této práce nebyly ztráty detailně zkoumány a rozhodně je to jeden z parametrů, kterému je nutné lépe porozumět tak, aby mohl být posudek konstrukcí vyztužených textilním předepnutým betonem komplexní.

$$\sigma_{Mf} = (\sigma_{res} + \sigma_t) - \sigma \quad (6.1)$$

$$\sigma_{res} = \frac{P}{A_c} + \frac{e_d \cdot e_p \cdot P}{I} \quad (6.2)$$

$$\sigma_{Mf} = \frac{M_f}{W} \quad (6.3)$$

$$\Delta_\sigma = (\sigma_{res} + \sigma_t) - \sigma_{Mf} \quad (6.4)$$

$\sigma_{res}$  - tlaková rezerva od předpětí

$\sigma_P$  - napětí od předpínací síly

$\sigma_{Pe}$  - napětí od excentricity předpínací síly

$\sigma_t$  - ohybová únosnost betonového kompozitu 3.3

$\sigma_{Mf}$  - napětí od zatížení

$\Delta_\sigma$  - ztráta předpětí vyjádřena v MPa

V souvislosti se zkoušením již desátý den lze také konstatovat, že nebylo dosaženo maximální tlakové pevnosti kompozitu stejně tak jako ohybové pevnosti. Tlaková pevnost je zde rozhodně značným benefitem, který zajišťuje eliminaci drčení betonu, v části, kde předpětí vyvozuje tlakové namáhání. Ohybová únosnost nepředepnutého prvku je nutná pro lepší pochopení ohybové únosnosti předepnutého prvku, kdy lze předpokládat vyšší ohybové únosnosti u prvků, u kterých referenční vzorky budou vykazovat vyšší ohybovou únosnost.

## Kapitola 7

### Závěr

Cílem této Diplomové práce bylo ověření potenciálu předpínaných textilních betonů v rámci kompozitu z vysohodnotného betonu.

Prvotním cílem bylo sestrojení předpínací dráhy a to s ohledem na technologické podmínky, kdy byla předpínací dráha sestrojena v běžných podmínkách zámečnické dílny. Dráha byla sestrojena z běžných profilů a za přiměřenou cenu.

Dráha poskytovala možnost předepnutí nejsilnějších prvků (tj.3700 TEX) na hodnotu kolem 10% jejich tahové únosnosti. Nejslabším místem dráhy se ukázala její lehkost, kdy při natahování rovingů docházelo ke kroucení dráhy. Tuto nedokonalost lze snadno omezit použitím masivnějších prvků a celkovému ukotvení dráhy např k zemi, kdy by byly všechny části dráhy drženy pevně k zemi.

Druhým cílem bylo samotné ověření potenciálu předpínání. Zvolená varianta v podobě napnutí různých typů průřezů se nejevil jako proveditelný a to z důvodu nerovnoměrného rozdělení napětí ve všech čtyřech předpínaných rovincích. Současně s tím bylo patrné, že nejslabším článkem komplexu je pryskyřice určená k sycení rovingů. Z toho důvodu byly vybrány další typy pryskyřice s přihlédnutím k často se opakujícím otázkám ohledně odolnosti textilních betonů vůči požáru.

Výběr pryskyřic se ukázal jako zdařilý a to především díky malým ztrátám předpětí (tab: 2.3). Především pryskyřice LH 300 vykazovala minimální ztráty předpětí.

Celkově lze konstatovat že předpětí je charakteristické posunem vzniku první trhliny (graf: 5.8) a eliminací vzniku dalších masivních trhlin po vzniku první trhliny.

Zásadní vliv předpětí je tedy na trvanlivost konstrukce stejně tak jako na návrh subtilních prvků a maximalizace využití tlakové pevnosti betonu.

Zásadních otázek, které by umožnily častější využití tohoto typu konstrukce je stále velká řada a za zmínku stojí dynamické namáhání, odolnost na požár a zkoušky, které zohledňují trvanlivost konstrukce.

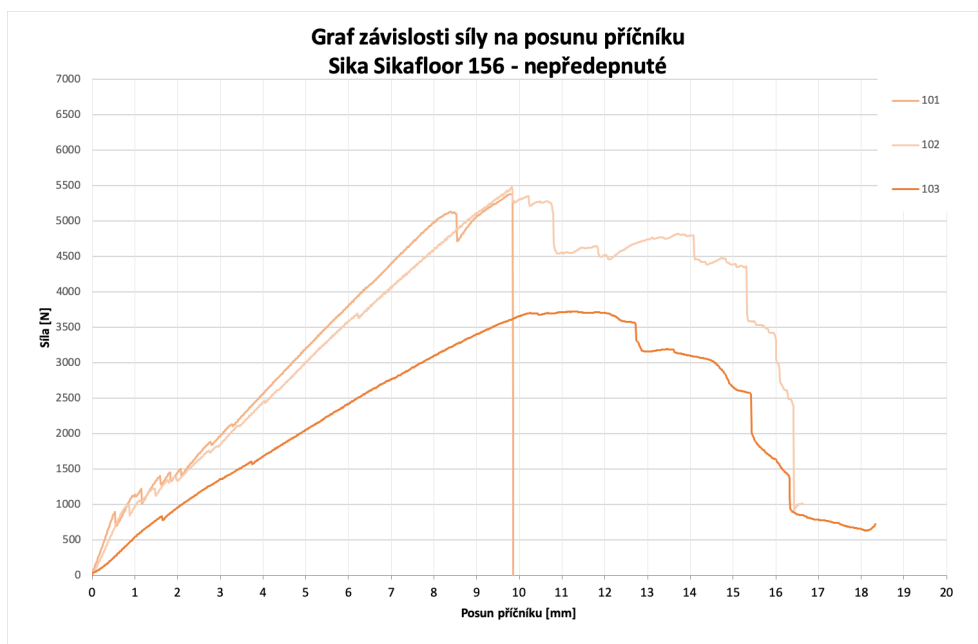


# Příloha A

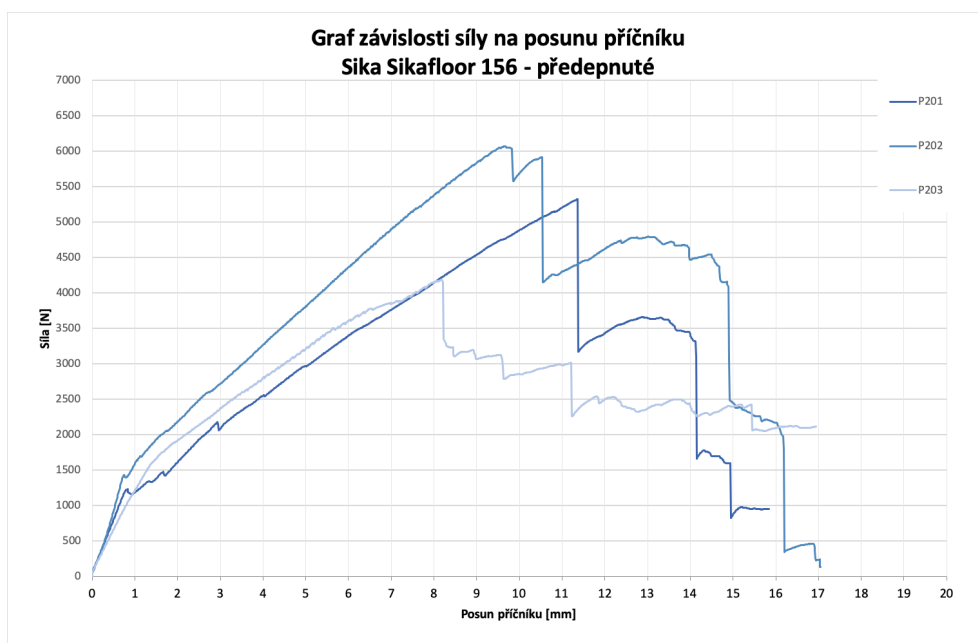
## Přílohy

	b [mm]	h <sub>1</sub> [mm]	h <sub>2</sub> [mm]	h <sub>3</sub> [mm]	h <sub>avg</sub> [mm]
Sika Floor 156 - nepředepnuté					
1.01	100,00	19,90	20,10	19,89	19,96
1.02	100,00	19,17	19,10	19,13	19,13
1.03	100,00	17,30	17,01	17,83	17,38
Sika Floor 156 - předepnuté					
2.01	100,00	20,91	21,56	20,33	20,93
2.02	100,00	21,10	20,08	20,60	20,59
2.03	100,00	20,80	21,12	20,61	20,84
LH 300 - předepnuté					
3.01	100,00	26,88	26,71	26,35	26,65
3.02	100,00	24,69	24,90	25,56	25,05
3.03	100,00	18,96	18,95	18,69	18,87
LH 300 - nepředepnuté					
4.01	100,00	22,30	20,40	21,30	21,33
4.02	100,00	19,85	19,30	19,61	19,59
4.03	100,00	20,97	19,53	18,84	19,78
Eporezit Epovill A - předepnuté					
5.01	100,00	21,46	22,38	21,15	21,66
5.02	100,00	23,18	24,32	23,71	23,74
5.03	100,00	21,98	22,85	23,42	22,75
Eporezit Epovill A - nepředepnuté					
6.01	100,00	19,68	20,15	21,67	20,50
6.02	100,00	20,42	19,40	21,02	20,28
6.03	100,00	19,05	18,85	19,65	19,18

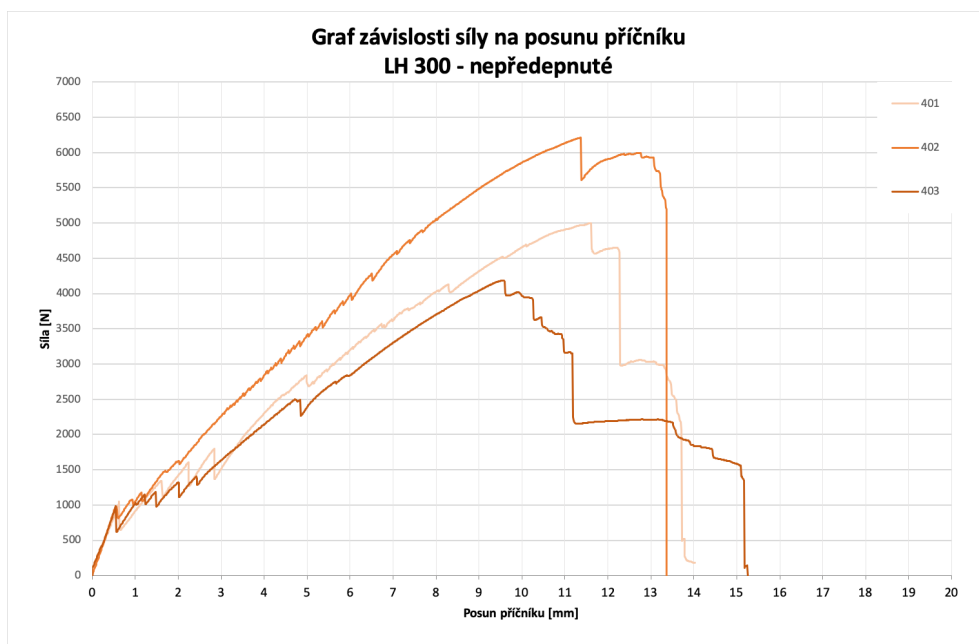
Tabulka A.1: Tabulka výšky všech zkoušených vzorků



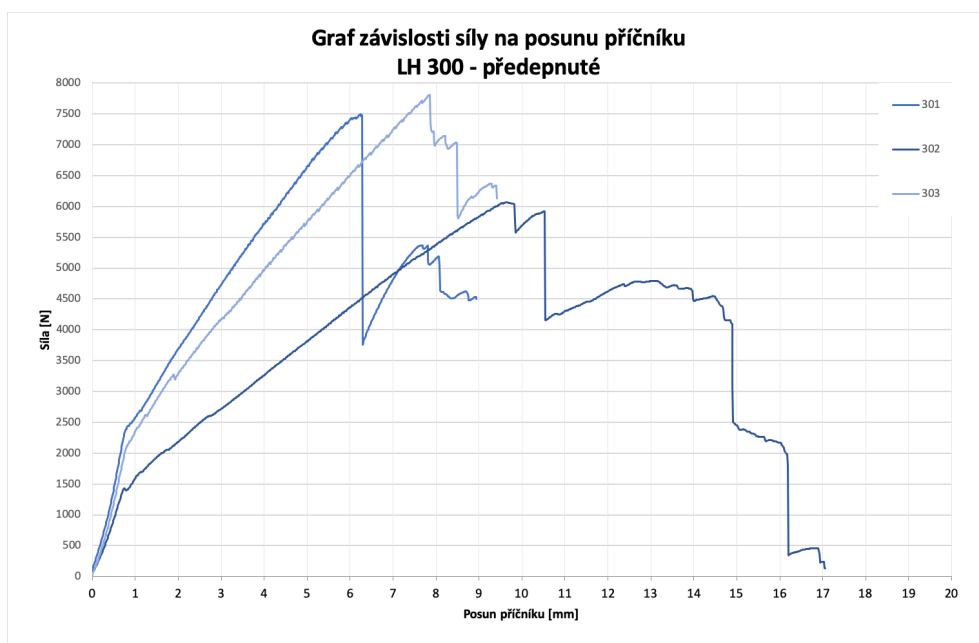
**Obrázek A.1:** Závislost síly na posunu příčnicku - Sika Floor 156



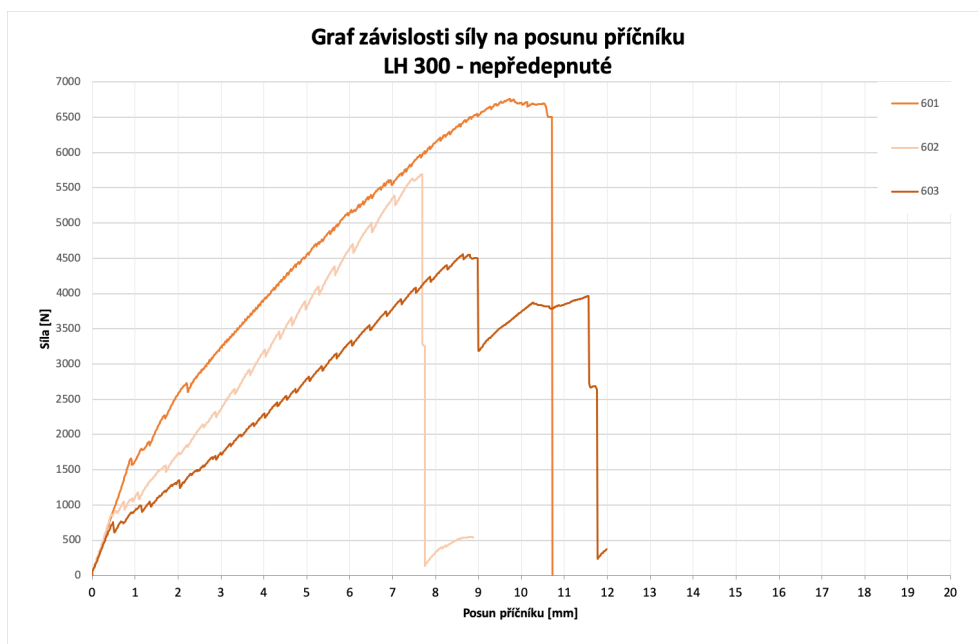
**Obrázek A.2:** Závislost síly na posunu příčnicku - Sika Floor 156



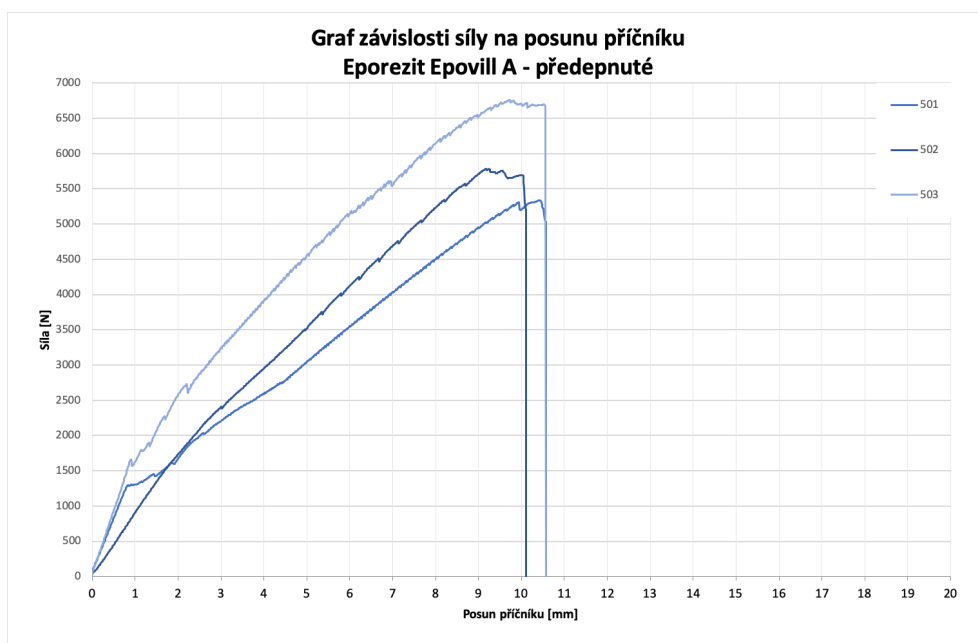
Obrázek A.3: Závislost síly na posunu příčnicku - LH 300



Obrázek A.4: Závislost síly na posunu příčnicku - LH 300



Obrázek A.5: Závislost síly na posunu příčnicku - Eporezit Epovill - A



Obrázek A.6: Závislost síly na posunu příčnicku - Eporezit Epovill - A

## Příloha B

### Literatura

- [1] Marek FOGLAR, Michaela Frantová a Pavel Jiříček. *Betonové konstrukce 3: navrhování betonových konstrukcí na MSP, úvod do předpjatého betonu*, 1.
- [2] Lenka Laiblová, Tomáš Vlach, and Michal Ženíšek. Využití technických textilií jako alternativní výztuže do subtilních fasádních panel z vysokohodnotného betonu.
- [3] Filip Vogel. Production and use of the textile reinforced concrete. In *Advanced Materials Research*, volume 982, pages 59–62. Trans Tech Publ, 2014.
- [4] Magdaléna Novotná, Michaela Kostecká, Julie Hodková, and Miroslav Vokáč. Use of textile reinforced concrete—especially for facade panels. In *Advanced Materials Research*, volume 923, pages 142–145. Trans Tech Publ, 2014.
- [5] M Krüger, S Xu, HW Reinhardt, and J Ozbolt. Experimental and numerical studies on bond properties between high performance fine grain concrete and carbon textile using pull out tests. *Beiträge aus der Befestigungstechnik und dem Stahlbetonbau, Festschrift Professor R. Eligehausen, Universität Stuttgart*, pages 151–164, 2002.
- [6] Anna Volkova, Alexey Paykov, Sergey Semenov, Oleg Stolyarov, and Boris Melnikov. Flexural behavior of textile-reinforced concrete. In *MATEC Web of Conferences*, volume 53, page 01016. EDP Sciences, 2016.
- [7] Amr A Abdelrahman and Sami H Rizkalla. Serviceability of concrete beams prestressed by carbon. *ACI Struct J*, 94(4):447–454, 1997.
- [8] Wolfgang Brameshuber. *Report 36: textile reinforced concrete-state-of-the-art report of RILEM TC 201-TRC*, volume 36. RILEM publications, 2006.

- [9] Yunxing Du, Mengmeng Zhang, Fen Zhou, and Deju Zhu. Experimental study on basalt textile reinforced concrete under uniaxial tensile loading. *Construction and Building Materials*, 138:88–100, 2017.
- [10] Mohamed Zawam, Khaled Soudki, and Jeffrey S West. Factors affecting the time-dependent behaviour of gfrp prestressed concrete beams. *Journal of Building Engineering*, 24:100715, 2019.
- [11] Yunxing Du, Xinying Zhang, Fen Zhou, Deju Zhu, Mengmeng Zhang, and Wei Pan. Flexural behavior of basalt textile-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 183:7–21, 2018.
- [12] SPANNTER TEXTILER BEWEHRUNG IN BETON, COMPORTEMENT ADHESIF D'ARMATURES TEXTILES PASSIVES, and ET PRECONTRAINTEES. Bond behaviour of textile reinforcement in reinforced and prestressed concrete. *Otto-Graf-Journal*, 12:33, 2001.
- [13] Deju Zhu, Sai Liu, Yiming Yao, Gaosheng Li, Yunxing Du, and Caijun Shi. Effects of short fiber and pre-tension on the tensile behavior of basalt textile reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites*, 96:33–45, 2019.
- [14] J Forn, P Konvalinka, R Sovják, JL Vitek, et al. Long-term behaviour of concrete structures reinforced with pre-stressed gfrp tendons. *WIT Transactions on Modelling and Simulation*, 48:535–545, 2009.
- [15] Mantas Atutis, Juozas Valivonis, and Edgaras Atutis. Experimental study of concrete beams prestressed with basalt fiber reinforced polymers. part i: Flexural behavior and serviceability. *Composite Structures*, 183:114–123, 2018.
- [16] Badar Munir Zaidi, Kevin Magniez, and Menghe Miao. Prestressed natural fibre spun yarn reinforced polymer-matrix composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 75:68–76, 2015.
- [17] Debora Acosta Alvarez, Anadelys Alonso Aenlle, and Antonio Tenza-Abril. Laboratory evaluation of hot asphalt concrete properties with cuban recycled concrete aggregates. *Sustainability*, 10(8):2590, 2018.
- [18] Tomáš Vlach. Soudržnost uhlíkové a čedičové kompozitní výtzuže s uhpc. 2014.
- [19] Laiblová Lenka. *Vyztužování silikátových kompozit pomocí nekorozivních výtzuží*. PhD thesis, České vysoké učení technické v Praze. Vypočetní a informační centrum., 2019.
- [20] Jiří Žalský. Numerická analýza rámového rohu vyztuženého textilní uhlíkovou výtzuží. B.S. thesis, České vysoké učení technické v Praze. Vypočetní a informační centrum., 2018.

- [21] ACI ACI. 440.3 r-04. *Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structure*, ACI, Farmington Hills, Michigan, 2004.
- [22] Rostislav Ryppl, Rostislav Chudoba, Ulrich Mörschel, Scott E Stapleton, Thomas Gries, and Guido Sommer. A novel tensile test device for effective testing of high-modulus multi-filament yarns. *Journal of Industrial Textiles*, 44(6):934–947, 2015.
- [23] Alexander Scholzen, Rostislav Chudoba, and Josef Hegger. Thin-walled shell structures made of textile-reinforced concrete: Part i: Structural design and construction. *Structural Concrete*, 16(1):106–114, 2015.
- [24] Will Hawkins, John Orr, Paul Shepherd, and Tim Ibell. Design, construction and testing of a low carbon thin-shell concrete flooring system. In *Structures*, volume 18, pages 60–71. Elsevier, 2019.
- [25] Pierre-Claude Aïtcin. *High performance concrete*. CRC press, 2011.
- [26] Tomáš Janáček. *Výpočet únosnosti předpjatého dutinového panelu elematic*. 2011.
- [27] BS EN. 12390-3. testing hardened concrete—part 3: Compressive strength of test specimens. *British Standards Institution*, 2002.
- [28] BS EN. 12390-5. testing hardened concrete—part 5: flexural strength of test specimens. *British Standards Institution-BSI and CEN European Committee for Standardization*, 2009.
- [29] Mario COLLEPARDI. *Moderní beton*. 1. vyd. praha: Pro českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (čkait) vydalo informační centrum čkait, 2009, 342 s. betonové stavitelství. Technical report, ISBN 978-80-87093-75-7.
- [30] Pierre-Claude Aïtcin. *High performance concrete*. CRC press, 2011.
- [31] ONDŘEJ Veleba. *Studium vlivu složení na mechanické vlastnosti vysokohodnotného betonu*. *Diplomová práce, FCH VUT Brno*, 2008.
- [32] EN ČSN. 206 beton-specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. *Praha: Český normalizační institut*, 2014.
- [33] TS EN. 196-1. methods of testing cement—part 1: Determination of strength. *European Committee for standardization*, 26, 2005.
- [34] EN ČSN. 1015-3. zkušební metody malt pro zdivo—část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střešacího stolku). *Praha: Český normalizační institut*, 2000.
- [35] Rostislav Chudoba, Miroslav Vořechovský, Vera Eckers, and Thomas Gries. Effect of twist, fineness, loading rate and length on tensile behavior of multifilament yarns (a multivariate study). *Textile research journal*, 77(11):880–891, 2007.

- [36] EN ISO. 6892-1. metallic materials-tensile testing-part 1: Method of test at room temperature. *International Organization for Standardization*, 2009.
- [37] Tomáš Vlach, Lenka Laiblová, Alexandru Chira, Magdaléna Novotná, Ctislav Fiala, Michal Ženíšek, and Petr Hájek. Comparison of different methods for determination of modulus of elasticity of composite reinforcement produced from roving. In *Advanced Materials Research*, volume 1054, pages 104–109. Trans Tech Publ, 2014.
- [38] W Brameshuber, T Brockmann, and B Banholzer. Analytical evaluation of the softening behaviour of fine grained concrete. In *Vail, Colorado: Ia-FramCos- In: Proceedings of the 5th International Conference on “Fracture Mechanics of Concrete Structures”(FRAMCOS-5), Vail Colorado, USA*, pages 12–16, 2004.