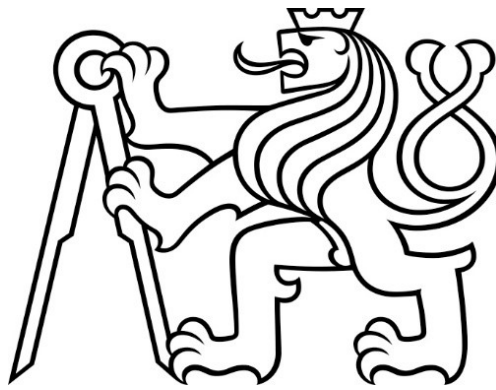


**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE  
FAKULTA  
STAVEBNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ  
PRÁCE**

**2018**

**Jiří Žalský**



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební  
Thákurova 7, 166 29 Praha 6

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: <u>Jiří</u>	Jméno: <u>Žalský</u>	Osobní číslo: <u>439018</u>
Zadávací katedra: <u>K124</u>		
Studijní program: <u>SI-Stavební inženýrství</u>		
Studijní obor: <u>C-Konstrukce pozemních staveb</u>		

### II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: <u>Numerická analýza rámového rohu vyztuženého textilní uhlíkovou výztuží</u>	
Název bakalářské práce anglicky: <u>Numerical analysis of rigid frame joint with textile carbon reinforcement</u>	
Pokyny pro vypracování: Zpracování rešerše na problematiku vyztužování rámového rohu textilních betonů. Získání základních materiálových parametrů betonu a uhlíkové textilní výztuže pomocí experimentů. Kalibrace a validace získaných materiálových parametrů v programu Atena Engineering. Návrh možného vyztužení rámového rohu textilní výztuží. Jednoduchý numerický model navrženého vyztužení.	
Seznam doporučené literatury: AÏTCIN, Pierre-Claude. High performance concrete. CRC press, 2011. BRAMESHUBER, Wolfgang (ed.). Report 36: textile reinforced concrete-state-of-the-art report of RILEM TC 201-TRC. RILEM publications, 2006.	
Jméno vedoucího bakalářské práce: <u>prof. Ing. Petr Hájek, CSc.</u>	
Datum zadání bakalářské práce: <u>19. 2. 2018</u>	Termín odevzdání bakalářské práce: <u>27. 5. 2018</u> <i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>
Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

<i>Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutně uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.</i>	
Datum převzetí zadání	Podpis studenta(ky)

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem „Numerická analýza rámového rohu vyztuženého textilní uhlíkovou výztuží“ vypracoval samostatně, pouze pod odborným dohledem vedoucího práce prof. Ing. Petra Hájka a Ing. Tomáše Vlacha, a že veškeré podklady, ze kterých jsem čerpal, jsou uvedeny v seznamu literatury.

V.....

Dne .....

.....

Jiří Žalský

## **Poděkování**

V této části bych rád vyjádřil svůj dík vedoucímu práce Prof. Ing. Petrovi Hájkovi, CSc., FEng za jeho velmi cenné připomínky. Též děkuji Ing. Tomáši Vlachovi, za odborné vedení v laboratoři a předané zkušenosti, bez kterých bych v laboratoři nemohl pracovat. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat všem z výzkumného centra UCEEB, kteří se zabývají výzkumem TRC a UHPC a poskytli mi data z předchozích experimentů. A na závěr poděkuji panu Ing. Pavlovi Kokešovi za asistenci při zatěžování a svojí rodině za podporu při studiu.

**Numerická analýza rámového rohu vyztuženého textilní  
uhlíkovou výztuží**

**Numerical analysis of rigid frame joint with textile carbon  
reinforcement**

## **Abstrakt**

Cílem této práce je přispět k rozvoji betonů vyztuženými textilními výztužemi. Práce by měla objasnit chování kompozitu, ověřit chování prostého vysokohodnotného betonu a zkoumat chování různých typů vyztužení rámového rohu uhlíkovou výztuží. Hlavním cílem je získání materiálových parametrů betonu a uhlíkové textilní výztuže, následná kalibrace a validace výsledků v softwaru Atena Engineering a porovnání vlivu ukotvení uhlíkové výztuže rámového rohu na rozvoj trhlin v numerickém modelu. Proto bude třeba získat materiálové charakteristiky z laboratorních testů a porovnat skutečné chování alespoň jednoho experimentu s chováním numerického modelu.

## **Klíčová slova**

Textil beton, TRC, UHPC, textilní výztuž, rámový roh, uhlíková výztuž, kompozit, tenkostěnné konstrukce,

## **Abstract**

The aim of bachelor thesis is to contribute to the expansion of textile reinforced concrete. The thesis should clarify behaviour of the composite, clarify behaviour of ultra high performance concrete and investigate different type of reinforcing of rigid frame by carbon textile reinforcement. Main object is comparison of effects of reinforcement bond to expansion of cracks in numerical model of rigid frame. Therefore, it will be necessary to obtain material parameters from laboratory tests and compare real behaviour of composite with numerical model.

## **Klíčová slova**

Textile-reinforced concrete, TRC, UHPC, textile reinforcement, rigid frame, carbon reinforcement, composite, thin slabs,

# Obsah

1	Úvod.....	- 8 -
1.1	Motivace.....	- 9 -
1.2	Cíl práce .....	- 9 -
1.3	Seznam použitých znaků, symbolů .....	- 10 -
2	Rešerše .....	- 11 -
2.1	Úvod o materiálu.....	- 11 -
2.2	Historie TRC .....	- 11 -
2.3	Skladba TRC .....	- 12 -
2.3.1	Beton.....	- 12 -
2.3.2	Rovingy – svazky nekonečných vláken.....	- 13 -
2.3.3	Epoxidová pryskyřice .....	- 14 -
2.3.4	Spolupůsobení.....	- 14 -
2.4	Aplikace TRC.....	- 15 -
2.5	Problematika rámového rohu .....	- 17 -
2.6	Modelování prvků z TRC.....	- 17 -
2.7	Zkoušky ztvrdlého betonu.....	- 19 -
2.7.1	Zkouška soudržnosti výztuže s betonem .....	- 19 -
2.7.2	Tahová zkouška vláken.....	- 20 -
2.7.3	Čtyřbodový ohyb vyztuženého prvku.....	- 21 -
2.7.4	Třibodový ohyb.....	- 23 -
2.7.5	Tlaková zkouška betonu .....	- 23 -
3	Experimentální část.....	- 24 -
3.1	Úvod.....	- 24 -
3.2	Použité materiály.....	- 24 -
3.3	Příprava vzorků .....	- 25 -
3.3.1	Textilní výztuže .....	- 25 -
3.3.2	Vzorky pro tahovou zkoušku.....	- 26 -
3.3.3	Destičky pro čtyř-bodový ohyb .....	- 28 -

3.3.4	Vzorky pro zkoušku soudržnosti .....	- 29 -
3.3.5	Doprovodná tělesa .....	- 30 -
3.4	Ošetřování a ukládání.....	- 31 -
4	Vyhodnocení.....	- 32 -
4.1	Pevnost betonu v tlaku .....	- 32 -
4.2	Pevnost betonu v tahu za ohybu.....	- 33 -
4.3	Pevnost uhlíkových vláken (čtyřbodový ohyb).....	- 34 -
4.4	Pevnost v tahu uhlíkového rovingu (jednoosá zkouška).....	- 37 -
4.5	Soudržnost rovingu s betonem .....	- 39 -
5	Numerická analýza .....	- 43 -
5.1	Kalibrace materiálu .....	- 43 -
5.2	Příklady vyztužení rámového rohu .....	- 46 -
5.3	Model rámového rohu .....	- 47 -
5.4	Analýza trhlin.....	- 48 -
6	Závěr .....	- 50 -
7	Reference .....	- 51 -
8	Přílohy.....	- 7 -
	Příloha č.1 -Rozvoj trhlin na kalibračním modelu.....	- 7 -
	Příloha č.2 – Porovnání experimentu se s kalibračním modelem.....	- 9 -
	Příloha č.3– Porovnání rozvoje trhlin opískovaných vzorků.....	- 9 -
	Příloha č.4 – Charakteristika porušení a kolapsu rámu .....	- 10 -
	Příloha č. 5 - Porovnání únosnosti různě vyztužených rámu.....	- 12 -



# 1 Úvod

Historie betonu sahá již do období 1000 let př.n.l., kdy fěničtí stavitelé postavili vodní nádrže používané dodnes. Další fází betonu byl Řeky používaný „emplekton“, který byl používán na výstavbu masivních zdí, vyplňovalo se ztracené bednění vyzděné z kamenných bloků betonovou směsí připomínající spíše maltu a následně byl v roce 30 př. n. l. postaven Římský pantheon, který patří k nejvýznamnějším stavbám antického období díky svojí kopuli o průměru 43,2 m na kterou byl použit litý pucolánový beton bez výztužných sítí [1], [2].

Vývoj betonu procházel celá tisíciletí, vyvíjely se nové směsi prostého betonu, následně se prostý beton začal vyztužovat výztužnými tkaninami a poté pouze železnými pruty, a tak vznikl železobeton. Ten se stal jedním z nejpoužívanějších materiálů dnešní moderní doby díky dokonalému spolupůsobení ocelové výztuže a betonu. Beton s relativně vysokou pevností v tlaku, ale nízkou pevností v tahu je doplněn ocelovými pruty s vysokou pevností v tahu, a tak vzniká velice efektivní kompozit. Tento materiál používaný převážně ve stavebnictví je charakteristický svojí relativně vysokou pevností v tlaku (10-90 MPa), nízkou objemovou hmotností, nehořlavostí atd. avšak velice subtilní ocel je mu velkým konkurentem. Architekti si však v posledních dvou dekadách oblíbili materiál zvaný pohledový beton. Ten může tvořit nosnou konstrukci a zároveň konstrukci designovou. Veřejnost si pohledový beton oblíbila natolik, že se z něho začaly vyrábět lavičky, bytové doplňky a nábytek. Tyto konstrukce by byly z obyčejného železobetonu příliš masivní a těžké, proto se začal vyvíjet nový materiál, který je pevnější, subtilnější a vhodnější pro designové doplňky. [3]

Vyztužení betonu pomocí textilní sítě vytváří vhodný materiál pro výše zmíněné použití. Protože textilní nekovová výztuž nepodléhá korozi jako ocelová výztuž, kterou známe z běžně používaného železobetonu, není nutná silná krycí vrstva a je tak možné vytvořit velmi tenkou konstrukci (až 10 mm). Pro dosažení únosné a subtilní konstrukce je nutno použít vysokohodnotný beton, který je tvořen kamenivem jemné zrnitosti a je samozhutnitelný. Pomocí toho lze současně zaručit vyšší kvalitu povrchu a také lze vytvořit ostré hrany, což je pro využití v architektuře velice důležité [3]. Přes to, že chování textilních betonů při zatížení není plně prozkoumáno, má již v současné době spoustu aplikací. Používá se například na obložení budov fasádními deskami, desky

stolů, protihlukové stěny, nebo pohledové desky sendvičových panelů. Většina aplikací však byla dosud pouze na rovných deskových panelech.

Předmětem této práce je numerická analýza rámového rohu na základě získaných parametrů ze zkoušek v laboratoři a přispění k rozvoji textilního betonu pro více aplikací.

## **1.1 Motivace**

Pohledový beton se stal v dnešní době velice populární a začíná se využívat nejenom jako nosná konstrukce budovy. V architektuře se využívá také jako materiál na designové doplňky a je velice žádaný. Motivací této práce je přispět rozvoji využití betonových konstrukcí vyztužených textiliemi v praxi. V dnešní době se většinou textilní beton používá pouze na deskové prvky jako jsou desky stolů, obkladové materiály atd., výjimečně se však používá pro složitější konstrukce. K tomu je nutné znát chování rámového rohu a proto se tím budu zabývat ve svojí práci. Rámový roh by se později mohl využít při návrhu laviček, nábytku, nebo třeba schodiště působící jako prizmatická lomenice.

## **1.2 Cíl práce**

Tato práce si klade za cíl posouzení rozvoje trhlin v rámovém rohu tenkostěnné konstrukce tvořené betonem vyztuženým uhlíkovou výztuží a zjištění celkového spolupůsobení uhlíkové výztuže s vysokohodnotným betonem. Ověření bude provedeno pomocí výpočetního softwaru ATENA, do kterého budou vloženy získané parametry z laboratorních zkoušek. V laboratoři proběhnou testy základních mechanických vlastností jako je tlaková zkouška betonu, únosnost v tahu za ohybu, tahová zkouška výztuže a vytržení výztuže z betonu. Z těchto zkoušek budou získány nezbytné parametry pro numerickou analýzu rámového rohu.

### 1.3 Seznam použitých znaků, symbolů

TRC	Textile Reinforced Concrete (zkratka pro betony vyztužené textiliemi)
RC	Reinforced Concrete
UHPC	Ultra High Performance Concrete (ultra vysokohodnotný beton)
FRP	Fiber Reinforced Polymer
S-H	Označení vzorků s hladkou povrchovou úpravou
S-P	Označení vzorků s opískovanou povrchovou úpravou
$A_r$	Plocha uhlíkových vláken v rovingu [ $\text{mm}^2$ ]
$T_r$	Lineární objemová hmotnost [tex]
$\rho_r$	Hustota uhlíku [ $\text{g/cm}^3$ ]
$\tau_c$	Smykové napětí v kontaktu rovingu s betonem [MPa]
$F_m$	Síla působící na výztuž [N]
$a_m$	Délka zakotvení výztuže [mm]
$o_m$	Obvod zakotvené výztuže [mm]
$f_t$	Pevnost v tahu [MPa]
$A$	Plocha průřezu [ $\text{mm}^2$ ]
$\varepsilon$	Poměrné přetvoření [-]
$E$	Modul pružnosti materiálu [MPa, GPa]
$f_{tc}$	Pevnost betonu v tahu [MPa]
$f_{tr}$	Pevnost rovingu v tahu [MPa]
$d$	Vzdálenost os rovingů od horního povrchu vzorku [mm]
$f_c$	Pevnost v tlaku [MPa]
$m$	Hmotnost vzorku [kg]
$V$	Objem [ $\text{m}^3$ ]
$\rho$	Objemová hmotnost [ $\text{kg/m}^3$ ]
$f_{cc}$	Pevnost betonu v tlaku [MPa]
$F_{cf,max}$	Maximální síla působící na vzorek [N]
$m_c$	Celková hmotnost rovingu s pryskyřicí [g]
$m_f$	Hmotnost uhlíkových vláken [g]
$m_e$	Hmotnost pryskyřice zastoupené v rovingu [g]
$\sigma_r$	Napětí vztažené k ploše uhlíkových vláken [MPa]
$\sigma_c$	Napětí vztažené k ploše celého rovingu s pryskyřicí [MPa]
$R$	Změna napětí v potenciometru [V]
$l_0$	Původní rozteč kleští potenciometru [mm]
$\Delta l$	Změna rozteče kleští potenciometru [mm]
$E_r$	Modul pružnosti vztažený k ploše uhlíkových vláken v rovingu [MPa]
$E_c$	Modul pružnosti vztažený k ploše rovingu s pryskyřicí [MPa]
$h_{pl.}$	Spolupůsobící délka rovingu s betonem [mm]
$A_{pl.}$	Spolupůsobící plocha rovingu s betonem [ $\text{mm}^2$ ]
$G_f$	Lomová energie betonu [N/m]
$W_d$	Kritické přetvoření betonu [mm]

## 2 Rešerše

### 2.1 Úvod o materiálu

Textilní beton (textile reinforced concrete, dále jen TRC) je nový druh kompozitního materiálu využívající spojení nekovové výztužné sítě a betonu. Kovová výztuž je nahrazena materiály nepodléhající korozi jako např.: uhlíková vlákna, minerální vlákna, skelná vlákna, nebo jiné syntetické sloučeniny. Výztuž je do betonu ukládána v podobě pevné spletené sítě vytvořené z jednotlivých pramenců (rovingů), která se účelně umísťuje na exponovaná místa, a tak dochází k efektivnímu využití jako u klasického železobetonu (reinforced concrete, dále jen RC). Nejedná se o vláknobeton, kde jsou vlákna neorganizovaně rozmístěna po průřezu, na rozdíl od textilních betonů, kde jsou vlákna spojena do svazků nazývaných roving [4].

Předpokladem pro správné fungování konstrukce je dobré spolupůsobení výztužné sítě s betonem, a proto je vhodné použít výztužné rovingy pnuté ve dvou a více směrech, aby došlo k lepšímu spolupůsobení s betonem a stabilizaci jednotlivých rovingů. Dále je nutné kvalitní probetonování celého prvku, proto je vhodné využití samo-zhutnitelného jemnozrnného betonu. Často se pro TRC využívají vysokohodnotné betony, které jsou charakteristické svojí jemností kameniva ( $< 6$  mm) a samo-zhutnitelností díky přidávanému plastifikátoru.

Velkou výhodou TRC je použití nekorodujících sítí a díky tomu není nutné dodržovat krycí vrstvu jako u ocelové výztuže a je možné vytvářet konstrukci silnou pouze 10 mm [3]. Díky umožnění tenké konstrukce dochází k úspoře materiálu, menší hmotnosti výsledného prvku a tím zmenšení zatížení na ostatní nosné konstrukce.

### 2.2 Historie TRC

Historie TRC se pojí s vlastním vznikem železobetonu, když si 16. července roku 1867 nechal francouzský zahradník Joseph Monier patentovat železobeton. Monier začal s výrobou zahradních květináčů z prostého betonu, ale vlivem mrazu mu během zimy vždy popraskaly. [5] Proto ho napadlo vložit drátěné pletivo do betonu a tím zamezit popraskání. Následně Monier vyráběl železobetonové květináče a došlo i řadě aplikací pro zahradní objekty. Myšlenka se natolik zalíbila stavitelům, že začali používat železobeton běžně v praxi a dnes je to jeden z nejpoužívanějších materiálů pro stavební konstrukce. Nyní se znovu vracíme k původní myšlence betonu vyztuženého sítí a v červnu roku 2002 se mezinárodní unie RILEM začala zabývat výzkumem TRC [6].

## 2.3 Skladba TRC

TRC je kompozit složen z betonu a vláken spletených do pramenců nazývaných rovingy. Vláknata jsou nejčastěji impregnována epoxidovou pryskyřicí nebo jiným impregnačním přípravkem, a nebo mohou být přímo v kontaktu s matricí betonu.

### 2.3.1 Beton

Běžný beton se skládá z kameniva, cementu, vody, příměsí a přísad. Základní stavební jednotkou je zde kamenivo, na kterém velice závisí výsledná pevnost materiálu a tvoří cca 75% hmotnostního podílu z betonu. S kamenivem nižší pevnosti, než je požadovaná pevnost výsledného betonu, nikdy nedocílíme požadovaných hodnot. V běžných betonárnách se dnes používá kamenivo těžené drcené, těžené říční, umělé, nebo recyklované. Třídí se pomocí prosévání přes soustavu sít do jednotlivých frakcí od největších balvanů průměru >63 mm až po nejjemnější prachové částice <0,063 mm. Pro vytvoření lepší struktury matrice betonu se používá několik frakcí kameniva, od hrubé frakce 16/22 mm, až po jemné frakce 0,125/0,09 mm. Vždy se snažíme vytvořit složení kameniva tak, abychom dosáhli tzv. ideální křivky zrnitosti, což znamená, že máme v matrici více složek zrnitosti kameniva, které si vzájemně vyplňují mezery.

Matrice je spojena cementovou kaší vytvořené z cementu a vody. Cement je hydraulické pojivo vytvořené mletím a pálením vápence s jílem při teplotách okolo 1450 °C, tím vzniká slínek, který se následně mele a míchá s přísadami a tím vzniká výsledný cement. Dělí se do pěti základních tříd podle příměsí (CEM I – CEM V) a do tří pevnostních tříd. Vlastnosti cementu jsou ovlivněny mnoha parametry, jako např. podíl příměsí, jemnost mletí atd. ale tím se v této práci nebudeme zabývat. Volba správného cementu může velice ovlivnit chování výsledného materiálu, jako modul pružnosti, smršťování, nebo pevnost v tlaku. Dnes se z ekonomických důvodů nejvíce používají cementy portlandské směsné (CEM II) s vazností 42,5 nebo 52,5 MPa. Zajišťují požadovanou pevnost v tlaku a nevytváří příliš velké hydratační teplo při tuhnutí a tvrdnutí čím zamezí rozvoji trhlin od smršťování.

Pro hydrataci cementu je nezbytnou součástí voda. Po smíchání s cementem začne chemická hydraulická reakce, která vede ke krystalizaci a vytvrzení cementové kaše. Krystaly postupně prorůstají do kameniva a pevně spojí matrici. Množství vody velice ovlivňuje výslednou pevnost betonu, a proto se snažíme ho co nejvíce omezit. Vodní součinitel (hmotnostní podíl obsahu vody k hmotnosti cementu) nutný pro hydrataci cementu je cca 0,25 (0,2), ostatní záměsová voda zde slouží pouze pro

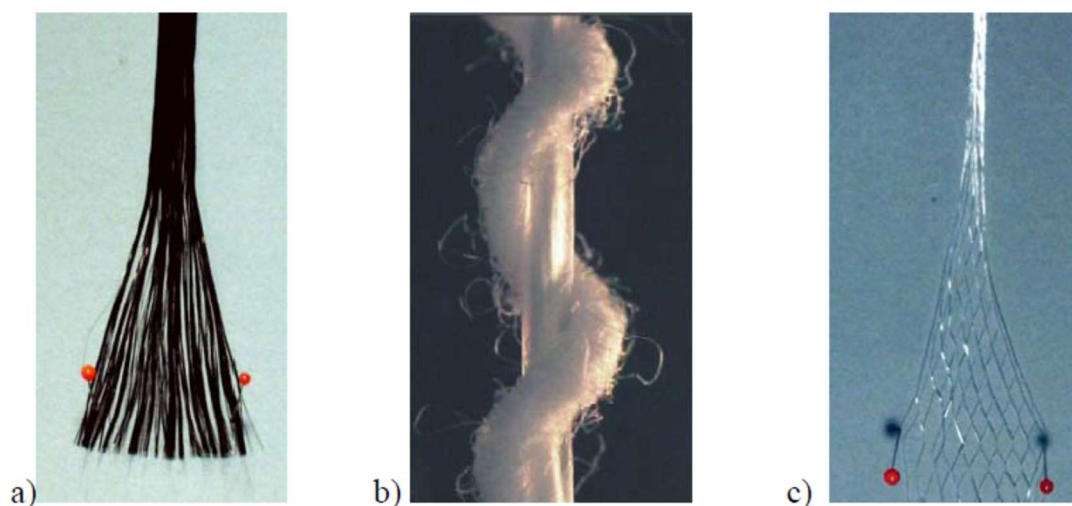
zpracovatelnost betonové směsi. Aby se beton dal zpracovat (měl tekutou konzistenci) bez použití chemických přísad, musí mít vodní součinitel kolem 0,35-0,4. Vlivem této vody nepřispívající k hydrataci cementu, vznikají ve struktuře materiálu nepříznivé póry, které snižují pevnost, snižují nepropustnost betonu a přispívají k většímu smršťování betonu. Proto se do betonové směsi přidávají přísady zvané plastifikátory, které svojí chemickou reakcí sniží vnitřní tření mezi složkami betonové směsi a tím vytvoří tekutější směs bez přidání většího množství vody. Pro výrobu hodnotnějších betonů je tato přísada nezbytnou součástí.

Dále se do betonové směsi přidávají příměsi v podobě inertních, nebo latentně hydraulických látek. Jedná se o příměsi, které mohou zlepšit některé vlastnosti čerstvého nebo ztvrdlého betonu jako např. čerpatelnost, nebo vodo-nepropustnost. Nejčastěji se jedná o latentně hydraulické popílky, nebo křemičité úlety, které přispívají k hydrataci v reakci s cementem, avšak nejsou nutnou součástí betonové směsi.

Dnes se staly už nezbytnou součástí přísady. Chemické látky, které pomáhají vyhovět náročným požadavkům na vlastnosti hotového nebo čerstvého betonu. Pro zlepšení vlastností hotového betonu se používají provzdušňovací přísady, zpěňovače, nebo inhibitory koroze. Častěji se však používají přísady pro zlepšení pouze zpracovatelnosti čerstvé betonové směsi jako jsou již zmíněné plastifikátory, zpomalovače a urychlovače tuhnutí, stabilizátory. [1]

### **2.3.2 Rovingy – svazky nekonečných vláken**

Pro vyztužování TRC se používají vlákna tříděná do několika kategorií: z přírodních materiálů, uměle vytvořená, keramická a kovová. Mezi přírodní patří např. asbestová, nebo vlákna z vegetace, a mezi uměle vytvořená patří vlákna aramidová, uhlíková, polyethylenová, polypropylenová, basaltová, nebo skleněná. Jednotlivá vlákna se smotávají do svazků (rovingů) různými způsoby viz obr. 1. Pro vytváření konstrukčních prvků, jsou nejvhodnější rovnoběžně vrstvená vlákna, protože při zatížení nedochází k jejich prodloužení vlivem rozmotávání, nebo kroucení. [3]



Obr. 1 – Způsoby smotávání vláken a) rovnoběžné shlukování vláken b) spirálovité namotávání c) síťované propletení [3]

Textilní výztuže jsou vyráběny v různých variantách. Smotávají se v neimpregnované podobě do špulek jako nitě, svazují se a protkávají do jednotlivých vyztužných sítí v již impregnované podobě, vyrábí se válcové vyztužné sítě pro betonové trubky, nebo již připravená 3D síť pro betonáž s danou distancí.

Jednotlivé rovingy jsou vytvořeny ze stovek až tisíců jednotlivých vláken a jejich jemnost je popsána pomocí jednotek tex (gram na 1000 m). Následně, když známe hustotu materiálu, si můžeme jednoduše vypočítat plochu průřezu dle vzorce (1).

$$A_r = \frac{T_r}{\rho_r \cdot 1000} \quad (1)$$

$A_r$  – plocha průřezu rovingu [ $\text{mm}^2$ ],  $T_r$  – lineární objemová hmotnost [tex],  $\rho_r$  – hustota materiálu [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]

### 2.3.3 Epoxidová pryskyřice

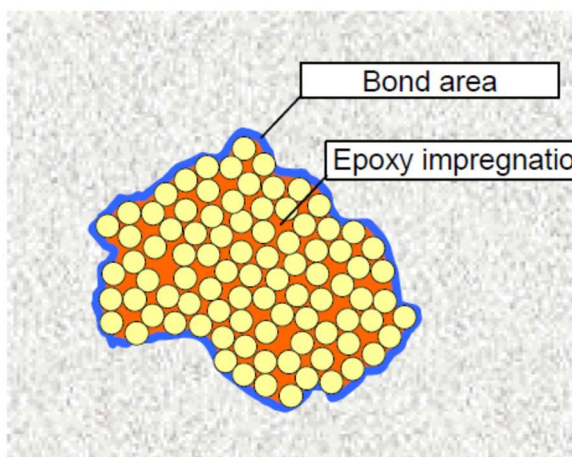
Vliv impregnace a prosycení vláken zkoumal a popisoval například Josef Hegger ve své práci „Textile reinforced concrete under biaxial lading“. Zkoumal vliv nanášení impregnace a porovnával epoxydovou pryskyřici a akrylátový nátěr. Došli k závěru, že epoxydová pryskyřice je pro impregnaci vhodnější [7].

### 2.3.4 Spolupůsobení

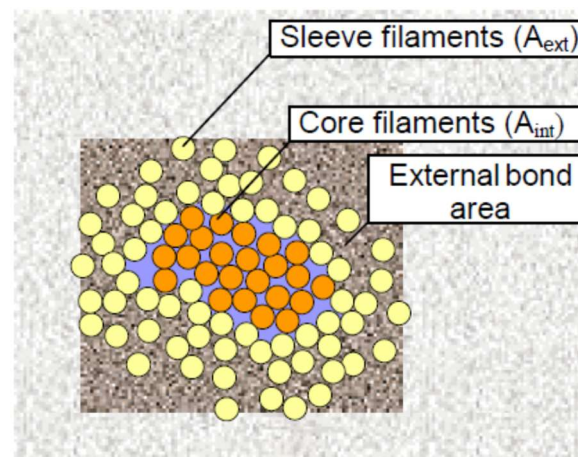
V běžném železobetonu je zajištěno, díky homogennímu ocelovému prutu a stejné tepelné roztažnosti oceli a betonu, dokonalé spolupůsobení kompozitu a materiály se dokonale doplňují. U vyztužení pomocí uhlíkových vláken k tak dobrému

spolupůsobení nedochází. Jednotlivé rovingy se skládají ze stovek jednotlivých vláken, které nejsou pevně spojeny, v hotovém kompozitu by tak vlákna působila jako pramence stovek jednotlivých vláken, které společně nespolupůsobí a mohlo by dojít k vytažení vláken uprostřed rovingu, které nejsou v kontaktu s matricí betonu. Znamenalo by to, že efektivně působí pouze zlomek vláken rozmístěných po obvodu rovingu a ostatní spolupůsobí pouze pomocí tření mezi jednotlivými vlákny viz obr. 3 [6].

Z toho důvodu je nutné pramence vláken nasytit epoxidovou pryskyřicí, která se vsákne mezi vlákna a vytvoří téměř homogenní prut s pevnou strukturou viz obr. 2. Pruty jsou tužší, netřepí se jednotlivá vlákna a lépe spolupůsobí s matricí betonu.



Obr. 2 – Roving impregnovaný epoxidovou pryskyřicí [8]



Obr. 3 – Roving neimpregnovaný po obvodu spojený s betonem [8]

## 2.4 Aplikace TRC

V dnešní době je velice moderní pohledový beton a využití TRC se stává stále více populární. Bohužel zatím nedochází k běžnému použití na nosné konstrukční prvky, ale spíše na designové doplňky. Tento materiál je velice vhodný díky svojí chemické odolnosti, subtilnosti a estetickému působení na exteriérové využití, a proto má nejrozšířenější zastoupení ve využití na fasádní panely. Jejich výroba není technologicky náročná a chování rovných deskových prvků je již otestováno.

Používají se jako pohledová vrstva u sendvičových panelů, nebo samostatně ukládané panely jako obkladové desky. Ve výzkumném centru energeticky efektivních budov v Buštěhradu se zabývali vylehčením fasádních panelů pěnovým polystyrenem a dokázali zredukovat množství použitého betonu o 20% a tím ještě vylehčit fasádní panely, při maximální únosnosti o 16% vyšší než u obyčejných plných panelů [9].





Obr. 4 – Hala v CÁCHách opláštěná sendvičovými panely s TRC [10]

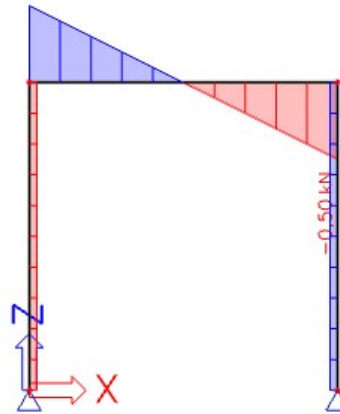
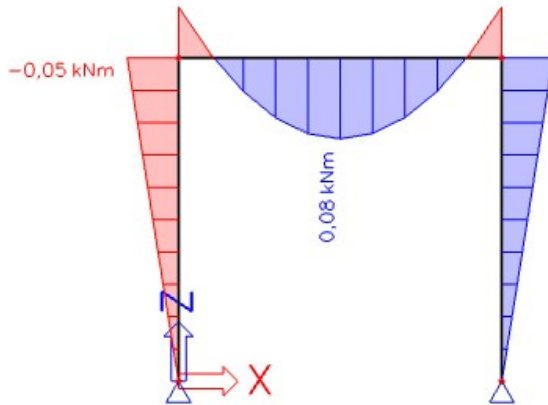
Dále se začínají vyrábět z TRC prototypy trubek na odpadní vody, protihlukové stěny, designové panely s graficky upraveným povrchem, nebo protipovodňové zábrany. Začínají se objevovat i prototypy nosných konstrukcí, jako například balkonové desky, odlehčené kazety pro prefamolitické stropy, a největší nosnou konstrukcí je v současnosti zatím most postaven v roce 2010 v Německu jako experiment nosných konstrukcí viz obr. 5. Most je určen pro přechod studentů z místní školy, je 100 metrů dlouhý a skládá se z šesti prefabrikovaných kusů mostovky o délce 17.2 m. Tento most je svého typu nejdelší na světě [11].



Obr. 5 – most v Německém Albstadtu [11]

## 2.5 Problematika rámového rohu

V běžných betonových konstrukcích se setkáváme s ohýbanými, tlačnými, kroucenými nebo smykově namáhanými prvky. Rámový roh je velice komplikovaný v tom, že se v něm setkávají dva extrémy v jednom bodě. Největší záporný moment a posouvající síla viz obr. 6 a obr. 7



Obr. 6 – vykreslený ohybový moment na rámové konstrukci o jednotkových vzdálenostech a jednotkovém spojitém zatížení

Obr. 7 – vykreslená posouvající síla na rámové konstrukci o jednotkových vzdálenostech a jednotkovém spojitém zatížení

Tyto vnitřní síly je třeba řádně zachytit pomocí ocelové výztuže a zabránit popraskání a případnému kolapsu. Vyztužení tohoto exponovaného místa je však veliký problém z důvodu navazujících konstrukcí. V místě, kde je potřeba napojit nosnou výztuž je většinou technologická spára, která komplikuje přetažení výztuže do napojeného prvku. Dalším problémem je vytržení výztuže z betonu na vnitřním rohu, aby k tomuto jevu nedocházelo je nutné výztuž přetáhnou křížem od vnějšího povrchu k vnitřnímu a naopak. Tím docílíme propojení mezi svislými a vodorovnými prvky. Cílem této práce je navrhnout a posoudit vyztužení takového rohu u tenkostěnné konstrukce z TRC aby se v budoucnu mohly vyrábět složitější konstrukční tvary, než je pouze deskový prvek. Tato oblast textilních betonů ještě není zcela dořešena a budeme se jí věnovat v této práci v dalších kapitolách.

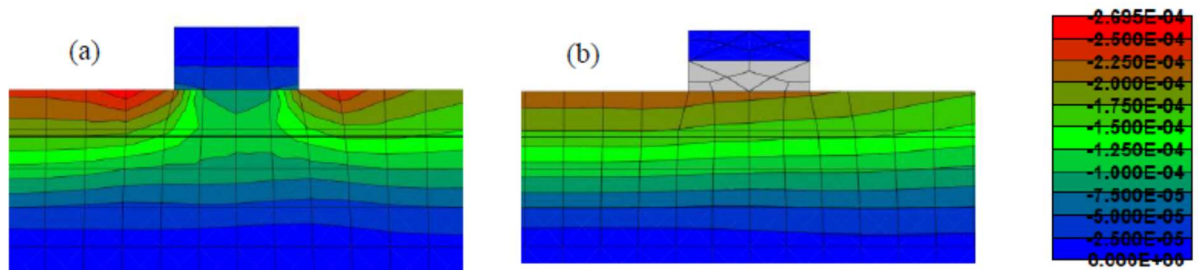
## 2.6 Modelování prvků z TRC

Při modelování prvků z TRC je nutné nejprve provést kvalitní kalibraci numerického modelu. Za tímto účelem se většinou vytváří speciální vzorky, které se následně napodobují v daném softwaru. Není však přesně dáno normou jaký test je nejvhodnější pro kalibraci. Na universitě v Cáchách byly kalibrační metody porovnávány na tahové

zkoušce vyztuženého betonu, tříbodové a čtyřbodové ohybové zkoušce, nebo na zkoušce zatěžované desky uprostřed s podepřenými rohy. Pomocí všech výše zmíněných experimentů je možné kalibrovat model, ideální by však bylo použít kombinaci více experimentů [12].

V našem experimentu bude model vytvářen v softwaru Atena Science, který je vhodný pro nelineární výpočty betonových konstrukcí ve 2D i 3D. Vývojáři upozorňují na problematiku soudržnosti rovingů s betonem, kdy je nutná velice hustá síť kolem rovingů modelovaných jednotlivě. Proto uvedli několik doporučení. První z nich je při modelování ve 3D převedení průřezové plochy všech rovingů v jedné vrstvě do jednoho nebo dvou prutů odpovídající součtu, rovnoměrně rozmístěných po šířce prvku. Nicméně tím snížíme přesnost soudržnosti s betonem. Dále je možné vytvoření vrstvy rozprostřené rovnoměrně po průřezu s plochou průřezu odpovídající součtu rovingu v dané rovině. Tím dojdeme ke stejnému omezení soudržnosti jako u modelování menšího počtu prutů s větší plochou. Nejvhodnější však je použít model, který svoji síť nepřizpůsobuje výztužným prutům, ale rovingy se vloží jako výztuž s definovanou soudržností. V softwaru Atena je možné definovat soudržnost tri-lineární křivkou, která je dostačující pro zachycení chování soudržnosti rovingu s betonovou maticí [13].

Kalibrací modelu TRC se zabýval například Ing. Tomáš Vlach, v práci „Soft insert for support modeling of slightly textile reinforced concrete“. Laboratorní test v jeho experimentu byl proveden na panelu s rozměry 360x100x18 mm, zatěžovaným čtyřbodovým ohybem. Model byl provedený v softwaru Atena 2D z nelineárně uvažovaného betonu a výztuží definovanou jako prut s definovanou soudržností. Síť konečných prvků byla vytvořena z lineárních čtyřhranných prvků, po výšce byla dělena na 8 částí a po délce tak, aby prvky odpovídaly poměru maximálně 2:1. Nosník byl zatěžován deformací působící na roznášecí ocelovou destičku až do kolapsu. Při výpočtu však docházelo k nežádanému rozvoji trhlin v místě uložení ocelové destičky a výsledky tím byly výrazně ovlivněny. Proto v modelu vytvořil pružnou podložku pod ocelovou destičkou viz obr. 8, která pomohla k přenesení tlakové síly do nosníku, ale nezabraňovala v příčné deformaci, a tak nepřispívala k rozvoji trhlin.



Obr. 8 – Ovlivnění vnitřních napětí umístěním pružné podložky pod ocelovou destičku [14]

## 2.7 Zkoušky ztvrdlého betonu

Pro získání potřebných dat k vytvoření kvalitního numerického modelu budeme muset provést řadu experimentů. Nejdůležitějším experimentem bude zkouška soudržnosti vláken s betonem kvůli rozvoji trhlin při zatěžování. Dalším důležitým experimentem bude zkouška čtyřbodovým ohybem již vyztuženého betonu pro zjištění chování hotového kompozitu a možnosti porovnání s numerickým modelem. Dále bude třeba udělat doprovodné zkoušky dle ČSN a to tlakovou zkoušku betonu, zkoušku tahu za ohybu, a tahovou zkoušku uhlíkových vláken.

### 2.7.1 Zkouška soudržnosti výztuže s betonem

Pro textilní výztuže a textilní betony neexistují normy ČSN, a proto vycházíme ze dvou předpisů. Předpis pro zkoušení ocelové výztuže s betonem ČSN 73 1328 a Americký předpis ACI 440.3R-04 pro zkoušky Fiber-Reinforced Polymers (FRPs – nekovové výztuže) pro vyztužování a zpeňování betonových konstrukcí [15]

Dle normy ČSN 73 1328 se za „mez soudržnosti považuje soudržnost, při níž posun ocelového prutu namáhaného na vytažení z betonu činí 0,001 až 0,002 mm“. Smykové napětí po obvodu se pak vypočítá jako poměr síly účinkující na výztuž k velikosti kontaktní plochy podle (2). [16] Česká norma však neuvažuje jiné druhy porušení než prokluz kontaktu oceli s betonem.

$$\tau_m = \frac{F_m}{a_m \cdot o_m} \text{ [MPa]} \quad (2)$$

$F_m$  – Síla působící na výztuž [N],  $a_m$  – délka zakotvení výztuže [mm],

$o_m$  – obvod výztuže [mm]

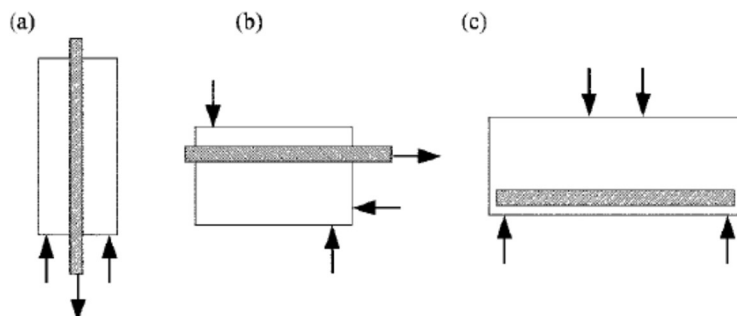
Dle Evropského předpisu se připouští [17]:

- a) Porušení kontaktu pryskyřice s betonem
- b) Porušení pevnosti epoxidové pryskyřice
- c) Porušení pevnosti betonu
- d) Nebo kombinace třech předchozích možností

Dále se Smykové napětí vypočítá stejným způsobem jako v ČSN viz (2), ale uvažujeme i chování po překročení hranice soudržnosti. Dr.-Ing. Björn Banholzer popsal ve své práci „Bond behaviour of a multi-filament yarn embedded in a cementitious matrix“ chování vytahované nekovové výztuže, třemi stádii při zkoušce soudržnosti. První stádium aktivování výztuže a prokluz výztuže, ve druhé fázi dochází k hmoždinkovému efektu a dojde k navýšení soudržnosti i po prokluzu větším, než je 0,002 mm, a ve třetí fázi dochází k poklesu a hodnotíme soudržnost pouze jako zbytkové tření mezi výztuží a cementovou matricí. [18]

### 2.7.2 Tahová zkouška vláken

Podle Americké normy ACI 440-3R-04 je možno použít hned několik variant zkoušek pro určení průřezových charakteristik zkoumané FRP výztuže viz obr. 9.



Obr. 9 – příklady stanovení průřezových charakteristik dle ACI 440-3R-04 a) jednoose zatěžený prut b) koncový vzorek nosníku c) čtyřbodový ohyb [17]

V této kapitole se budeme zabývat jednoosou tahovou zkouškou. Pro tuto zkoušku je nutné připravit kvalitně prosycené vzorky FRP výztuží epoxidovou pryskyřicí a připravit na oba konce vzorků roznášecí objímky. Vzorek se ukotví do trhacího zařízení a do středu se umístí potenciometr měřící deformaci během zatěžování. Zatěžujeme nepřetržitým přitěžováním do přetržení rovingu [19].

**Vyhodnocení výsledků:**

$$f_t = \frac{F_u}{A} \quad , \quad \varepsilon_u = \frac{F_u}{E_L * A} \quad (3)$$

$f_t$  – pevnost v tahu [MPa],  $\varepsilon_u$  – poměrné přetvoření [-],  $F_u$  – síla při přetržení [N],

$A$  – plocha průřezu [mm<sup>2</sup>],  $E_L$  – modul pružnosti [MPa]

$$E_L = \frac{F_1 - F_2}{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) * A} \quad [\text{MPa}] \quad (4)$$

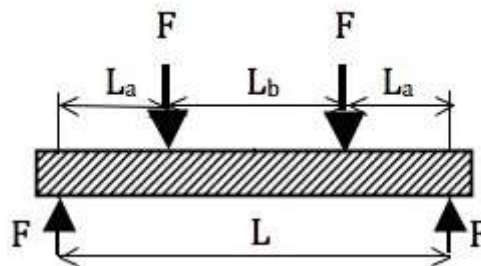
$E_L$  – modul pružnosti [MPa],  $F_1$  a  $\varepsilon_1$  – síla a odpovídající si přetvoření,

$F_2$  a  $\varepsilon_2$  – síla a odpovídající si přetvoření,  $A$  – plocha průřezu [mm<sup>2</sup>]

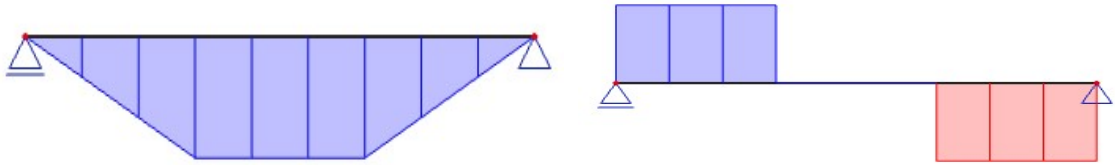
Stanovení modulu pružnosti se neuvažuje až do vrcholu zatěžovací křivky, ale pouze v lineárním úseku cca od 20% do 50% kapacity materiálu [17].

### 2.7.3 Čtyřbodový ohyb vyztuženého prvku

Čtyřbodový ohyb je popsán v normě ČSN EN 12390-5 jako „stanovení pevnosti v tahu ohybem zkušebních těles“, ale v Americké normě ACI 440-3R-04 je tento test použit pro stanovení pevnosti v tahu použité výztuže. Zatěžování dvěma silami je výhodné v tom, že při zatěžování vyvíjíme uprostřed nosníku konstantní ohybový moment v kombinaci s nulovou posouvající silou viz obr. 11 a obr. 12. Zkouška se provádí na hranolech se zarovnanými hranami (případně je nutné obrousit nerovnosti) a musí mít rovnoběžné hrany s úhlem 90°. Zatěžování probíhá symetricky dvěma silami, typicky se stejnými osovými vzdálenostmi mezi jednotlivými ložisky viz obr. 10, ale není to pravidlem. Stanoví se daná rychlost zatěžování od 0,04 MPa/s až 0,06 MPa/s a zatěžuje se do kolapsu. [20]



Obr. 10 – Geometrický tvar vzorku pro čtyřbodový ohyb [21]



Obr. 11 – tvar ohybového momentu při zkoušce  
Obr. 12 – tvar posouvající síly při zkoušce

### Vyjádření výsledků:

Pevnost v příčném tahu betonu je dána poměrem ohybového momentu a průřezového modulu a stanoví se dle rovnice č. (5). Tento vztah platí pouze pro nevyztužený beton, nebo do vzniku první trhliny u vyztuženého betonu.

$$f_{tc} = \frac{F \cdot l}{b \cdot h^2} \quad (5)$$

$f_{tc}$  – pevnost v tahu betonu [MPa],  $F$  -zatěžovací síla [N],  $b$  – šířka vzorku [mm],  
 $h$  – výška vzorku [mm]

Pevnost rovingu v tahu se vyjádří z rovnosti vnitřních sil taženého rovingu a tlačného betonu, dohromady na ramenu vnitřních sil vytvářejí vzdorující ohybový moment.

$$f_{tr} = \frac{F \cdot L_a}{d \cdot A - \frac{A}{2 \cdot f_c \cdot b}} \quad (6)$$

$f_{tr}$  – pevnost v tahu rovingu [MPa],  $F$  -zatěžovací síla [N],  $L_a$  – vzdálenost síly od podpory viz obr. 10 [mm],  $d$  – průměrná vzdálenost os rovingů od horního povrchu [mm],  $f_c$  – pevnost betonu v tlaku [MPa]

## 2.7.4 Třibodový ohyb

Třibodový ohyb je popsán v normě ČSN EN 12390-5 a je téměř totožný se zkouškou čtyřbodového ohybu s rozdílem průběhu vnitřních sil. Vzorek se zatěžuje jednou silou uprostřed nosníku a v tomto místě vzniká kombinace extrému ohybového momentu a posouvající síly.

### Vyjádření výsledků:

Pevnost v příčném tahu je dána poměrem ohybového momentu a průřezového modulu a stanoví se dle vztahu (7).

$$f_{tc} = \frac{3 * F * l}{2 * b * h^2} \quad (7)$$

$f_{tc}$  – pevnost betonu v tahu [MPa],  $F$  -zátěžovací síla [N],  $b$  – šířka vzorku [mm],  $h$  – výška vzorku [mm]

## 2.7.5 Tlaková zkouška betonu

Zkouška pevnosti betonu v tlaku je popsána v normě ČSN EN 12390-3. Provádí se na vzorcích o tvaru:

- a) krychle (150x150x150 mm)
- b) válec ( $h = 300$ ,  $\varnothing 150$  mm)
- c) vývrt

Zkouška se provádí v lisu s celoplošným zatěžováním, dokud se na vzorku nevytvoří charakteristický kužel od příčných tahů.

### Vyjádření výsledků:

Pevnost v tlaku se určí ze vztahu

$$f_c = \frac{F}{A_c} \text{ [MPa]} \quad (8)$$

$f_c$  – pevnost v tlaku [MPa],  $F$  – maximální síla při zatěžování [N],

$A_c$  – plocha průřezu [mm<sup>2</sup>]



## 3 Experimentální část

### 3.1 Úvod

V kapitole rešerše, jsme se zabývali obecně betonem vyztuženým textilními výztužemi, v našem experimentu se však budeme zabývat pouze betonem UHPC vyztuženým uhlíkovými vlákny. Pro získání materiálových parametrů je potřeba udělat řadu experimentů, abychom mohli vytvořit co nejpřesnější numerický model. Model bude vytvořen v softwaru ATENA od společnosti Červenka Consulting s.r.o., do kterého budeme potřebovat především pevnost betonu v tlaku a tahu, pevnost uhlíkové výztuže v tahu a příslušný modul pružnosti, a hodnotu smykové soudržnosti výztuže s betonem. Přípravy vzorků a laboratorní měření budou probíhat ve výzkumném centru energeticky efektivních budov v Buštěhradě (UCEEB) a ve výzkumném centru ČVUT pod dohledem odborných pracovníků.

### 3.2 Použité materiály

#### Epoxidová pryskyřice SikaFloor-156

Dvou-komponentní epoxidová pryskyřice určena pro základní nátěry betonových podkladů a stěrek, jako univerzální spojovací můstek atd. Její největší výhodou je nízká viskozita, tudíž se lépe vpije mezi jednotlivá vlákna, a vysoká přídržnost [22]

Materiálové charakteristiky: Objemová hmotnost  $\rho = 1,1 \text{ kg/l} = 1100 \text{ kg/m}^3$

Pevnost v tlaku  $f_c = 55 \text{ MPa}$

Pevnost v tahu  $f_t = 15 \text{ MPa}$

Modul pružnosti  $E = 2 \text{ GPa}$

#### Beton UHPC

Receptura použitá pro experiment vychází z dlouholetého výzkumu v centru UCEEB a je používána pro všechny laboratorní testy z UHPC kvůli porovnatelnosti výsledků.

Receptura:

Složka	Množství [kg/m <sup>3</sup> ]
Cement CEM I 42,5 R	680
Křemičitý písek 01/06, 06/12	960
Mikrosilika	175
Křemenná moučka	325
Voda	170
Superplastifikátor	29

## Uhlíková vlákna

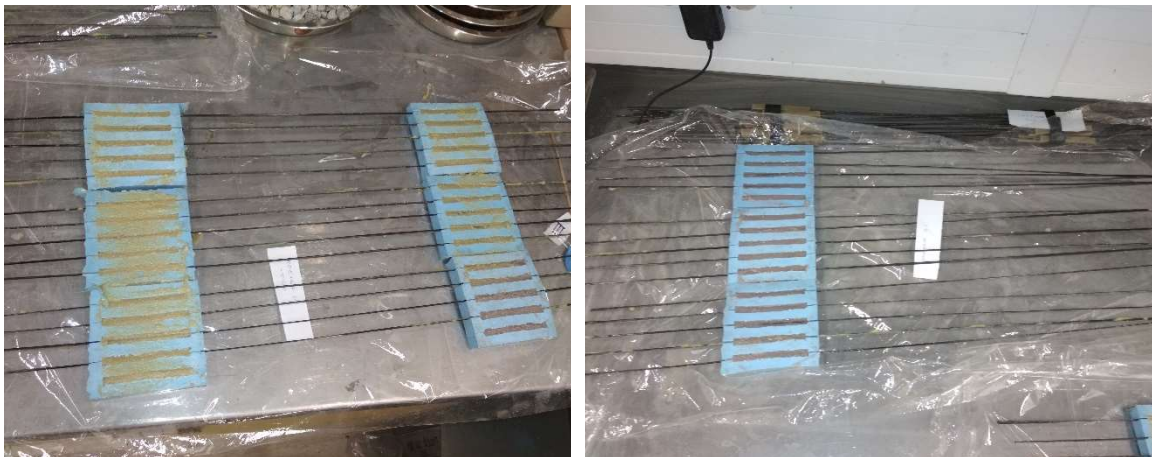
Pro experiment bude použita uhlíková výztuž Toho Tenax HTS40 F13, 24K, 1600tex s pevností v tahu  $f_t = 4400$  MPa a modulem pružnosti  $E = 240$  GPa.

### 3.3 Příprava vzorků

Celkem bude provedeno pět experimentů, zkouška soudržnosti výztuže s betonem, zkouška kompozitu čtyřbodovým ohybem, tahová zkouška jednotlivých rovingů, a doprovodné zkoušky dle normy (tlaková zkouška a zkouška tahu za ohybu). Pro první tři zkoušky budou vytvořeny vždy dvě varianty řešení. Varianta s hladce nalakovanou uhlíkovou výztuží a druhá varianta s opískovanou povrchovou úpravou.

#### 3.3.1 Textilní výztuže

Pro experiment bude použita uhlíková výztuž Toho Tenax HTS40 F13, 24K, 1600tex s pevností v tahu  $f_t = 4400$  MPa a modulem pružnosti  $E = 240$  GPa. Tato výztuž, jak již bylo popsáno v předchozích kapitolách, se skládá z tisíců jednotlivých vláken, které jsou potřeba pevně spojit, aby působila jako celek. Proto byl použit nátěr z epoxidové pryskyřice Sikafloor – 156 nanášený válečkem v jedné vrstvě. Byly připraveny dva typy textilie, jednotlivé rovingy pro tahovou zkoušku a zkoušku soudržnosti viz obr. 13, a síť pro betonové destičky na čtyřbodový ohyb viz obr. 14.



Obr. 13 – Vlevo vzorky pro tahovou zkoušku, vpravo vzorky pro zkoušku soudržnosti. (foto: Žalský)



Obr. 14 – Síť vytvořené z uhlíkových vláken a impregnované pryskyřicí (foto: Žalský)



Obr. 15 – detail opískování rovingů (foto: Žalský)

Pro impregnování jednotlivých rovingů byl vytvořen dřevěný rám o šířce 600 mm, a mezi natlučené hřebíčky se namotávala uhlíková nit. Celkem bylo vytvořeno 15 vzorků pro tahovou zkoušku a 15 vzorků pro zkoušku soudržnosti, z toho bylo vždy 7 vzorků čistě nalakovaných a 8 vzorků bylo s opískovanou povrchovou úpravou s pískem frakce 01/06 viz obr. 15.

Pro výrobu uhlíkové sítě byl svařen ocelový rám potažený polystyrenovou trubkou o rozměrech 400x850, do které byly nařezány distanční mezery ve vzdálenosti 24,5 mm, které nám určovaly roztěč jednotlivých prutů. Uhlíková nit byla natažena v obou na sebe kolmých směrech a následně nalakována pryskyřicí, čímž došlo ke spojení výztuže v obou směrech a prosycení vláken pryskyřicí viz obr. 14. Síť byly později nastříhány na pruhy šířky 100 mm a zarovnané tak, aby se vešly do připraveného bednění a každá z nich obsahovala čtyři podélné rovingy. Tyto sítě také byly vytvořeny ve dvou variantách, první hladce nalakovaná epoxydovou pryskyřicí a druhá nalakovaná s opískovanou povrchovou úpravou.

### 3.3.2 Vzorky pro tahovou zkoušku

Po zatvrdnutí pryskyřice na jednotlivě uložených rovinzích, byly vzorky z rámu vystříhány a bylo nutné na koncích připravit objímky pro uchycení do trhačického zařízení. Přípravou vzorků a vlivem koncové úpravy se zabýval tým z ČVUT a popsal jej v práci „Comparison of two approaches for the tensile test of single roving in polymer matrix“. Podle Americké normy by se na obou koncích vzorku měla udělat ocelová objímka pro

ukotvení do trhacího zařízení a roznos příčných sil vzniklých při zatěžování, ale při porovnání výsledků bez ocelové objímky bylo naměřeno téměř identickým výsledkům. Proto při vytváření prvních vzorků byla zvolena varianta bez ocelové objímky [19]. Na základě zkušeností byl do pryskyřice přidán křemičitý písek jemné frakce a popílek pro zvýšení viskozity pryskyřice a pro zlepšení soudržnosti s rovingy. Objímky se vytvářely v silikonové formě a uprostřed byl vložen uhlíkový roving viz obr. 13. Celkem bylo vytvořeno 15 vzorků na tahovou zkoušku ve dvou variantách (pískovaná a hladká).

Laboratorní testy byly prováděny na trhacím zařízení LabTest 4.100-SP1 ve výzkumném centru ČVUT s pomocí pana Ing. Pavla Kokeše, který má na starosti obsluhu strojů.

Při první zkoušce tahové únosnosti bylo zjištěno, že poznatky z článku [19] zkoušené na skleněných vláknech, neplatí pro vlákna uhlíková s vyšší pevností. V objímce epoxydové pryskyřice vznikají velká příčná tahová napětí, a objímka se v polovině zátěžového testu rozpadla viz obr. 16. Proto bylo třeba všechny vzorky předělat podle původního návrhu dle ACI a koncové objímky umístit do ocelových trubek viz obr. 17.



Obr. 16 – Vlevo uchycení vzorku S-H-1 do trhacího zařízení, uprostřed porušení objímky v upínacích kleštích, vpravo porovnání s ostatními vzorky (foto: Žalský)



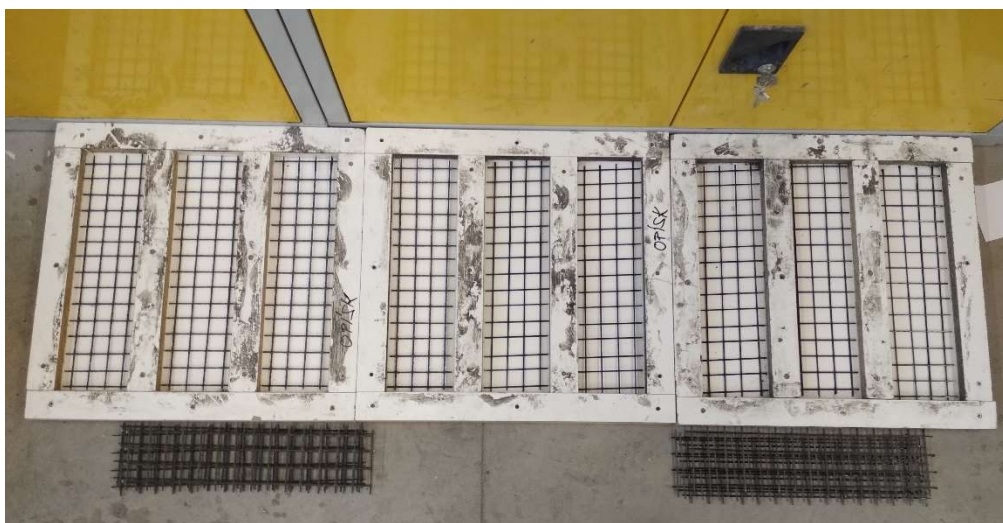
Objímky se nejprve, pro zajištění soudržnosti pryskyřice s hladkou ocelí, navrtaly ve třech místech ze všech stran a následně se již hotové vzorky vložily do trubky a zalepily pryskyřicí viz obr. 17.



Obr. 17 – Nově provedená koncová úprava rovingu pro tahovou zkoušku únosnosti (foto:Žalský)

### 3.3.3 Destičky pro čtyř-bodový ohyb

Pro zjištění chování hotového kompozitu a zjištění tahové pevnosti uhlíku v tahu byly vytvářeny vzorky pro čtyř-bodový ohyb (popsán v kapitole 2.7.3.), vybetonované ze směsi UHPC (viz kapitola 3.2) a budou vyztuženy při obou površích. Po vytvoření výztužné sítě, bylo smontováno bednění z dřevěných laminátových desek o rozměrech cca 360x100x20 mm, do kterého se vložily výztužné sítě viz obr. 18. Následně byly připraveny jednotlivé složky pro míchání betonové směsi a dle technologického předpisu byly vsypány do míchačky.

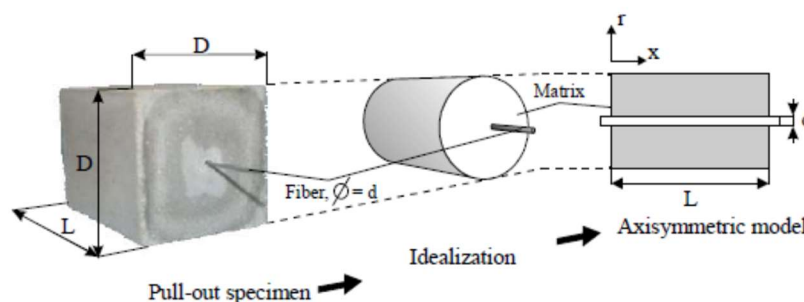


Obr. 18 – pohled do bednění s připravenou spodní výztužnou sítí (foto: Žalský)

Po ukončení míchání betonové směsi, je velice důležitá rychlá koordinace při ukládání čerstvého betonu. UHPC má velice rychlý počátek tuhnutí a již po několika minutách se na povrchu betonu vytváří tenká slupka ztuhlého cementu a mohlo by dojít k vytvoření „pracovní spáry“ (napojení ztuhlého a čerstvého betonu), což může způsobit nedokonalé spolupůsobení ve vnitřní struktuře betonu. V našem případě je postup betonáže následující: nejprve se vybetonuje tenká vrstvička betonu na dno formy a rozprostře se do rohů, vtlačí se do ní připravená výztužná síť (co nejbližše spodnímu povrchu bednění, kvůli maximalizaci ramene vnitřních sil), doleje se forma betonem do plna, vtlačí se horní výztužnou síť a zarovná se povrch špachtlí s horní hranou bednění, aby bylo zajištěno co nejpřesnější tloušťky betonové destičky. Když je povrch již zarovnan, nedoporučuje se do něho již zasahovat, mohlo by dojít k narušení již zahájené krystalizace cementové matrice a snížení výsledné pevnosti betonu. Směs UHPC je samozhutnitelná, takže není nutné beton vibrovat (naopak se vibrování nedoporučuje, aby nedošlo k rozptýlení kameniva). Povrch se tedy jenom přikryje PVC folií, aby nedocházelo k odpařování vody a vzorky se umístí do klimatické komory.

### 3.3.4 Vzorky pro zkoušku soudržnosti

Soudržnost FRP výztuží není přesně popsána v žádné normě, existují však doporučení, jak test soudržnosti provádět. Vycházíme hlavně z Americké normy ACI a článku [18]. Pro náš experiment byl zvolen test vytažení výztuže, kdy zabetonovaný roving bude postupným zatěžováním vytažen z betonu a bude zaznamenána síla do diagramu potřebná na vytažení viz obr. 19.



Obr. 19 – Doporučený tvar vzorku pro zkoušku soudržnosti [18]

Pro test soudržnosti byly nejprve připraveny jednotlivé rovingy s objímkami na jednom konci (viz obr. 13) a druhý konec se nechal volný pro následné ukotvení do betonové destičky. Z laminátových desek byly vytvořeny dvě formy na pět vzorků o rozměrech cca 100x100x20 mm a v jeden den byly vybetonovány všechny vzorky aby

byla zaručená jednotná doba tvrdnutí pro všechny vzorky a výsledky si odpovídaly. Znovu byly vytvořeny dvě varianty vzorků, pětkrát s hladkým povrchem a pětkrát s opískovanou povrchovou úpravou.

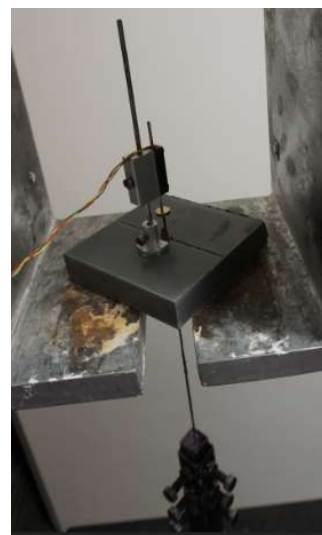
Do formy byla vyvrtána dírka, kterou se následně prostrčila uhlíková výztuž viz obr. 20 a utěsnila se tmelem, aby nedošlo k vytékání čerstvého betonu a aby nedocházelo k potrhání čelní části betonu vlivem tahových napětí viz obr. 21.



Obr. 20 – bednění pro zkoušku soudržnosti (foto: Žalský)



Obr. 21 – silikonový kužel pro zamezení popraskání betonu (foto: Žalský)



Obr. 22 – vzorek umístěný do trhacího zařízení (foto: Žalský)

Výsledek nejvíce ovlivňuje délka uložení v betonu a rychlost zatěžování. Délka uložení není přesně dána, kvůli namazání rovingu silikonem a nelze přesně zajistit rozměry silikonového kuželu. Délka  $L$  se tak bude muset změřit dodatečně po zkoušce, vzorek se rozlomí v místě prostrčené výztuže a z řezu identifikujeme rozměr silikonového kuželu a délku spolupůsobení s betonem.

### 3.3.5 Doprovodná tělesa

Pro získání materiálových charakteristik betonu, byla vytvořena doprovodná tělesa dle normy ČSN. Zkoumala se pevnost v tlaku  $f_c$  tlakovou zkouškou a pevnost v tahu  $f_t$  ohybovou zkouškou. Každý z testů zahrnoval tři tělesa připravená ve stejný den jako byla betonována ostatní zkušební tělesa. Pro tlakovou zkoušku byly vytvořeny tři krychličky o rozměrech 100x100x100 mm a byly zkoušeny na lisu Controls. Při testu se zaznamenávala síla působící na vrchní plochu krychličky, která se následně přepočítala

na tlakové napětí. Zkouška v tahu za ohybu se realizuje na trámečcích o rozměrech 40x40x160 mm. V první fázi je trámeček zatěžován jednou silou umístěnou uprostřed, dokud nedojde ke kolapsu. Tím získáme pevnost betonu v tahu (dle výpočtu viz rovnice (7)). Ve druhé fázi se ověřuje příslušná pevnost v tlaku, a rozlomené části trámečku se znovu vloží ro lisu a zatěžují se tlakovou silou do rozdrčení.

### **3.4 Ošetřování a ukládání**

Kvůli snazšímu odformování betonu se bednění vytírá speciálním olejem, aby nedošlo k poškození povrchu betonu a nepoškodilo se bednění pro další použití. Při ukládání betonu UHPC není třeba vibrovat, beton je samozhutnitelný a formu dokonale vyplní pouze účinkem působení gravitace. Doporučuje se však lehké poklepání formou o pevný podklad, a tím dojde k rozhýbání bublinek, které se mohly při betonáži vytvořit.

Vybetonované vzorky je nutné neprodleně zakrýt PVC folií, aby nedošlo k odpaření vody potřebné k hydrataci a snížení pevnosti betonu, nebo popraskání povrchu. Podle normy, se mají vzorky umístit do vody, kde se nechají 28 dní vyzrát. V našem případě byly vzorky pouze v klimatické komoře, kde byly po dobu 28 dnů v konstantních podmínkách při teplotě 20°C a relativní vlhkosti 40%, aby bylo simulováno reálnější prostředí.



## 4 Vyhodnocení

Pro vytvoření modelu bylo třeba získat vstupní parametry pomocí laboratorních zkoušek. Bylo tak učiněno na řadě vzorků. Vzorky kompozitu byly provedeny vždy ve dvou variantách. S hladkou povrchovou úpravou, označených písmeny S-H (jako Sikafloor-Hladká), a s opískovanou povrchovou úpravou, označených písmeny S-P (jako Sikafloor-Pískovaná). Doprovodná tělesa prostého beton byla označena písmenem „O“ pro prostý ohyb tříbodovou zkouškou a písmenem „T“ pro tlakovou zkoušku.

### 4.1 Pevnost betonu v tlaku

Tlaková zkouška probíhala ve výzkumném centru UCEEB v Buštěhradu na přístroji Controls. Tři betonové krychle o rozměrech 100x100x100 mm vybetonované dne 7. 3. 2018 se zatěžovaly do rozdrčení a síla působící na horní plochu krychle se kontinuálně zaznamenávala do diagramu a počítač automaticky přepočítával sílu v napětí na daném vzorku dle vzorce (8).



Obr. 23 – rozdrčený vzorek č.1. Tvar porušení se shoduje s normovým porušením a všechny tři vzorky vypadali srovnatelně.

Norma také předepisuje uznávaná a nepřijatelná porušení, na obr. 23 je vidět, jakým stylem se porušily všechny vzorky a zkouška se mohla považovat za úspěšnou. Výsledky tlakové zkoušky betonu jsou uvedeny v Tabulka 1.

## Výsledky měření tlakové zkoušky

Vrorek	m	a	b	h	V	$\rho$	$\rho_{\text{prům.}}$	$A_c$	$F_{\text{max}}$	$f_{cc}$	$f_{c\text{prům.}}$
	[kg]	[mm]	[mm]	[mm]	[m <sup>3</sup> ]	[kg*m <sup>3</sup> ]	[kg*m <sup>3</sup> ]	[mm <sup>2</sup> ]	[kN]	[MPa]	[MPa]
T1	2,256	100	100	101,6	0,00102	2221,5	2223,6	10156,7	1433,1	141,1	138,2
T2	2,239	100	100	101,0	0,00101	2216,4		10103,3	1366,6	135,3	
T3	2,244	100	100	100,5	0,00101	2232,9		10050,0	1389,7	138,3	

Tabulka 1 –  $f_{cc}$  – pevnost betonu v tlaku [MPa],  $F_{\text{max}}$  – síla při rozdrčení betonu

## 4.2 Pevnost betonu v tahu za ohybu

Zkouška tahu za ohybu probíhala ve výzkumném centru UCEEB v Buštěhradu na přístroji Controls. Trámeček 40x40x160 mm byl zatěžován osamělou silou uprostřed. Vzorek bylo nutné řádně přeměřit a zaznamenat údaje do tabulky pro výsledné stanovení pevnosti v tahu. Při zkoušce bylo použito kloubového vyrovnávacího zařízení, aby nedošlo k žádné excentricitě v zatěžování. V první fázi se trámeček zatěžuje třibodovým ohybem až do kolapsu viz obr. 24 a ve druhé fázi se obě půlky testují na tlak viz obr. 25. Pevnost v tahu se stanoví podle vzorce (7).



Obr. 24 – trámeček po první fázi zkoušky tahu za ohybu (foto: Žalský)



Obr. 25 – tlaková zkouška na trámečku při fázi dva (foto: Žalský)

## Výsledky měření

Vrorek	m	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	l	V	$\rho$	$\rho_{\text{prům.}}$	A <sub>c</sub>	F <sub>max</sub>	f <sub>tc</sub>	f <sub>tcprům.</sub>
	[kg]	[mm]	[mm]	[mm]	[m <sup>3</sup> ]	[kg*m <sup>3</sup> ]	[kg*m <sup>3</sup> ]	[mm <sup>2</sup> ]	[kN]	[MPa]	[MPa]
O1	0,583	40	40	160,0	0,00026	2277,1	2229,9	6400,0	3,6	8,5	8,54
O2	0,569	40	40	160,0	0,00026	2222,1		6400,0	3,9	9,2	
O3	0,572	40	40,76667	160,0	0,00026	2190,4		6522,7	3,5	8,0	

Tabulka 2 – Výsledky tříbodového ohybu. f<sub>tc</sub> – pevnost v tahu betonu, F<sub>max</sub> – síla při porušení betonu působící na těleso

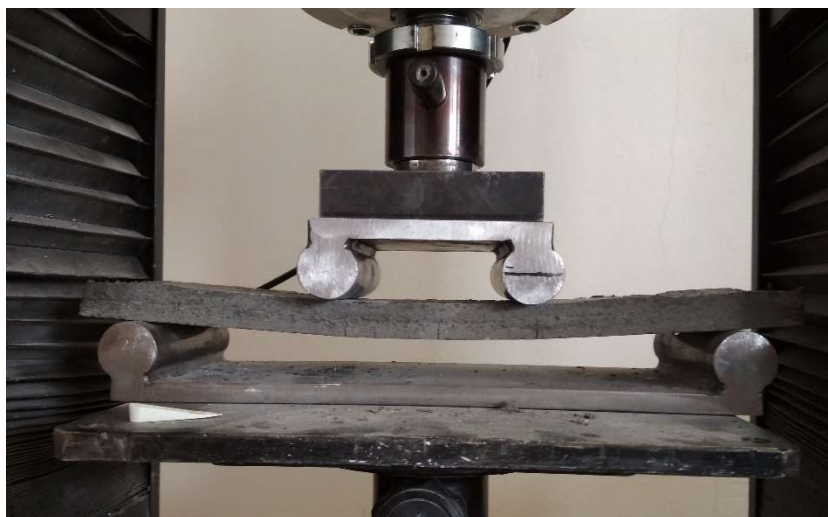
Vrorek	m	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	l	V	$\rho$	$\rho_{\text{prům.}}$	A <sub>c</sub>	F <sub>max</sub>	f <sub>cc</sub>	f <sub>ccprům.</sub>
	[kg]	[mm]	[mm]	[mm]	[m <sup>3</sup> ]	[kg*m <sup>3</sup> ]	[kg*m <sup>3</sup> ]	[mm <sup>2</sup> ]	[kN]	[MPa]	[MPa]
O1	0,583	40	40	160,0	0,00026	2277,1	2229,9	1600	211,93	132,4563	138,3
	0,583	40	40	160,0	0,00026	2277,1		1600	221,9	138,6938	
O2	0,569	40	40	160,0	0,00026	2222,1		1600	235,29	147,0563	
	0,569	40	40	160,0	0,00026	2222,1		1600	219,38	137,1125	
O3	0,572	40	40,76667	160,0	0,00026	2190,4		1630,667	219,4	134,5155	
	0,572	40	40,76667	160,0	0,00026	2190,4		1630,667	228,7	140,2617	

Tabulka 3 – Výsledky druhé fáze tříbodového ohybu. f<sub>cc</sub> – pevnost betonu v tlaku

### 4.3 Pevnost uhlíkových vláken (čtyřbodový ohyb)

Jak již bylo řečeno v dřívějších kapitolách, pro zjištění pevnosti uhlíkových vláken v tahu byly prováděny dva experimenty. Jednoosá zkouška v tahu (kapitola 2.7.2) a čtyřbodový ohyb (viz kapitola 2.7.3). V této kapitole se budeme zabývat druhou z uvedených variant. Bylo vytvořeno celkem devět vzorků, pět z nich mělo zabetonovanou výztuž s hladkým povrchem a čtyři výztuž s opískovanou povrchovou úpravou. Zatěžovací zkoušky probíhaly ve výzkumném centru ČVUT v Dejvicích na přístroji LabTest 4.100SP1 s asistencí pana Ing. Pavla Kokeše.

Vzorky o rozměrech cca 360x100x18 mm byly umístěny na zatěžovací stoličce tak, aby vzdálenosti zatěžovacích ložisek byly 100 mm od sebe. Zatěžování probíhalo konstantní deformací o rychlosti 0,02mm/s do kolapsu konstrukce znázorněném na obr. 27.

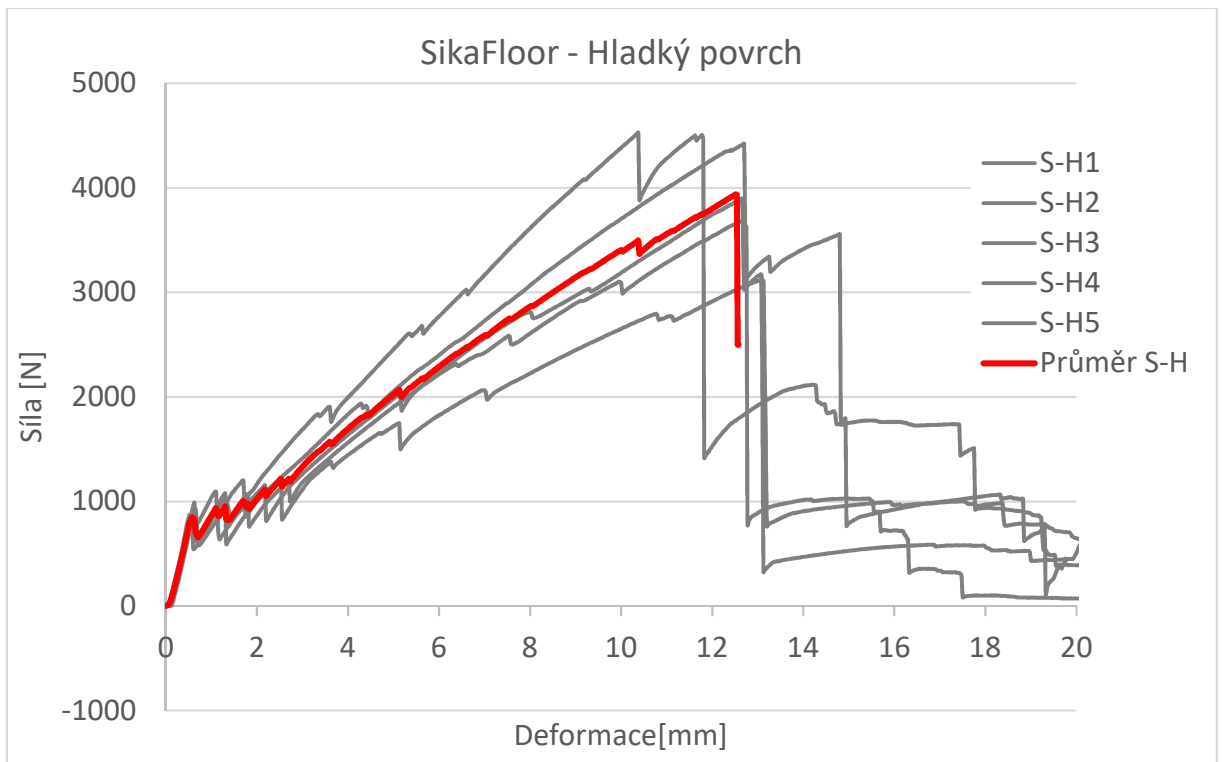


Obr. 26 – Vzorek při destruktivní zkoušce čtyřbodovým ohybem (foto: Žalský)

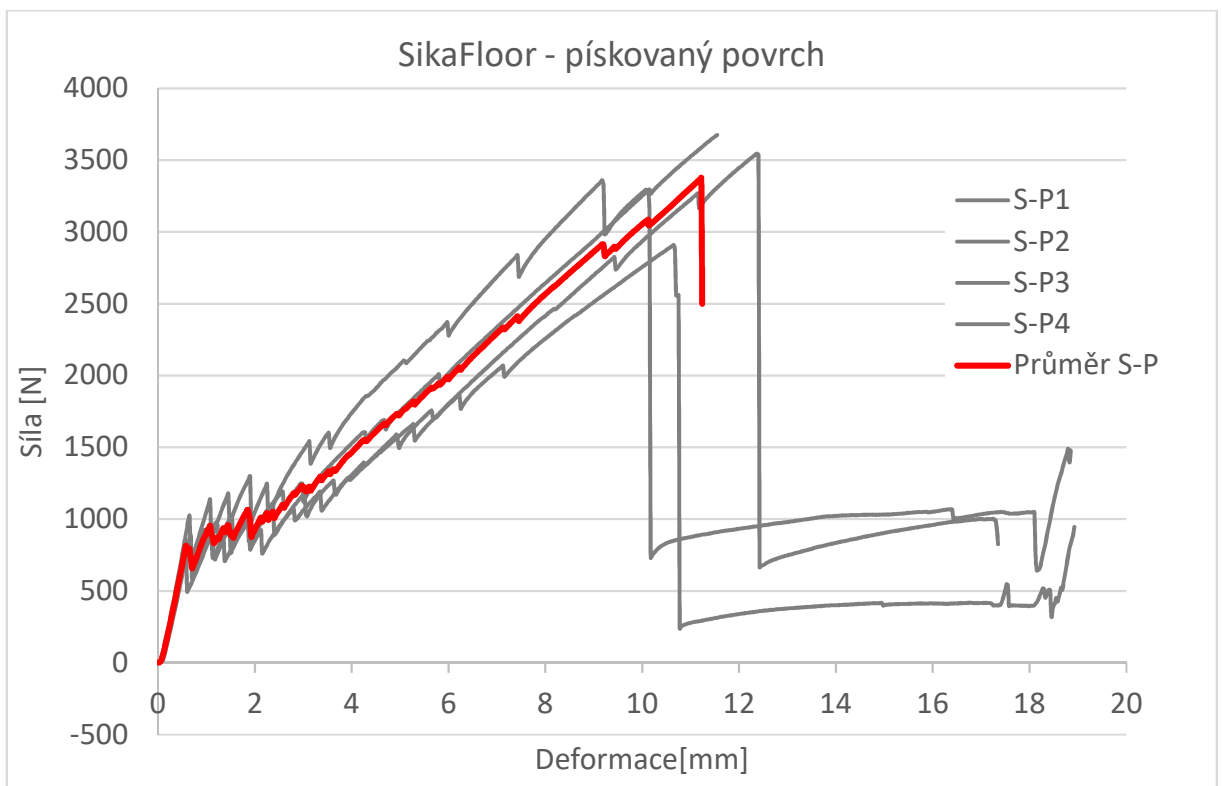


Obr. 27 – Konečná deformace vzorku (zlomená destička se opírá o podložku) (foto: Žalský)

Během zatěžování probíhal kontinuální záznam deformace způsobené lisem v závislosti na odpovídající reakci vzorku. Průběhy jednotlivých zkoušek jsou znázorněny na obrázcích Obr. 28 a Obr. 29.

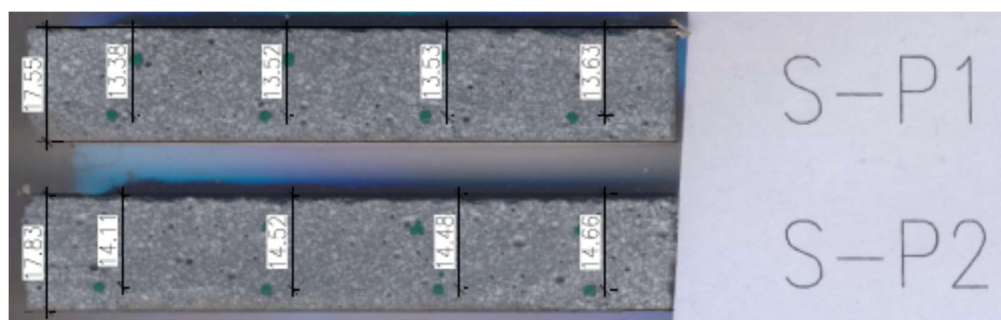


Obr. 28 - Průběh zatěžovací zkoušky vzorků čtyřbodovým ohybem s hladkou výztuží



Obr. 29 – Průběh zatěžovací zkoušky vzorků čtyřbodovým ohybem s opískovanou výztuží

Pro určení tahové pevnosti uhlíkových rovingů ze zkoušky čtyřbodovým ohybem, je nutné co nejpřesněji určit rameno vnitřních sil. Toho bylo dosaženo pomocí scanneru a programu AutoCAD. Nejprve se provedl řez nosníku kotoučovou pilou, poté pro zvýraznění byly označeny viditelné konce rovingů a takto připravené části se vložily do scanneru. Po získání kvalitních obrázků, se v programu AutoCAD vykreslila průměrná tloušťka destiček a od ní se změřila vzdálenost os rovingů viz obr. 30. Dále byly hodnoty zprůměrovány a zapsány do tabulky jako  $d_{prům}$ . Nakonec se ze získaných údajů podle vzorce (6) vypočítala tahová pevnost rovingu  $f_r$  uvedená v tabulka 4.



Obr. 30 – sken řezu betonovou destičkou, kvůli zjištění velikosti ramene vnitřních sil

Ozn.	Vzorek č.	Rozměry [mm]				$A_{ohyb}$ [mm <sup>2</sup> ]	$F_{cf,max}$ [N]	$F_{cf,prům}$ [N]	$f_{cf,max}$ [Mpa]	$d_{prům}$ [mm]	$d_{prům}$ [mm]	$f_{r,prům}$ [Mpa]
		a	b	$c_{prům}$	$c_{prům}$							
1	S-P1	362	99,2	17,55	17,4	1741,0	3547,7	3374,7	34,83	13,52	13,85	3366,7
2	S-P2	361	101,3	17,83		1805,8	3363,5		31,34	14,44		
3	S-P3	360	100,8	16,68		1681,7	2908,4		31,10	13,20		
4	S-P4	361	99,9	17,63		1761,6	3679,4		35,54	14,26		
5	S-H1	359	100,2	18,27		1830,3	3900,6		35,00	15,03		
6	S-H2	361	100,6	17,93	19,1	1804,1	3120,9	3934,8	28,94	14,63	15,67	3461,9
7	S-H3	363	101,5	19,10		1938,7	4424,7		35,85	16,31		
8	S-H4	363	94,5	21,20		2003,4	4536,0		32,04	17,77		
9	S-H5	363	103,9	19,10		1984,5	3692,0		29,22	14,63		

Tabulka 4 – výsledek ohybové zkoušky.  $f_r$  – pevnost v tahu uhlíkového rovingu

#### 4.4 Pevnost v tahu uhlíkového rovingu (jednoosá zkouška)

Druhou zkouškou tahové pevnosti uhlíkových rovingů je jednoosá tahová zkouška. Celkem bylo otestováno třináct vzorků, šest s hladkým povrchem a sedm s opískovanou povrchovou úpravou. Zatěžování probíhalo rychlostí 0,5mm/min s pauzou na ustálení napětí na hodnotách zatěžovací síly 20, 250, 500 a 1000 N. Při měření se zaznamenávala tahová síla působící na vzorek zároveň s časem a souběžně byl spuštěn externí potenciometr umístěn uprostřed zkoušeného rovingu, který pomocí změny elektrického napětí měřil deformaci. Data se následně pomocí časové osy porovnávala

a dohromady a vypočítala se pevnost rovingu v tahu dle vztahu (3) a modul pružnosti dle vztahu č. (4).

Vzorek	$m_c$	$l_c$	$m_f$	$m_e$	$A_r$	$A_e$	$A_c$
	[g]	[mm]	[g]	[g]	[mm <sup>2</sup> ]	[mm <sup>2</sup> ]	[mm <sup>2</sup> ]
Sikafloor	8,105	1867,5	2,988	5,117	0,9040	2,490933	3,3949

Tabulka 5 – Základní materiálové charakteristiky,  $A_r$  – plocha uhlíkových vláken bez pryskyřice [mm<sup>2</sup>],  $A_e$  – plocha epoxidové pryskyřice v průřezu [mm<sup>2</sup>],

$A_c$  – celková plocha [mm<sup>2</sup>]

V tabulce číslo Tabulka 5 je znázorněn přepočtený průřezové plochy s epoxidovou pryskyřicí. Vzorky byly zváženy a změřeny, aby se pomocí odečtu známého objemu uhlíkových vláken vypočítal objem epoxidové pryskyřice spojující vlákna. Z této průřezové plochy byly následně počítány napětí a poměrný modul pružnosti.

Vzorek	$F_{max}$	$F_{max,pr.}$	$\sigma_r$	$\sigma_{r,prům}$	$\sigma_c$	$\sigma_{c,prům}$	$l_0$	R	$\Delta l$	$\varepsilon_c$	$\varepsilon_{c,prům}$	$E_r$	$E_{r,prům}$	$E_c$	$E_{c,prům}$
	[N]	[N]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[mm]	[V]	[mm]	[-]	[-]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
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	

Tabulka 6 – výsledné hodnoty měření tahové zkoušky

V porovnání s teoretickými hodnotami se výsledky blíží ideálnímu stavu. Oproti teoretickému modulu pružnosti 240 GPa jsme výpočtem získali 246,5 a 266,7 GPa, což je s odchylkou 10% velice uspokojivý výsledek. Teoretické pevnosti v tahu 4400 MPa nebylo dosaženo, vznikla odchylka cca 20%. Vezmeme-li však v potaz vliv nerovnoměrné impregnace, excentricitu při zatěžování, porušení části vláken při manipulaci, nebo poškození při upevňování potenciometru, je výsledek uspokojivý. Největším problémem bylo nedostatečné prosycení pryskyřicí a roving nespolehlivě jako celek. V průběhu zatěžování viditelně praskaly jednotlivá vlákna viz obr. 31 a tím se snižovala maximální únosnost.





Obr. 31 – Chybné spolupůsobení uhlíkových vláken (foto: Žalský)

## 4.5 Soudržnost rovingu s betonem

Laboratorní testy byly provedeny ve výzkumném centru ČVUT v Dejvicích na přístroji LabTest 4.100-SP1. Vzorky byly upevněny do trhacího zařízení pomocí speciálních ocelových nástavců viditelných na obr. 22 a byly zatěžovány rychlostí 1 mm/min. Zatěžovací zařízení zaznamenávalo aplikovanou sílu na vzorek a příslušnou deformaci. Souběžně byl zaznamenáván pohyb rovingu potenciometrem umístěným na opačné straně betonové destičky, než byla aplikována trhací síla viz obr. 22. V grafu zobrazeném na obr. 32 je znázorněn průběh zatěžování vzorků s hladkou výztuží, na kterém není viditelná počáteční soudržnost. Už od počátku narůstá určitá deformace způsobená protažením rovingu, prokluzem v upínacích kleštích atd. Skutečný prokluz je zobrazen v grafu na obr. 33 kde jsou porovnaná data z potenciometru a z trhacího zařízení. Z grafu je patrná síla, potřebná na uvolnění rovingu z betonu a další průběh nárůstu síly vlivem tření a hmoždinkovému efektu vznikajícího v kontaktu rovingu s betonem.

Během zkoušky došlo k řadě komplikací, proto nejsou uvedeny výsledky vzorků S-P-1 a S-P-4, dle statistických pravidel jsou však tři vzorky postačující, a tak byla zkouška vyhodnocena jako úspěšná. Průběhy sil ze zkoušky můžete vidět na obr. 34. Vzorky s hladkou povrchovou úpravou byly odzkoušeny všechny úspěšně, S-H-1 měl však nepochopitelně malý průběh a S-H-3 naopak převyšující průběh. Proto byly z vyhodnocení vyřazeny a výpočty byly provedeny ze zbylých třech vzorků zobrazených v grafu na obr. 32.

Pro vyhodnocení jsou důležité dva momenty. První, kdy dojde k prokluzu rovingu v betonu a druhý kdy zatěžování dosáhne vrcholu. Ze síly na vrcholu

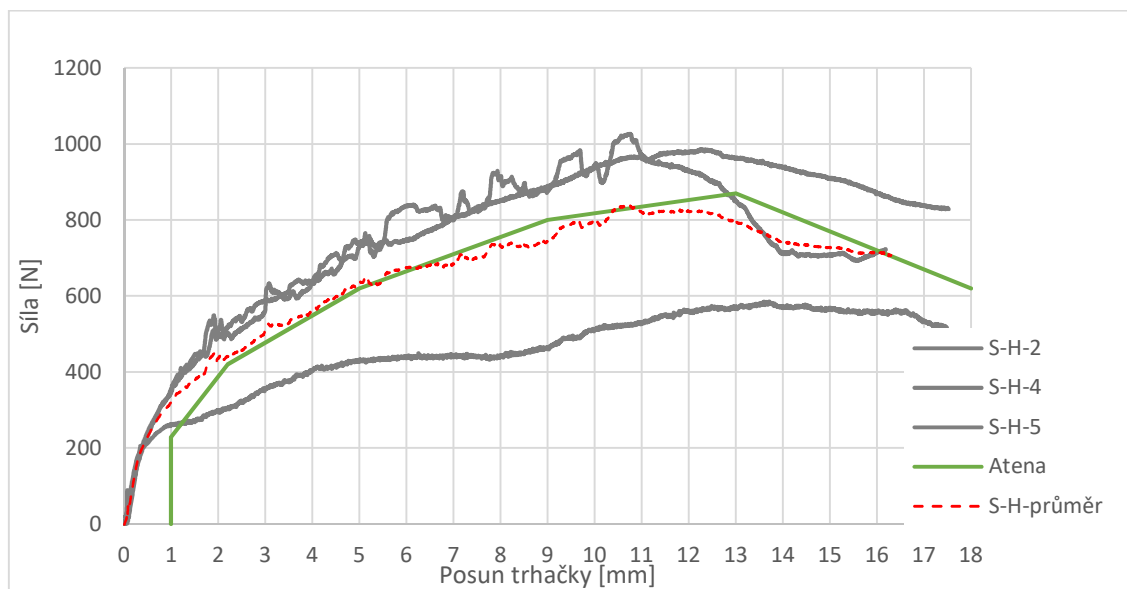


zatěžování se vypočítá smykové napětí kontaktní plochy dle vzorce č. (2) v poměru k celkovému obvodu rovingu na povrchu pryskyřice. Pro vytvoření numerického modelu v Atena Science je zapotřebí šesti bodů k vytvoření charakteristického průběhu prokluzu. Proto byla vytvořena průměrná křivka zobrazená na obr. 32 s názvem „ATENA“ charakterizována hodnotami uvedenými v tabulka 7.

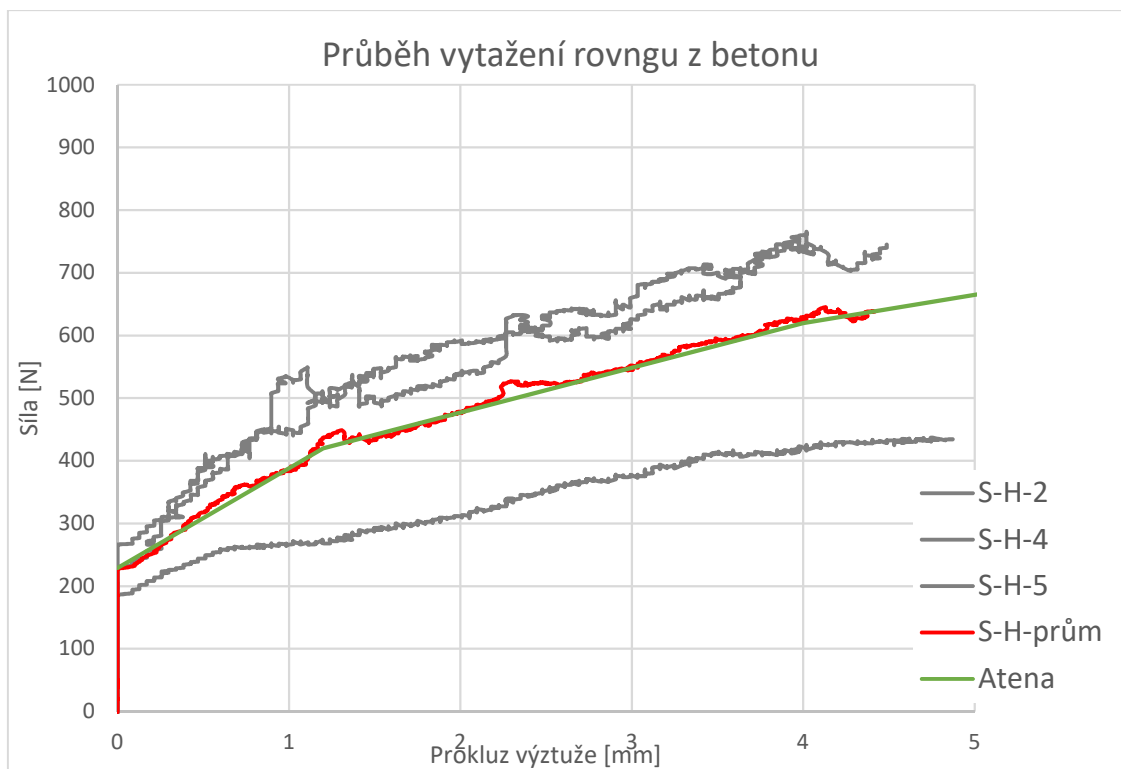
Při testu vzorků s opískovanou povrchovou úpravou nedocházelo díky větší soudržnosti k průběžnému prokluzu, ale došlo k náhlému porušení soudržnosti na vrcholu zatěžování. Z toho důvodu nemáme záznam z potenciometru. Potenciometr začal vykazovat změnu napětí až v momentě zbytkového tření. Proto byla hodnota maximální soudržnosti uvažována v numerickém modelu jako počáteční. Průběh zatěžování je zobrazen na obr. 34.

Prokluz [mm]	0	1,2	4	8	12	17
Síla [N]	228,9	420,0	620,0	800,0	871,0	620,0

Tabulka 7 – Hodnoty určující průběh prokluzu v modelu



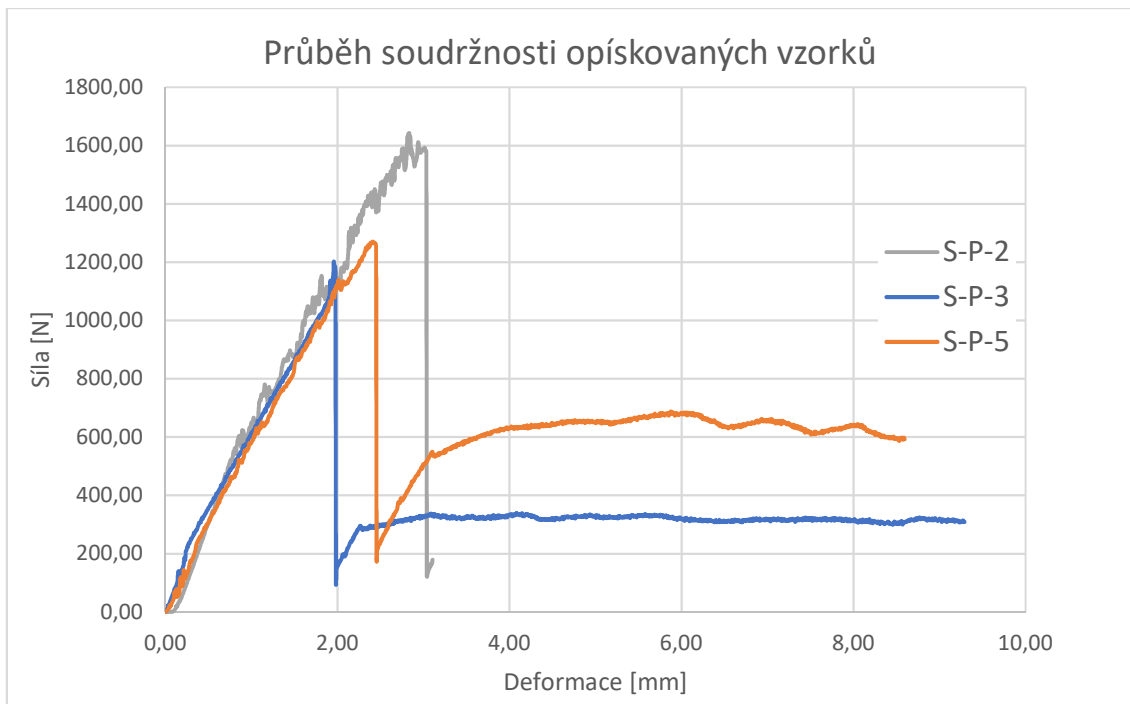
Obr. 32 – Průběh zatěžovací zkoušky hladké výztuže. Porovnání experimentu (šedivou), průměrného průběhu (červenou) a křivky zadané do Atény Science



Obr. 33 – Průběh sil při zkoušce soudržnosti s betonem v porovnání s prokluzem výztuže betonem

Vzorek	$h_{pl.}$	$A_{pl.}$	$F_{max}$	$F_{max,pr.}$	$\sigma_c$	$\sigma_{c,prům.}$	$\tau_c$	$\tau_{c,prům.}$
	[mm]	[mm <sup>2</sup> ]	[N]	[N]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
S-H1	14,96	97,7	102,86	871	30,29988	256	1,05273	8,5
S-H2	15,07	98,4	969,46		285,5644		9,849148	
S-H3	16,63	108,6	1667,36		491,1372		15,35035	
S-H4	14,09	92,0	586,68		172,8137		6,374923	
S-H5	16,33	106,7	1026,97		302,5053		9,628412	
S-P1	15,01	98,0	-	1378	-	406	-	12,8
S-P2	16,03	104,7	1645,48		484,6922		15,71594	
S-P3	17,3	113,0	1213,54		357,4609		10,73965	
S-P4	0	0,0	-		-		-	
S-P5	16,4	107,1	1274,82		375,5105		11,90107	

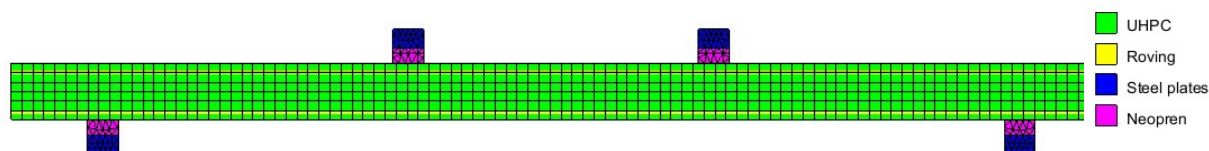
Tabulka 8 – Vyhodnocení smykového napětí mezi betonem a výztuží.  $\tau_c$  – smykové napětí v kontaktu s betonem [MPa]



Obr. 34 – Data z trhačímho zařízení při zkoušce soudržnosti opískované výztuže

## 5 Numerická analýza

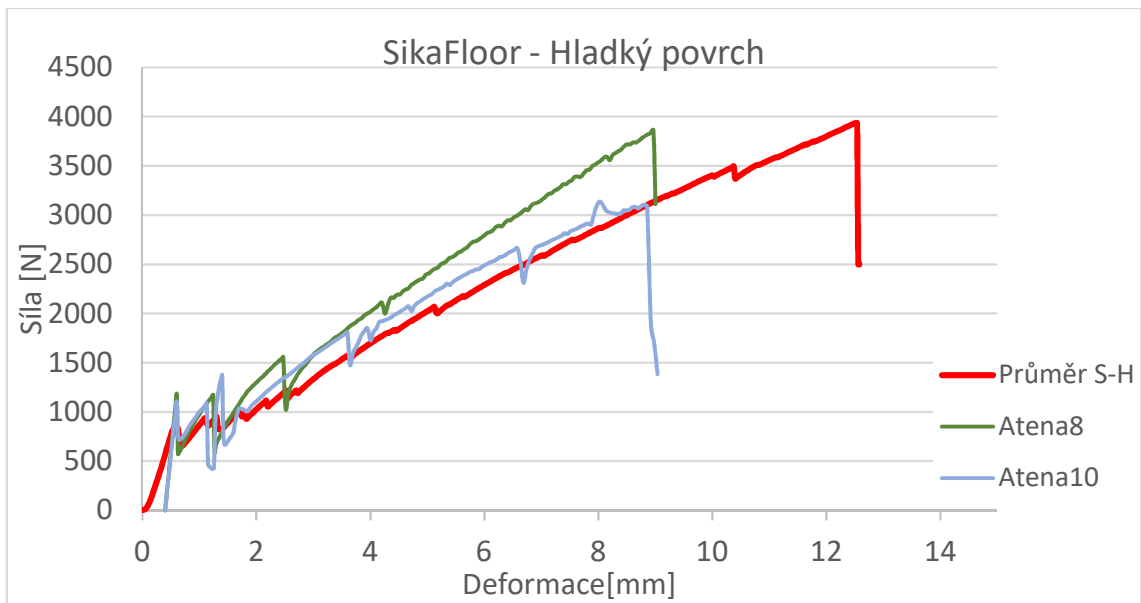
Numerická analýza byla provedena v softwaru Atena Science GiD. Nejprve bylo nutné zkalibrovat hodnoty vlastností materiálu naměřených při laboratorních testech a následně byly vytvořeny varianty rámového rohu. Pro kalibraci, jak již bylo zmíněno v kapitole 2.7.4, byl použit model čtyřbodového ohybu, který bylo nutné vymodelovat tak, aby se co nejlíže podobal skutečnému testu. Pro kalibraci modelu S-H byl vymodelován prostý nosník ve 2D, s rozměry 360x19 mm a tloušťka byla přiřazena v parametrech materiálu 100 mm. Nosník byl zatížen deformací na roznášecí ocelové destičky podložené pryžovou podložkou s modulem pružnosti  $E=2$  GPa, aby nevznikaly nechtěné trhliny, jak bylo popsáno v kapitole 2.6. Pro výpočet byla vytvořena kvadratická síť konečných prvků tvaru čtyřúhelníku dělících nosník po výšce na 6 částí a s poměrem stran maximálně 1:2 viz obr. 35.



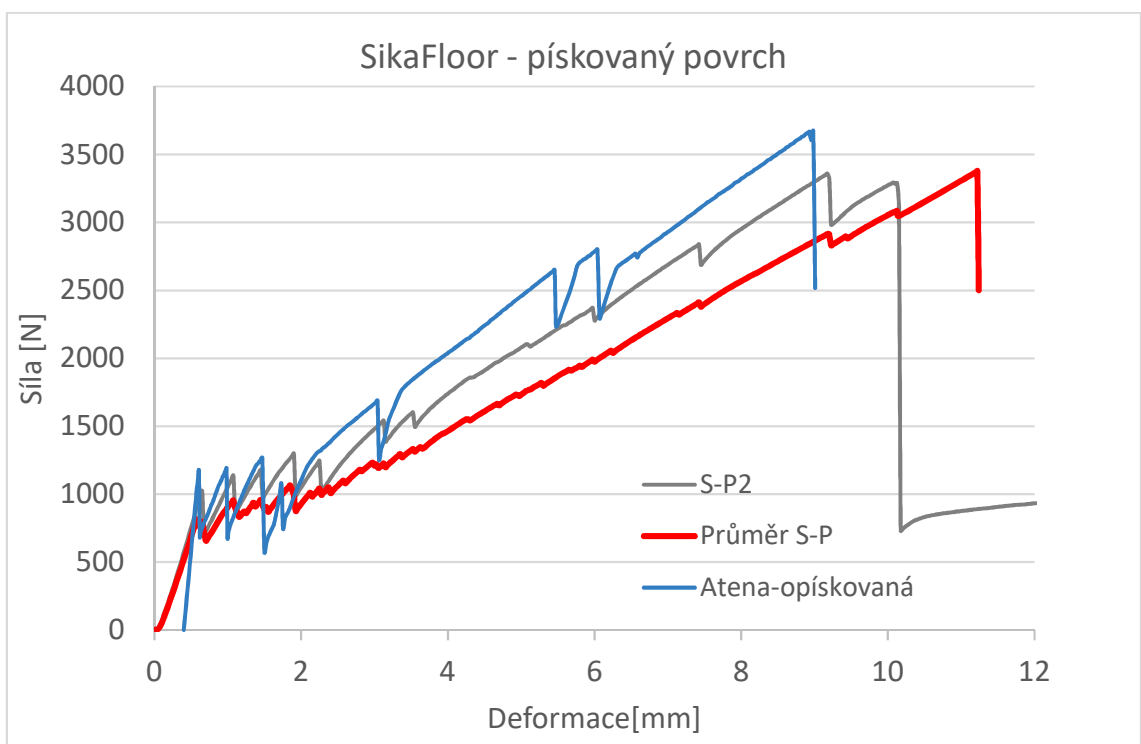
Obr. 35 – Model v preprocesoru GiD se zobrazenou sítí konečných prvků a materiály

### 5.1 Kalibrace materiálu

Pro kalibraci materiálu byla vytvořena řada modelů, která byla postupně vypočítána a výsledné L-D diagramy (Load-Displacement) byly porovnány s laboratorními testy. Materiálové parametry získané z experimentů se neměnily, pouze se upravovaly ostatní neznámé vlastnosti, mezi které patří např.: lomová energie  $G_f$ , kritické přetvoření betonu  $W_d$ , a další nezměřené parametry. Dále byla postupně upravována jemnost sítě a jemnost kroku (rychlost zatěžování).



Obr. 36 – Porovnání dvou vybraných křivek z kalibrace s průměrnou křivkou z experimentů

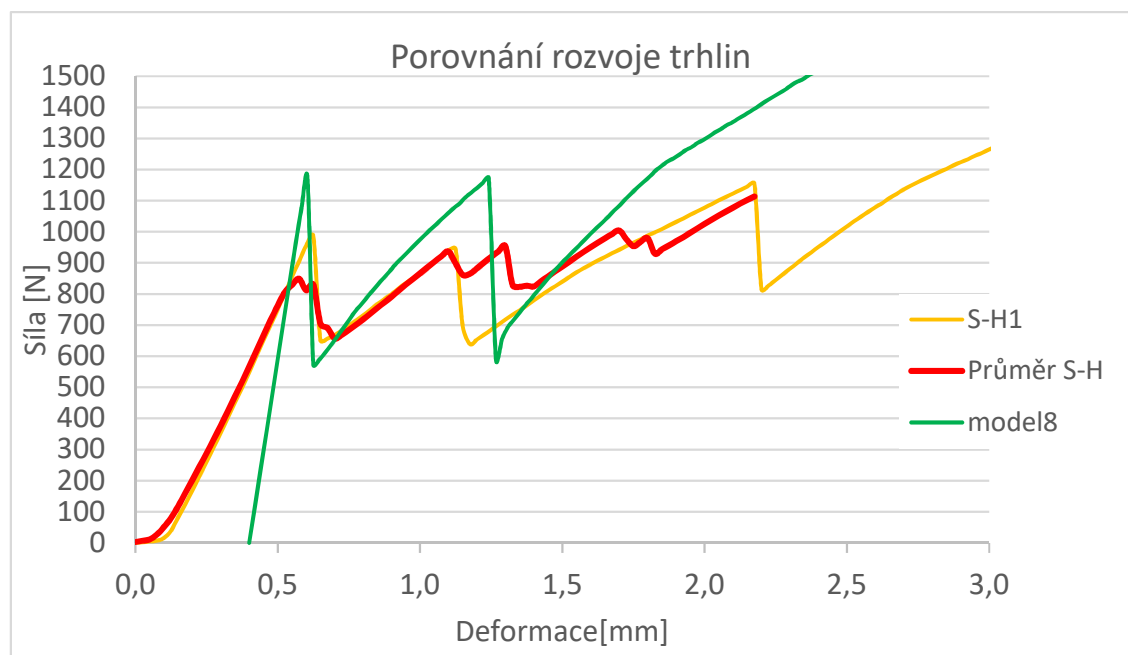


Obr. 37 – Porovnání jednoho z testovaných vzorků s průměrnou křivkou a s výpočtem ze softwaru Atena Science

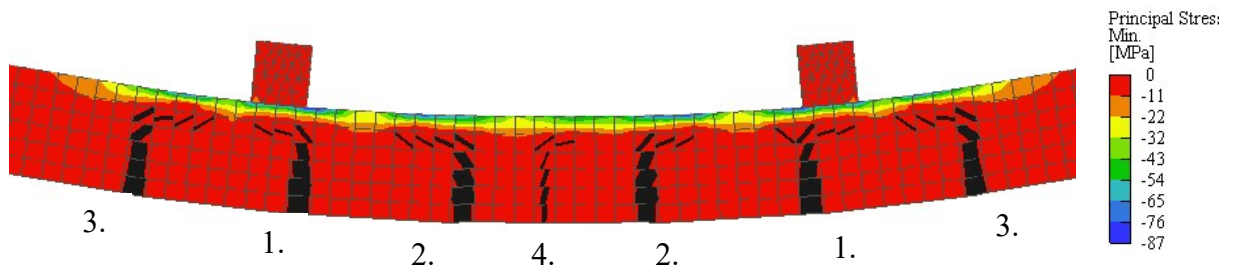
Při počátku zatěžování vznikají určité nepřesnosti. V teoretickém modelu není uvažována žádná excentricita zatěžování. Při reálném zatěžování může docházet k nepřesnému uložení zatěžovacích válečků a tím dochází k předběžnému rozvoji trhlin.

To je viditelné v grafu na obr. 38, kdy křivka stoupá pod jiným úhlem než v experimentu. Po rozvoji první trhliny se konstrukce začíná chovat stejně tuze jako v realitě. Proto byly křivky z Atény posunuty, tak aby první trhliny vznikaly při stejné deformaci. Další odchylka v místě první trhliny vznikla právě vytvořením průměru z hodnot odpovídajícím stejné deformaci. Protože vznik první trhliny nenastal pokaždé při stejné deformaci, hodnota v grafu je menší.

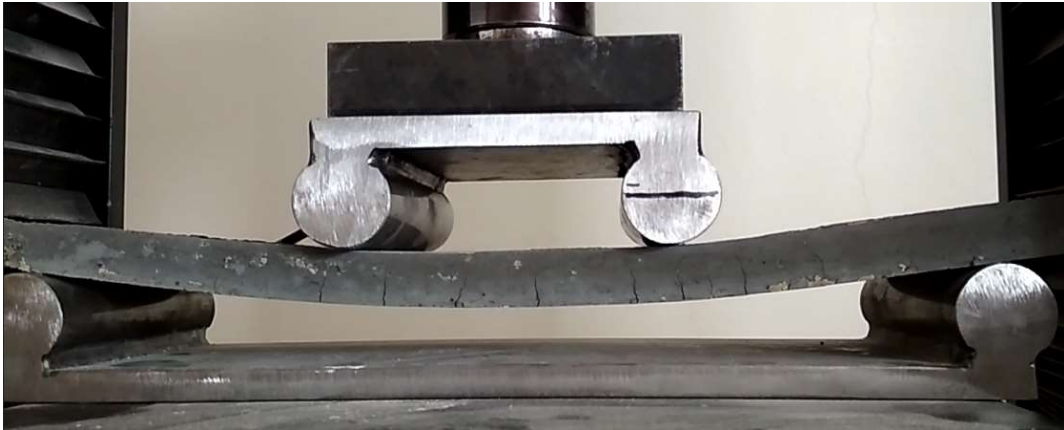
Porovnání rozvoje trhlin je možné vidět na obrázcích obr. 39 a Obr. 40. Rozvoj trhlin je velice podobný a charakteristické trhliny vznikají na správných místech. Protože numerický model byl zatěžován rovnoměrně a symetricky, trhliny vznikají po dvojicích. Nejprve dojde k vytvoření trhlin pod podporou, následně ve střední části nosníku, třetí dvojice vzniká vně podpor a poslední trhlina vzniká uprostřed nosníku viz obr. 39. Podrobnější chování kalibračního modelu v příloze č. 1-3.



Obr. 38 – Porovnání rozvoje prvních trhlin vzorků s hladkou výztuží. Žlutá křivka znázorňuje jeden ze zkoušených vzorků, červená průměrný průběh a zelená křivku z Atena Science.



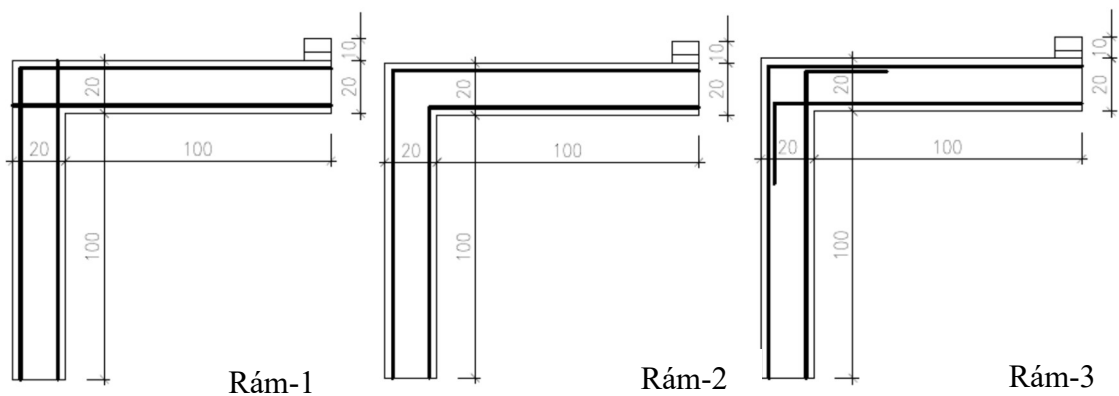
Obr. 39 – Postup rozvoje trhlin v kalibračním modelu s hladkou výztuží.



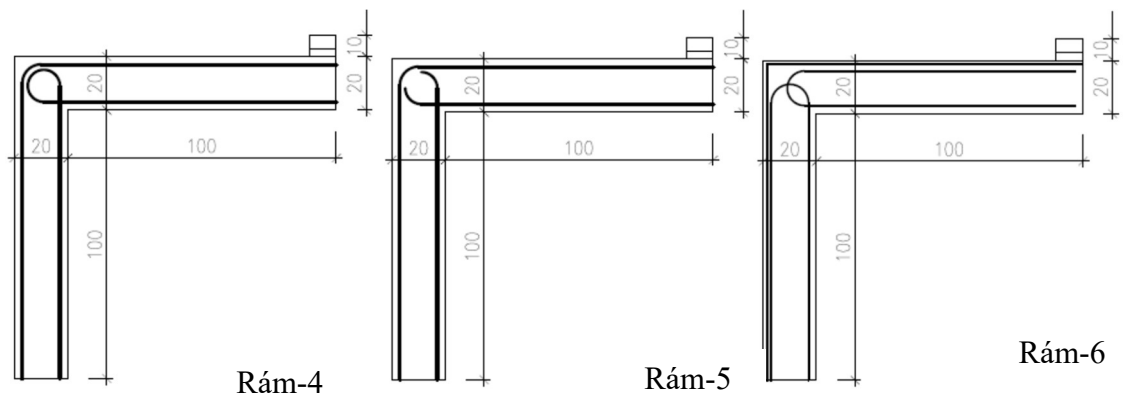
Obr. 40 – Trhliny na zatěžované destičce.

## 5.2 Příklady vyztužení rámového rohu

Pro analýzu rámového rohu bylo namodelováno šest různě vyztužených konstrukcí označených Rám-1 až Rám-6. Jednotlivé modely se liší pouze ve tvaru zakotvení výztuže. Materiálové parametry a okrajové podmínky jsou vždy totožné.



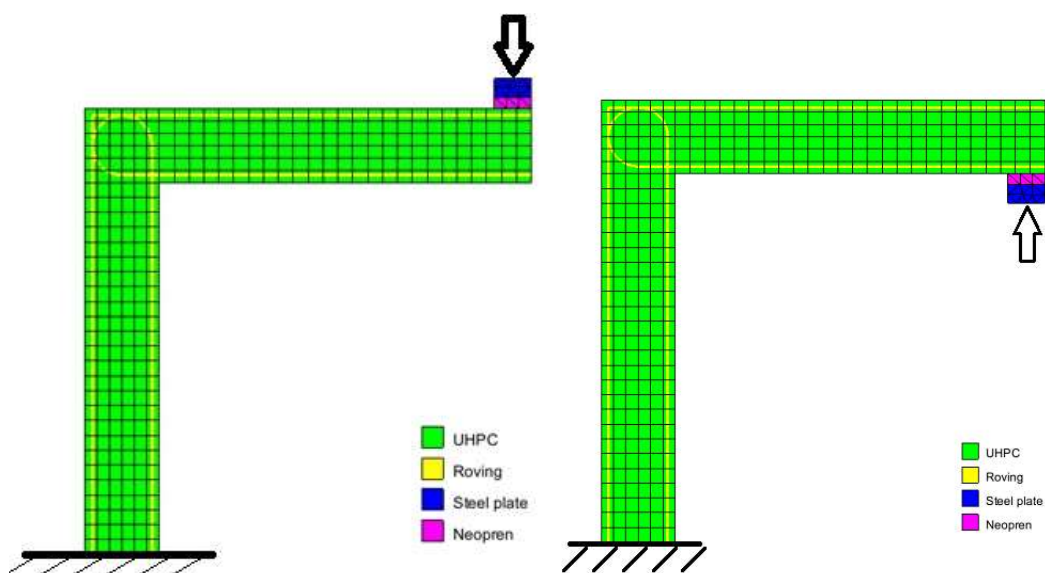
Obr. 41a - Příklady vyztužení rohů. Liší se pouze v zakotvení rovingu



Obr. 41b – Příklady vyztužení rohů. Liší se pouze v zakotvení rovingu

### 5.3 Model rámového rohu

Model rámového rohu byl vytvořen podle charakteristiky nejvíce odpovídajícího kalibračního modelu „ohyb8“. Byly zkalibrovány charakteristiky materiálu, které se použili pro následné posouzení rámových rohů. Rozměry modelu jsou popsány na obr. 41 a tloušťka byla nastavena na 100 mm. Na šířce 20 mm bylo nastaveno dělení na 6 kvadratických prvků s poměrem stran maximálně 2:1. Podpora na svislé stojně rámu je pevně vetknutá k podložce (zabraňuje posunům a natočení ve všech směrech), aby nedošlo k překlopení. Rám je zatížen osamnělou silou na ocelovou roznášecí destičku, podloženou pružnou podložkou. Materiály byly nastaveny dle výsledku kalibrace viz příloha č. 1. Pro všechny typy vyztužení byly provedeny výpočty ve dvou směrech viz obr. 42.



Obr. 42 – Příklad modelu rámového rohu podepřeného vetknutím a zatíženého osamělou silou

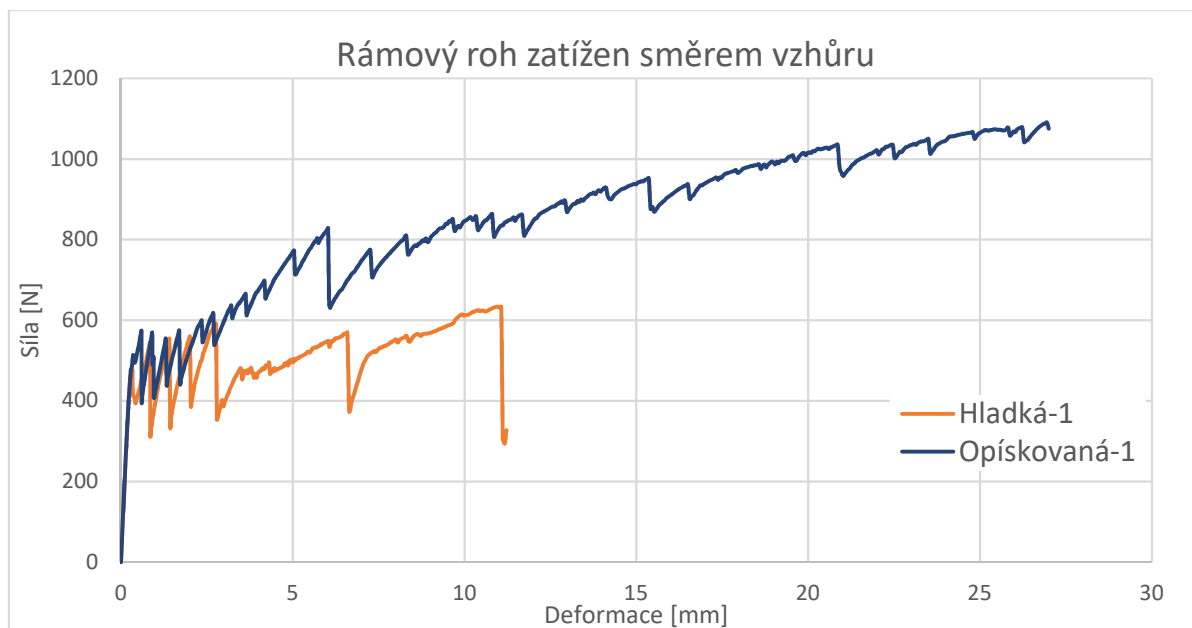


## 5.4 Analýza trhlin

Při zatěžování směrem dolů (rámový roh byl zavírán) docházelo k velice podobnému rozvoji trhlin u všech druhů vyztužení. Nejúnosnější byl „Rám-6“ a „Rám-5“ jak je možné vidět v grafu na obr. 44. V obou případech došlo ke kolapsu vlivem drcení betonu na tlačené straně a k velkému přetvoření výztuže v tažené oblasti. Vlivem přetvoření výztuže docházelo k velké deformaci a výraznému rozvoji trhlin. Na tažené straně vznikaly trhliny šířky 0,5-3 mm. Detailnější rozbor kolapsů najdete v příloze č. 5.

Při zatěžování směrem vzhůru (rám byl rozevírán), docházelo k větším rozdílům v porušení. První trhlina sice vždy vznikala ve vnitřním rohu, ale následný rozvoj trhlin se lišil. V rámu 1, se vytvořily tři trhliny na svislé části a došlo k vytažení vodorovné výztuže tím pádem ke ztrátě tuhosti rohu. V poslední fázi před kolapsem došlo k posunu výztuže téměř o 2 mm. V rámu 2, je výztuž dobře zakotvena, ale již v samotném počátku zatěžování dochází k vytržení výztuže z rohu a následnému kolapsu. Rám 3 působil ideálně. Výztuž byla dobře zakotvena, a po vzniku první trhliny nedovolila jejímu rozvoji. Kolaps nenastal v místě rohu, ale v patě uložení nosníku. To by mohlo být v další analýze opraveno jiným způsobem podepření, nebo zakomponováním do další konstrukce. Rám 4 působil v tomto směru nejlépe. První trhlina se podařilo zachytit, došlo k rozvoji trhlin a kolaps nastal vlivem překročení tlakové pevnosti betonu v horní části rámového rohu. Vyztužení rámu 5 bylo porušeno podobným způsobem jako rám 1, kdy došlo k vytahování výztuže z betonu. V posledním šestém případě působila ramena téměř jako dva celky spojené kloubem. Zatížení se po vytvoření první trhliny téměř přestalo přenášet do svislé stojiny a vytvořil se kloubový mechanismus.

Výpočty s opískovanými rovingy se chovali mnohem lépe. U rámu 1 a rámu 5, ve kterých docházelo k vytahování výztuže, v neopískované verzi, došlo k zachycení vnitřních sil a nastal rozvoj trhlin ve svislé části. Kolaps nakonec nastal porušením soudržnosti, ale rám umožnil přenos větší síly. Porovnání první varianty vyztužení můžete vidět v grafu na obr. 43. Vykreslení průběhu všech typů vyztužení najdete v příloze č. 5 a typické chování rámu v příloze č. 4.



Obr. 43 – Porovnání výsledků zatěžování vzorků s hladkou a opískovanou povrchovou úpravou.

## 6 Závěr

Cílem této práce bylo získání základních materiálových parametrů betonu a uhlíkové textilní výztuže. Kalibrace a validace získaných výsledků pro účel numerické analýzy chování betonového rámového rohu vyztuženého textilní výztuží a určit vhodnost tvaru uhlíkové výztuže.

Kalibrace modelu byla provedena na základě řady parametrických výpočtů. Výsledky vybraného modelu 8 velmi dobře korespondují s realizovanými experimenty. Odchylky vzniklé při výpočtu numerického modelu mohly být zapříčiněny velkým množstvím parametrů a při budoucí analýze by bylo možné výsledky dále zpřesňovat. Další vylepšení modelu by bylo možné po realizaci dalších doprovodných zkoušek, jako např.: přesnější zjištění modulu pružnosti betonu, nebo zkouška lomové energie. Pro naši analýzu byl důležitý hlavně počáteční rozvoj trhlin, který se podařilo zkalibrovat velice přesně.

Numerická analýza ukazuje na důležitost soudržnosti výztuže s betonem, a že opískovaná povrchová úprava je pro vytvoření rámového rohu vhodnější. S opískovanou úpravou není nutné rovingy kotvit příliš daleko, a i s malou kotevní délkou dokáží zamezit rozvoji trhlin. Proto tvar kotvení neměl na výsledek příliš velký vliv a průběhy zatěžování v numerické analýze probíhaly obdobně. Výpočty by bylo možné dále upravovat a zpřesňovat, ale pro základní charakteristiku byl náš výpočet dostatečný.

Výpočty ukázaly na nevhodnost krátce zakotvených výztuží s neopískovanou povrchovou úpravou jako např. v příkladu „rám-1 a rám-5“. Naopak kvalitně provedené ukotvení se zdá být varianta „rám-3“. S opískovanou povrchovou úpravou se výrazně změnilo chování varianty „rám-1“ a při zatěžování směrem vzhůru odolal největšímu zatížení.

V návaznosti na tuto bakalářskou práci bych se rád dále zabýval problematikou rámového rohu vyztuženého textiliemi. Bylo by třeba zpřesnit numerický model doplněním o další doprovodné zkoušky. Rád bych ověřil numerický model na laboratorních testech. Vytvořil bych vzorky odpovídající numerickému modelu, které by potvrdili jejich správnost a chování reálné konstrukce. Po ověření by mohlo dojít k aplikacím na reálných konstrukcích jako je lomenicové schodiště a další.

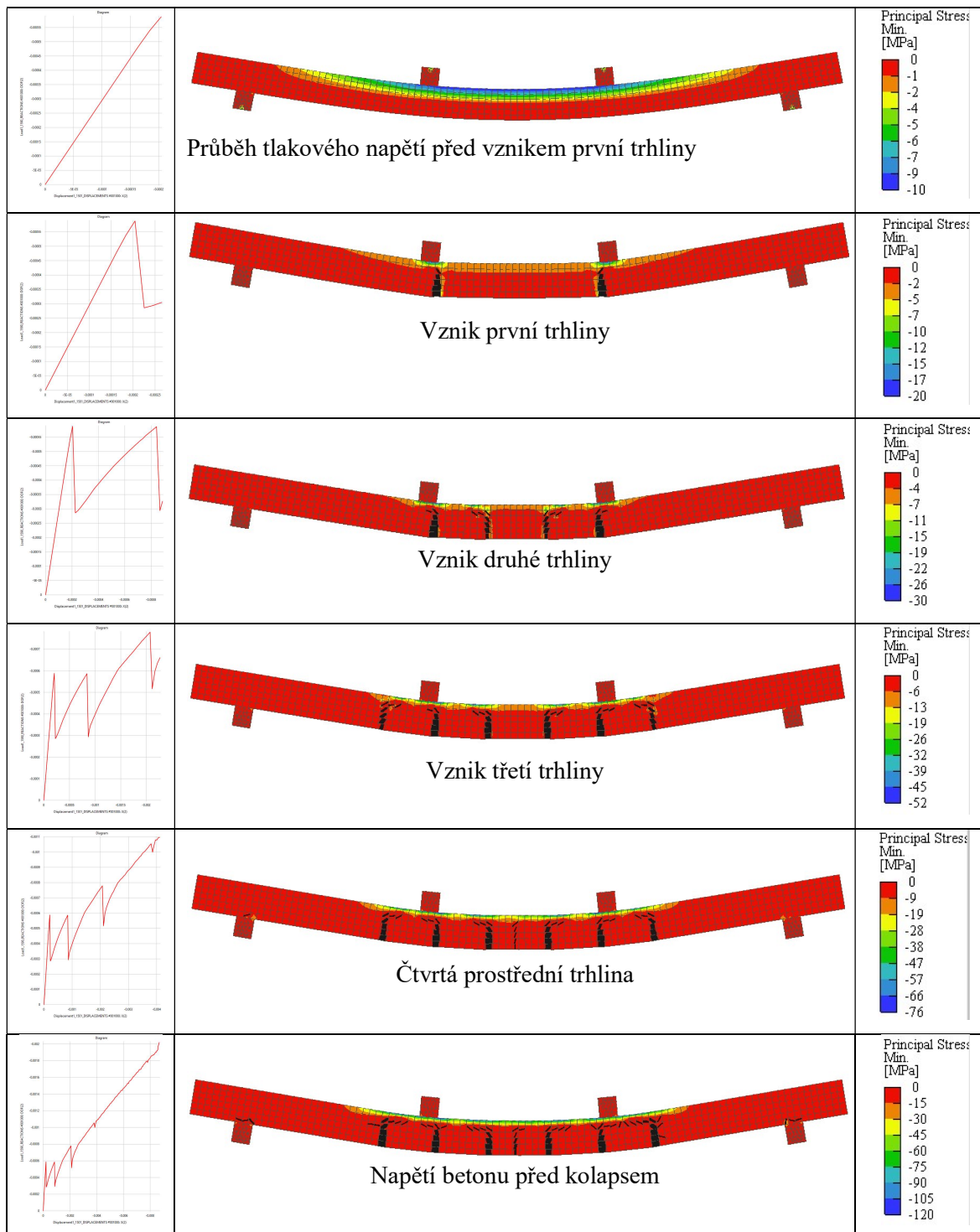
## 7 Reference

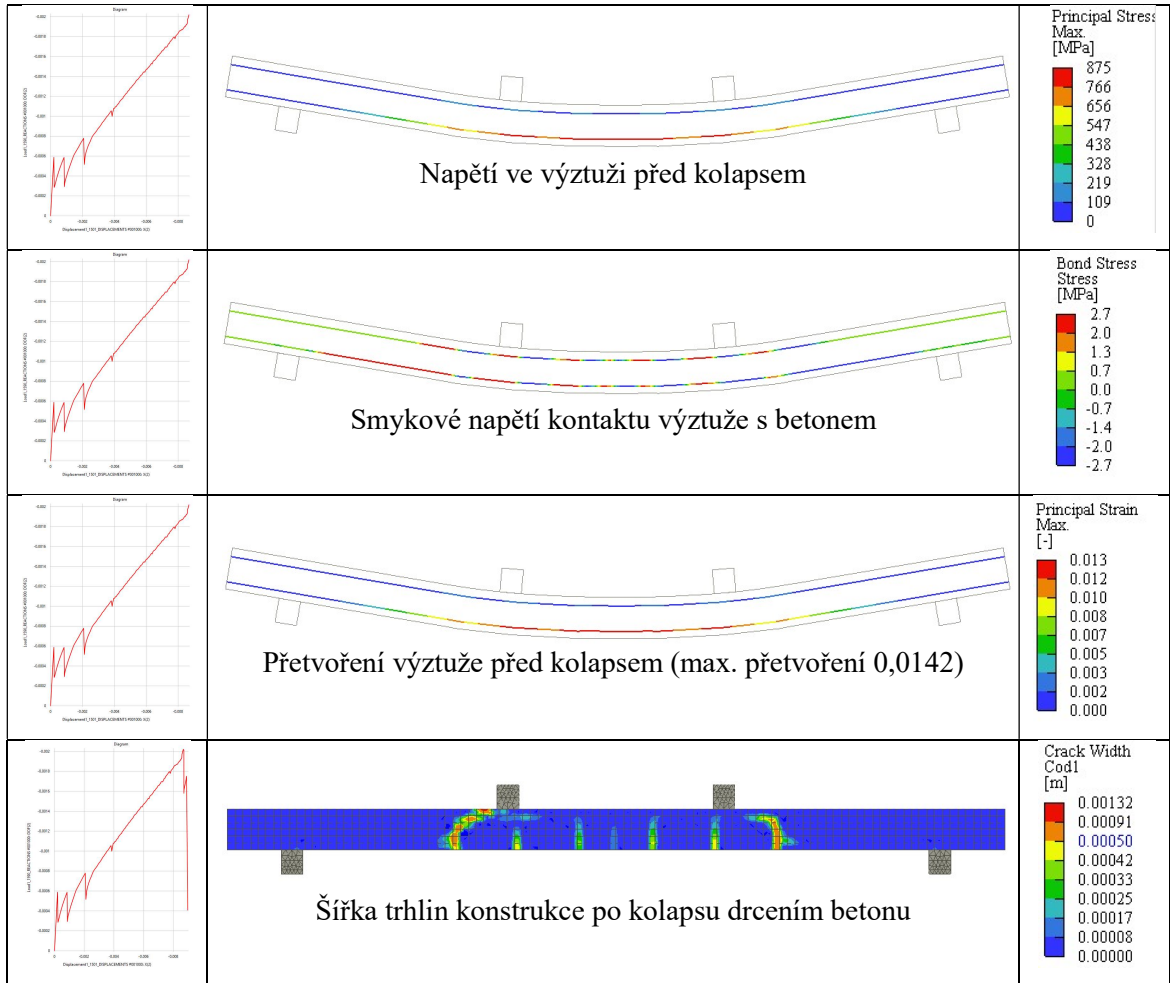
- [1] e-beton.cz, „www.e-beton.cz,“ 2018. [Online]. Available: <http://www.ebeton.cz/pojmy/historie-betonu>. [Přístup získán duben 2018].
- [2] W. Koch, *Evropská architektura*, Praha, 2008.
- [3] T. Gries, „Textiles (Report rep036 : Textile Reinforced Concrete - State-of-the-Art Report of RILEM TC 201-TRC),“ v *Textile Reinforced Concrete - State-of-the-Art Report of RILEM TC 201-TRC*, 2006.
- [4] A. Kochová, *Diplomová práce - Mechanické vlastnosti betonových desek vyztužených tkaninami*, Praha, 2016.
- [5] ČTK, „www.archiweb.cz,“ 7 červenec 2017. [Online]. Available: <https://www.archiweb.cz/n/home/pred-150-lety-si-francouz-monier-nechal-patentovat-zelezobeton>.
- [6] W. Brameshuber, „TC 201-TRC (Textile Reinforced Concrete),“ Září 2006.
- [7] J. Hegger, „Textile reinforced concrete under biaxial loading,“ *6th RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concrete*, 2004.
- [8] M. Krüger, „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*, pp. 151-164, 2002.
- [9] T. Vlach, L. Laiblová , K. Anuj a A. Chiara, „Textile-reinforced concrete facade panels with,“ *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 2015.
- [10] A. Oebbeke, „baulinks.de,“ 2009. [Online]. Available: <https://www.baulinks.de/webplugin/2009/1981.php4>. [Přístup získán 5 2018].
- [11] T. Lindner, „inews.groz-beckert.com,“ 2010. [Online]. Available: <https://inews.groz->

- beckert.com/en/getPrm/letter/n3\_textile\_reinforced\_concrete\_bridge/.
- [12] S. Gopinath, N. Iyer a R. Gettu, „Finite element analysis of RC beams strengthened with textile reinforced concrete,“ *Journal of Structural Engineering*, sv. 5, č. 43, pp. 454-460, 2016.
- [13] D. Pryl a J. Červenka, „ATENA Program Documentation Part 11 - Troubleshooting Manual,“ pp. 20-21, březen 2018.
- [14] T. Vlach, „Soft insert for support modeling of slightly textile reinforced concrete,“ Leden 2018.
- [15] D. Horák a P. Štěpánek, „Vývoj nekovových výztuží do betonu,“ Brno, 2009.
- [16] ČSN, ČSN 731328 - Stanovení soudržnosti oceli s betonem, Praha, 1972.
- [17] 4. ACI Committee, „440.3R-04: Guide Test Methods for Fiber-Reinforced,“ 2004.
- [18] B. Banholzer, BOND BEHAVIOUR OF A MULTI-FILAMENT YARN EMBEDDED, Aachen, 2004.
- [19] A. Chira, T. Vlach, L. Laiblová, C. Fiala a tým, *Comparison of different methods for determination of modulus of elasticity of composite reinforcement produced from roving*, Praha, 2014.
- [20] E. ČSN, ČSN EN 12390-5 (731302), Evropská komise pro normalizaci, 2009.
- [21] „Mechanické vlastnosti polymerů - statické namáhání,“ 2006. [Online]. Available: <https://publi.cz/books/180/09.html>. [Přístup získán 2018].
- [22] s. Sika CZ, „Sika.cz,“ 01 2014. [Online]. Available: <http://www.sika.cz>.
- [23] E. ČSN, ČSN EN 12390-3 (731302), Evropský výbor pro normalizaci, 2009.

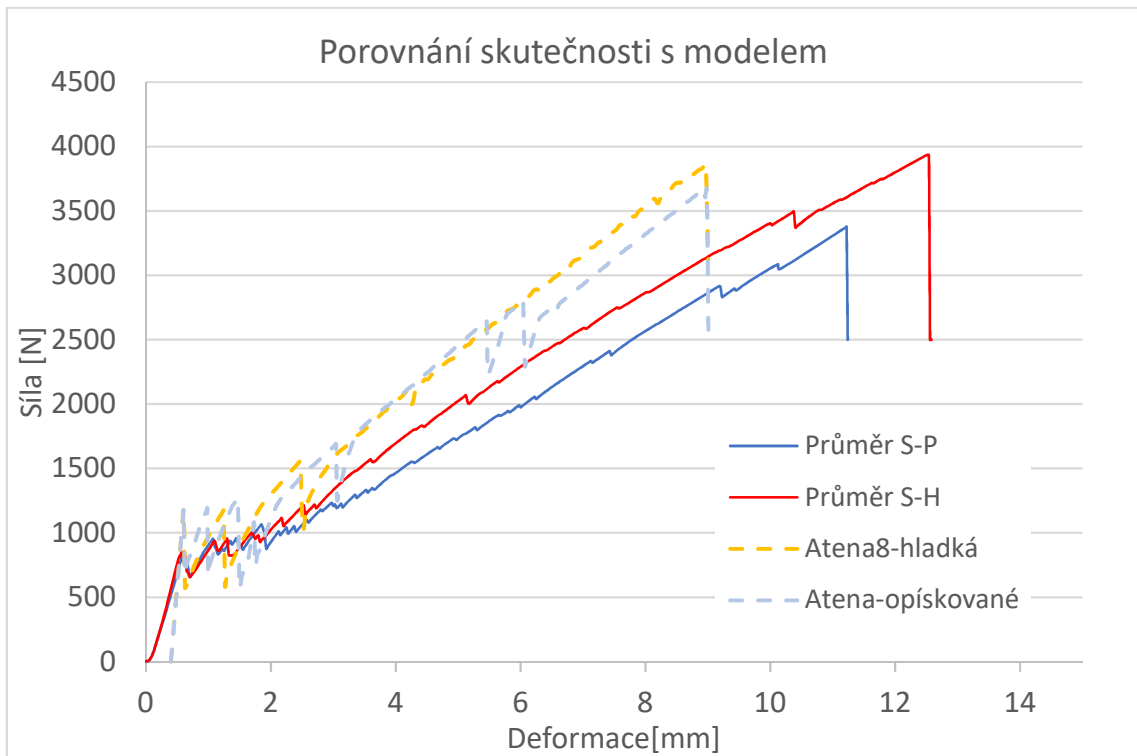
# 8 Přílohy

## Příloha č.1 -Rozvoj trhlin na kalibračním modelu

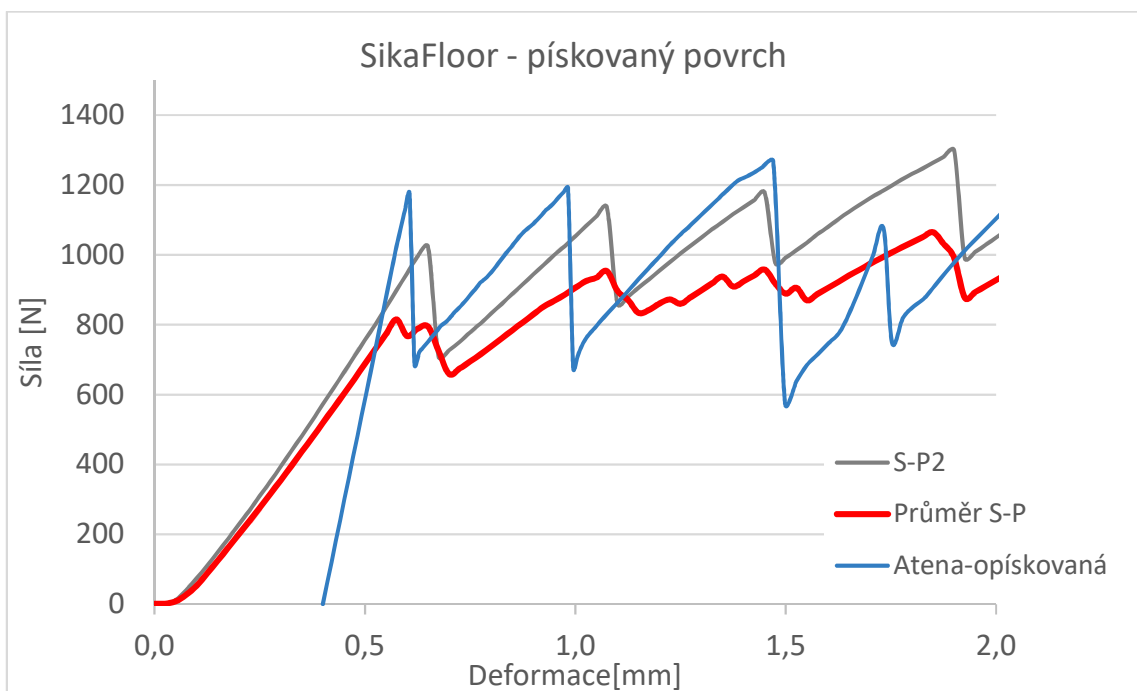




## Příloha č.2 – Porovnání experimentu se s kalibračním modelem



## Příloha č.3– Porovnání rozvoje trhlin opískovaných vzorků

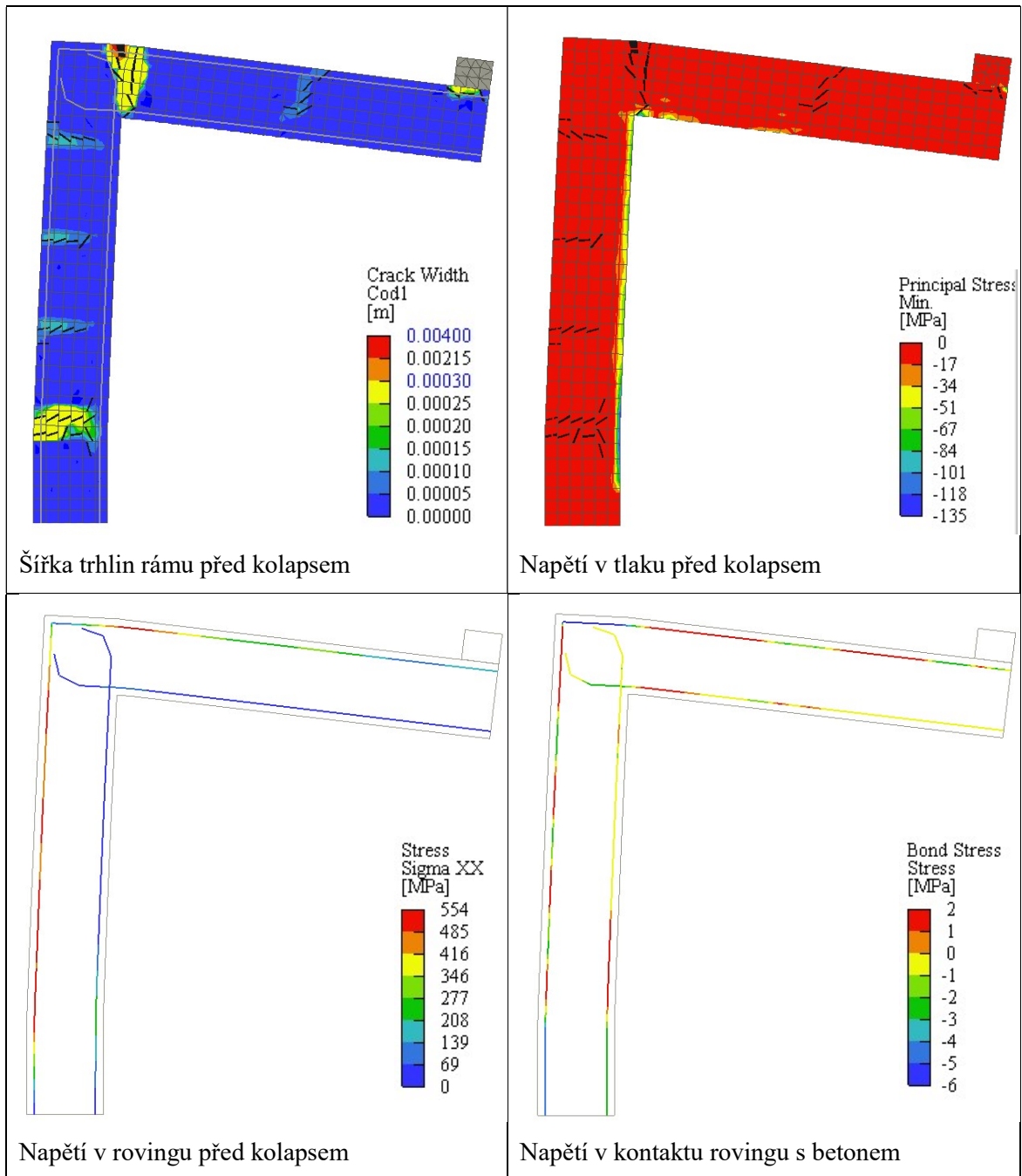


Porovnání rozvoje trhlin na destičkách zatěžovaných čtyřbodovým ohybem jednoho ze zkoušených vzorků, průměrná křivka všech opískovaných vzorků a kalibrační model z Ateny

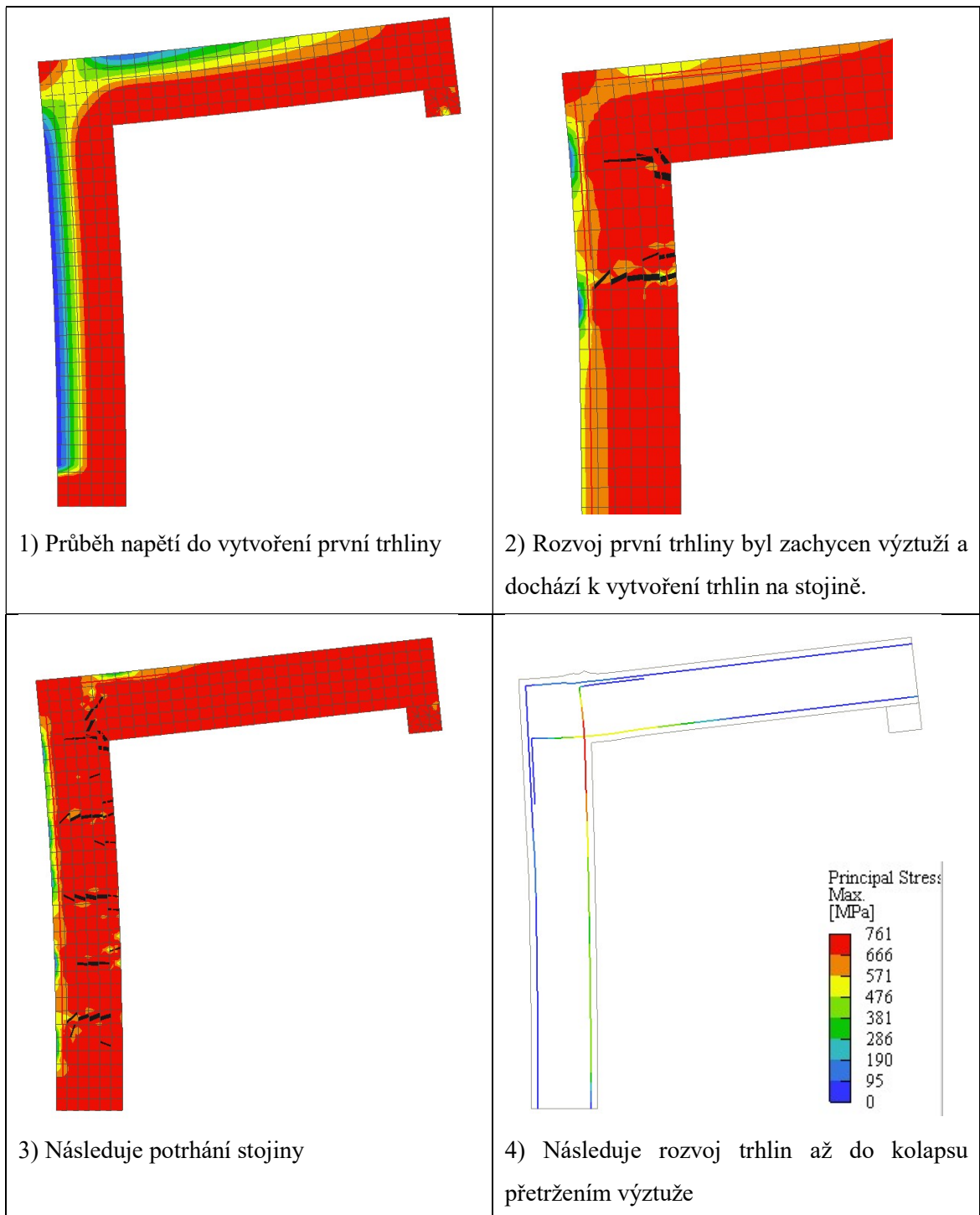


## Příloha č.4 – Charakteristika porušení a kolapsu rámu

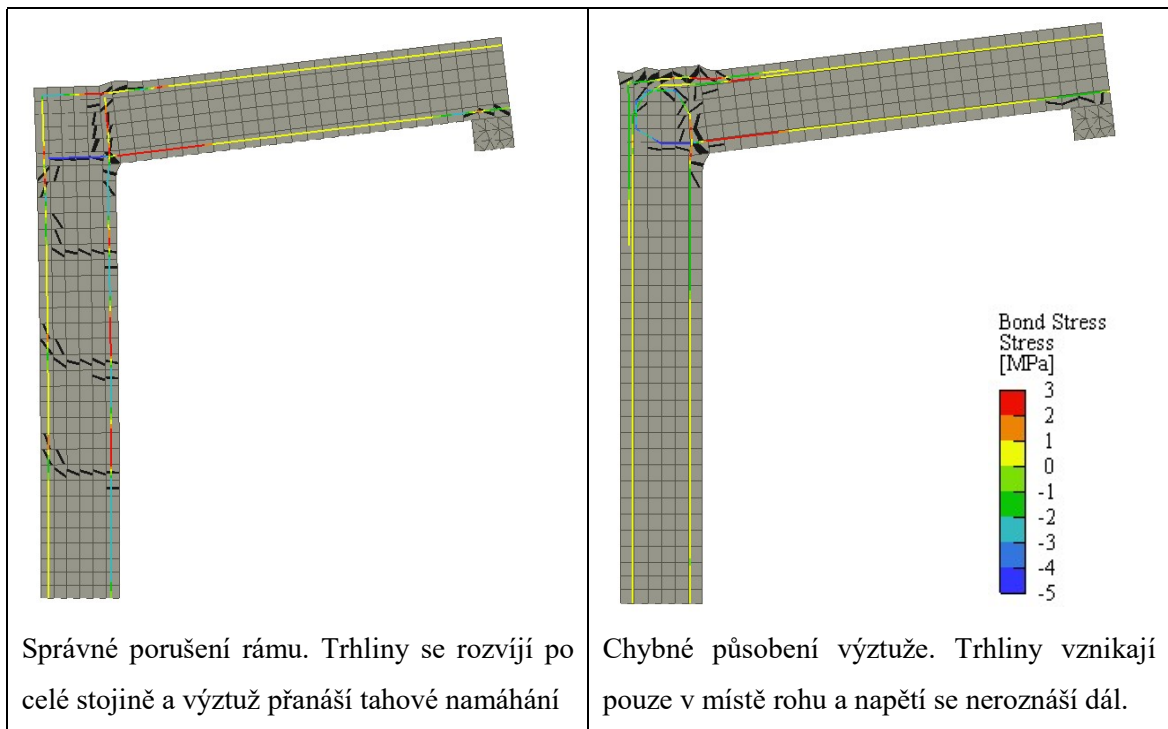
### Rám-5 – S hladkou výztuží - zavíraný



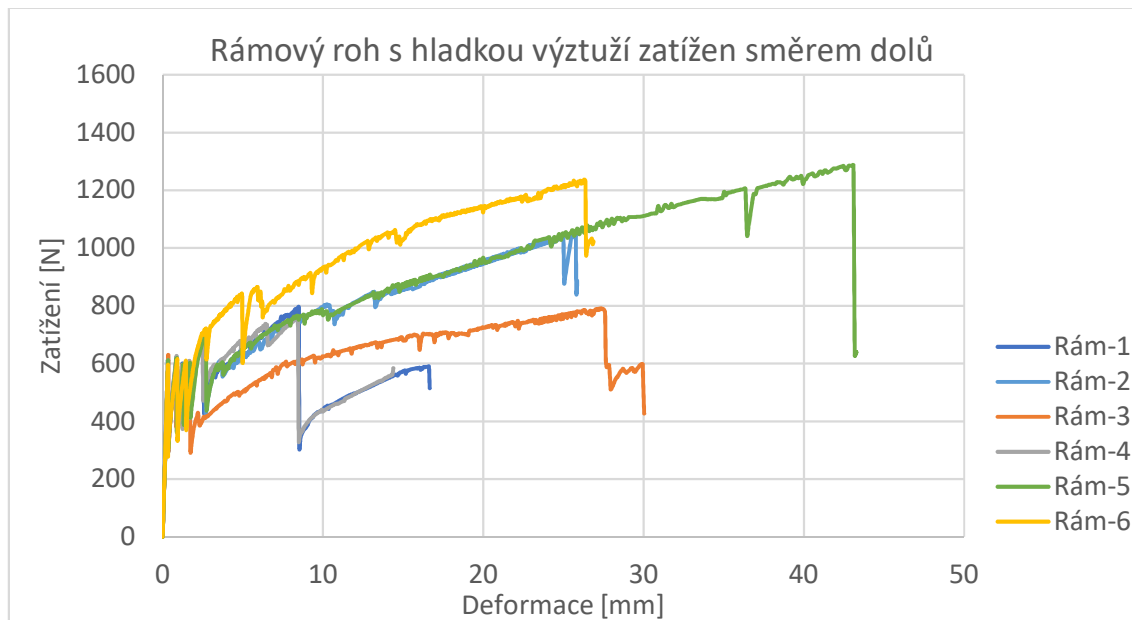
## Charakteristika porušení rámu s pískovanou výztuží (Rám-1)



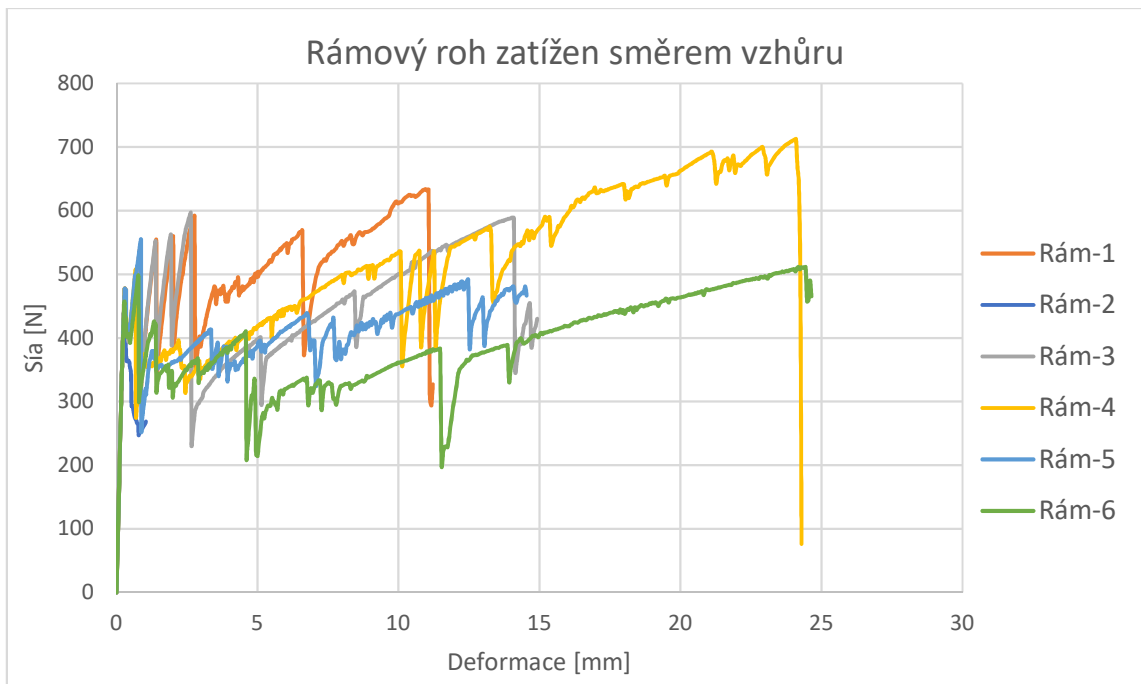
## Charakteristika porušení rámu s hladkou výztuží



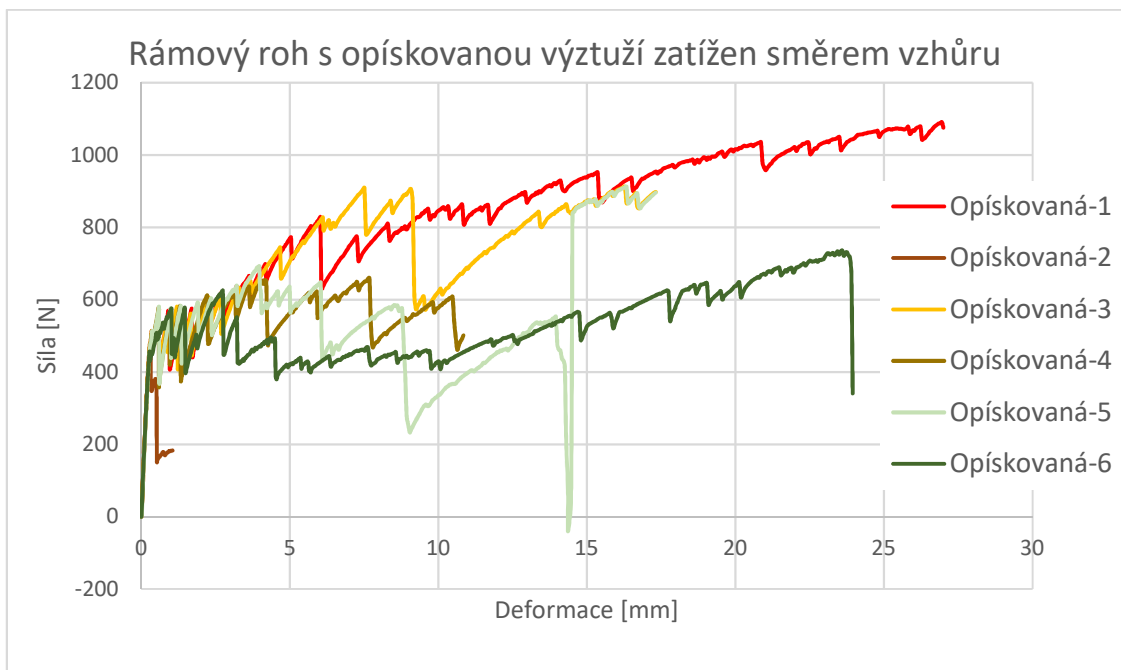
## Příloha č. 5 - Porovnání únosnosti různě vyztužených rámuů



Obr. 44 – Porovnání modelů 1-6 s různým vyztužením zatěžovaných směrem dolů (zavírá se) s hladkou povrchovou úpravou rovingu



Obr. 45 – Porovnání modelů 1-6 s hladkou povrchovou úpravou zatížených směrem vzhůru (otevírá se)



Obr. 46 – Porovnání modelů 1-6 s opískovanou povrchovou úpravou zatěžované směrem vzhůru (otevírá se)