



**ZÁPADOČESKÁ  
UNIVERZITA  
V PLZNI**

FAKULTA APLIKOVANÝCH VĚD  
KATEDRA MECHANIKY – STAVEBNÍ INŽENÝRSTVÍ

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Analýza spřahování kompozitních materiálů**

Vypracoval:

Bc. Václav Louda

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Petr Kesl, Ph.D.

Akademický rok:

2019/2020

# ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta aplikovaných věd

Akademický rok: 2019/2020

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	<b>Bc. Václav LOUDA</b>
Osobní číslo:	<b>A18N0071P</b>
Studijní program:	<b>N3607 Stavební inženýrství</b>
Studijní obor:	<b>Stavitelství</b>
Téma práce:	<b>Analýza spřahování kompozitních materiálů</b>
Zadávací katedra:	<b>Katedra mechaniky</b>

### Zásady pro vypracování

1. Úvodní část s popisem řešeného tématu práce se základním rozbohem.
2. Výběr vhodného profilu z kompozitního materiálu pro konstrukce s rozbohem zatížení.
3. Sestavení statických schémat vybraných konstrukcí, vzorků na porovnání mechanický vlastnosti pro dané konstrukce, konstrukční celky.
4. Statická analýza konstrukčních systémů, prvků s vyhodnocením a dimenzováním ve 3D programech pro ocelové konstrukce a srovnáním pomocí pravděpodobnostního přístupu metodou SBRA.


Rozsah diplomové práce: **úvodní část 60 – 75 stran A4**  
Rozsah grafických prací: **práce skládající se z výkresů a textových částí**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam doporučené literatury:

1. ČSN EN 1990 – Zásady navrhování stavebních konstrukcí
2. ČSN EN 1991 – Zatížení stavebních konstrukcí
3. ČSN EN 1992, ČSN EN 1993 – Navrhování ocelových konstrukcí
4. SIKÁ- kompozitní lamela, technický průvodce, 2018-2019
5. Guštar, Marek: SBRA-Anthill – komentář k softwaru, ARTECH 2001
6. SIKÁ carbodur-SW, dostupnost na <https://cze.sika.com>

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Kesi, Ph.D.**  
Katedra mechaniky

Datum zadání diplomové práce: **1. července 2019**  
Termín odevzdání diplomové práce: **10. ledna 2020**

  
**Doc. Dr. Ing. Vlasta Radová**  
děkanka



  
**Doc. Ing. Jan Vimmer, Ph.D.**  
vedoucí katedry

## Čestné prohlášení

Čestně prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci na téma „Spřahování kompozitních materiálů“ zpracoval samostatně, pod odborným vedením pana Ing. Petra Kesla, Ph.D. a za pomoci odborné literatury a zdrojů uvedených v seznamu literatury, který je součástí práce.

Dále prohlašuji, že použitý software pro vypracování diplomové práce byl získán legální cestou.

V Plzni, dne 3.1.2020

.....

Bc. Václav Louda

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval zejména svému vedoucímu práce Ing. Petru Keslovi, Ph.D., za cenné rady a čas strávený konzultacemi. Dále tímto způsobem děkuji Ing. Janu Kristkovi, Ph.D., za technickou pomoc a rady při samotném experimentu.

V první řadě patří velké díky mé rodině, která mi umožnila studium na vysoké škole, všem nejbližším přátelům a přítelkyni, která mi byla vždy oporou.

## **Anotace**

Diplomová práce se zabývá představením vláknových kompozitů a jejich možným využitím ve stavebnictví. Praktická část diplomové práce je zaměřena na zásadní problém těchto vyspělých materiálů, kterým je jejich spojování. V laboratoři byly provedeny zkoušky lepeného spoje. Vzorky byly vystaveny různým teplotním a klimatickým vlivům a byla porovnávána jejich únosnost ve smyku. Vyhodnocení výsledků laboratorních zkoušek je provedeno grafickou i statistickou metodou. V závěru jsou zhodnoceny výsledky zkoušek pro jejich možné využití v praxi.

## **Klíčová slova:**

Kompozity, vláknové kompozity, uhlíková vlákna, vzorek, lepený spoj, adherend, koheze, adheze

## **Annotation**

This Master's thesis deals with the introduction of fibrous materials and their possible use in engineering. The practical part of the thesis is focusing on the fundamental problem of these advanced materials, which is their connection. The tests of glued joint were, conducted in the laboratory. Sample, were exposed to various thermal and climatic influence and their shear capacity was compared. The evaluation of the laboratory results was, conducted using graphical and statistical approach. In the conclusion, all the test result are assessed for their possible practical use.

## **Keywords:**

Composites, fiber composites, carbon fibers, sampel, adhesive bond, adherend, cohesion, adhesion

## **Bibliografická citace**

LOUDA, Václav. *Analýza spřahování kompozitních materiálů*. Plzeň, 2020.  
Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta aplikovaných věd,  
Katedra mechaniky. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Kesl, Ph.D.



## Seznam obrázků

<b>Obrázek č.1</b> – Grafické znázornění synergizmu.....	20
[Zdroj: autor diplomové práce]	
<b>Obrázek č. 2</b> – Vlastnosti materiálů pro kompozity.....	21
[Zdroj: autor diplomové práce]	
<b>Obrázek č. 3</b> – Dělení kompozitu podle tvaru výztuže.....	22
[Zdroj: autor diplomové práce]	
<b>Obrázek č. 4</b> – Dělení kompozitu podle orientace vláken.....	23
[Zdroj: autor diplomové práce]	
<b>Obrázek č. 5</b> – Výroba uhlíkových vláken.....	26
[Zdroj: <a href="https://www.carbonandgraphite.org/index.php/home/physical-properties">https://www.carbonandgraphite.org/index.php/home/physical-properties</a> ]	
<b>Obrázek č. 6</b> – Výroba tkanin z uhlíkových vláken.....	27
[Zdroj: <a href="https://www.compositestoday.com/2014/12/toray-set-acquire-carbon-fibre-prepreg-business/">https://www.compositestoday.com/2014/12/toray-set-acquire-carbon-fibre-prepreg-business/</a> ]	
<b>Obrázek č. 7</b> – Kevlarová tkanina společnosti DuPont.....	28
[Zdroj: <a href="https://www.dupont.co.in/products-and-services/fabrics-fibers-nonwovens/fibers/brands/kevlar/products/dupont-kevlar-fiber.html">https://www.dupont.co.in/products-and-services/fabrics-fibers-nonwovens/fibers/brands/kevlar/products/dupont-kevlar-fiber.html</a> ]	
<b>Obrázek č. 8</b> – Skleněná tkanina a skleněná rohož.....	29
[Zdroj: <a href="https://pctuning.tyden.cz/index2.php?option=com_content&amp;task=view&amp;id=12243&amp;Itemid=60&amp;pop=1&amp;page=99">https://pctuning.tyden.cz/index2.php?option=com_content&amp;task=view&amp;id=12243&amp;Itemid=60&amp;pop=1&amp;page=99</a> ]	
<b>Obrázek č. 9</b> – Roving z čedičových vláken.....	30
[Zdroj: <a href="https://www.je-art.cz/component/eventgallery/event/kompozity">https://www.je-art.cz/component/eventgallery/event/kompozity</a> ]	
<b>Obrázek č. 10</b> – Výrobní proces pomocí metody Pultruze.....	33
[Zdroj: <a href="http://www.orlibit.cz/technologie-kompozity.php">http://www.orlibit.cz/technologie-kompozity.php</a> ]	
<b>Obrázek č. 11</b> – Profil v průběhu výroby.....	33
[Zdroj: <a href="https://www.prefa-kompozity.cz/technologie-vyroby/materialove-vlastnosti/">https://www.prefa-kompozity.cz/technologie-vyroby/materialove-vlastnosti/</a> ]	
<b>Obrázek č. 12</b> – Kompozitní šroub.....	36
[Zdroj: <a href="https://www.cfccarbon.com/carbon-composite/carbon-composite-bolts-nuts.html">https://www.cfccarbon.com/carbon-composite/carbon-composite-bolts-nuts.html</a> ]	
<b>Obrázek č. 13</b> – Technický výkres stolu trhačky.....	38
[Zdroj: výkres poskytnul Ing. Jan Krystek, Ph.D.]	
<b>Obrázek č. 14</b> – Výrobní dokumentace stoličky.....	39
[Zdroj: autor diplomové práce]	
<b>Obrázek č. 15</b> – Lepení vzorku – zatížení.....	42
[Zdroj: autor diplomové práce]	

---

<b>Obrázek č. 16</b> – Příprava před experimentem.....	46
[Zdroj: autor diplomové práce]	
<b>Obrázek č. 17</b> – Ukázka zatěžování vzorku .....	47
[Zdroj: autor diplomové práce]	
<b>Obrázek č. 18</b> – Nastavení výpočtu RT_2,3.....	52
[Zdroj: autor diplomové práce]	
<b>Obrázek č. 19</b> – Výpočet v AntHill pro vzorky RT_2,3.....	53
[Zdroj: autor diplomové práce]	
<b>Obrázek č. 20</b> – Nastavení výpočtu RT_8,9,10.....	58
[Zdroj: autor diplomové práce]	
<b>Obrázek č. 21</b> – Výpočet v AntHill pro vzorky RT_8,9,10 .....	59
[Zdroj: autor diplomové práce]	
<b>Obrázek č. 22</b> – Nastavení výpočtu RT_11,12,13,14.....	66
[Zdroj: autor diplomové práce]	
<b>Obrázek č. 23</b> – Výpočet v AntHill pro vzorky RT_11,12,13,14.....	67
[Zdroj: autor diplomové práce]	
<b>Obrázek č. 24</b> – Nastavení výpočtu OUT_1,2.....	74
[Zdroj: autor diplomové práce]	
<b>Obrázek č. 25</b> – Výpočet v AntHill pro vzorky OUT_1,2.....	75
[Zdroj: autor diplomové práce]	

## Seznam grafů

<b>Graf č. 1</b> – Porovnání cen výztužných vláken.....	24
[Zdroj: <a href="https://docplayer.cz/4294044-Vlaknove-kompozitni-materialy-jejich-vlastnosti-a-vyroba.html">https://docplayer.cz/4294044-Vlaknove-kompozitni-materialy-jejich-vlastnosti-a-vyroba.html</a> ]	
<b>Graf č. 2</b> – Tabulka pevní uhlíkových vláken společnosti Toray Industries.....	27
[Zdroj: <a href="http://www.torayca.com/en/download/pdf/torayca_t1100g.pdf">http://www.torayca.com/en/download/pdf/torayca_t1100g.pdf</a> ]	
<b>Graf č. 3</b> – Vzorek RT_1 – závislost zatížení na posuvu tlačné hlavy.....	48
[Zdroj: autor diplomové práce]	
<b>Graf č. 4</b> – Vzorek RT_1 – průběh deformace.....	48
[Zdroj: autor diplomové práce]	
<b>Graf č. 5</b> – Vzorek RT_2 – závislost zatížení na posuvu tlačné hlavy.....	49
[Zdroj: autor diplomové práce]	
<b>Graf č. 6</b> – Vzorek RT_2 – průběh deformace.....	49
[Zdroj: autor diplomové práce]	
<b>Graf č. 7</b> – Vzorek RT_3 – závislost zatížení na posuvu tlačné hlavy.....	50
[Zdroj: autor diplomové práce]	
<b>Graf č. 8</b> – Vzorek RT_3 – průběh deformace.....	50
[Zdroj: autor diplomové práce]	
<b>Graf č. 9</b> – Porovnání vzorků RT_8,9,10.....	51
[Zdroj: autor diplomové práce]	
<b>Graf č. 10</b> – Vzorek RT_8 – závislost zatížení na posuvu tlačné hlavy.....	54
[Zdroj: autor diplomové práce]	
<b>Graf č. 11</b> – Vzorek RT_8 – průběh deformace.....	54
[Zdroj: autor diplomové práce]	
<b>Graf č. 12</b> – Vzorek RT_9 – závislost zatížení na posuvu tlačné hlavy.....	55
[Zdroj: autor diplomové práce]	
<b>Graf č. 13</b> – Vzorek RT_9 – průběh deformace.....	55
[Zdroj: autor diplomové práce]	
<b>Graf č. 14</b> – Vzorek RT_10 – závislost zatížení na posuvu tlačné hlavy.....	56
[Zdroj: autor diplomové práce]	
<b>Graf č. 15</b> – Vzorek RT_10 – průběh deformace.....	56
[Zdroj: autor diplomové práce]	
<b>Graf č. 16</b> – Porovnání vzorků RT_8,9,10.....	57
[Zdroj: autor diplomové práce]	
<b>Graf č. 17</b> – Porovnání vzorků RT_1,2,3,8,9,10.....	60
[Zdroj: autor diplomové práce]	

<b>Graf č. 18</b> – Vzorek RT_11 – závislost zatížení na posuvu tlačné hlavy.....	61
[Zdroj: autor diplomové práce]	
<b>Graf č. 19</b> – Vzorek RT_11 – průběh deformace.....	61
[Zdroj: autor diplomové práce]	
<b>Graf č. 20</b> – Vzorek RT_12 – závislost zatížení na posuvu tlačné hlavy.....	62
[Zdroj: autor diplomové práce]	
<b>Graf č. 21</b> – Vzorek RT_12 – průběh deformace.....	62
[Zdroj: autor diplomové práce]	
<b>Graf č. 22</b> – Vzorek RT_13 – závislost zatížení na posuvu tlačné hlavy.....	63
[Zdroj: autor diplomové práce]	
<b>Graf č. 23</b> – Vzorek RT_13 – průběh deformace.....	63
[Zdroj: autor diplomové práce]	
<b>Graf č. 24</b> – Vzorek RT_14 – závislost zatížení na posuvu tlačné hlavy.....	64
[Zdroj: autor diplomové práce]	
<b>Graf č. 25</b> – Vzorek RT_14 – průběh deformace.....	64
[Zdroj: autor diplomové práce]	
<b>Graf č. 26</b> – Porovnání vzorků RT_11,12,13,14.....	65
[Zdroj: autor diplomové práce]	
<b>Graf č. 27</b> – Vzorek ICE_1 – závislost zatížení na posuvu tlačné hlavy.....	68
[Zdroj: autor diplomové práce]	
<b>Graf č. 28</b> – Vzorek ICE_1 – průběh deformace.....	68
[Zdroj: autor diplomové práce]	
<b>Graf č. 29</b> – Vzorek ICE_2 – závislost zatížení na posuvu tlačné hlavy.....	69
[Zdroj: autor diplomové práce]	
<b>Graf č. 30</b> – Vzorek ICE_2 – průběh deformace.....	69
[Zdroj: autor diplomové práce]	
<b>Graf č. 31</b> – Porovnání vzorků ICE_1,2.....	70
[Zdroj: autor diplomové práce]	
<b>Graf č. 32</b> – Vzorek OUT_1 – závislost zatížení na posuvu tlačné hlavy.....	71
[Zdroj: autor diplomové práce]	
<b>Graf č. 33</b> – Vzorek OUT_1 – průběh deformace.....	71
[Zdroj: autor diplomové práce]	
<b>Graf č. 34</b> – Vzorek OUT_2 – závislost zatížení na posuvu tlačné hlavy.....	72
[Zdroj: autor diplomové práce]	
<b>Graf č. 35</b> – Vzorek OUT_2 – průběh deformace.....	72

[Zdroj: autor diplomové práce]

**Graf č. 36** – Porovnání vzorků OUT\_1,2.....73

[Zdroj: autor diplomové práce]

**Graf č. 37** – Porovnání vzorků ICE\_1,2, OUT\_1,2, RT\_11,12,13,14.....76

[Zdroj: autor diplomové práce]

## Seznam tabulek

<b>Tab. č. 1</b> – Pevnost lepidla Scotch-Weld™ Lepidlo EPX™ DP490 .....	40
[Zdroj: <a href="https://www.azktrade.cz/publicdoc/dp-490.pdf">https://www.azktrade.cz/publicdoc/dp-490.pdf</a> ]	

## Seznam příloh

<b>Příloha č. 1</b> –Lepidla Scotch-Weld™ Lepidlo EPX™ DP490 .....	84
[Zdroj: <a href="https://www.azktrade.cz/publicdoc/dp-490.pdf">https://www.azktrade.cz/publicdoc/dp-490.pdf</a> ]	
<b>Příloha č. 2</b> – Vlastnosti materiálu .....	88
[Zdroj: <a href="https://www.ronn.cz">https://www.ronn.cz</a> ]	

## Obsah:

<b>Úvod</b> .....	18
<b>Cíle práce</b> .....	19
<b>Motivace</b> .....	19
<b>Hypotéza</b> .....	19
<b>Teoretická část</b> .....	20
<b>1. Kompozitní materiály</b> .....	20
1.1. Dělení kompozitů.....	22
<b>2. Vláknové kompozity</b> .....	24
2.1. Vlákná.....	24
2.1.1. Uhlíková vlákna.....	25
2.1.1.1. První zmínka.....	25
2.1.1.2. Výroba.....	25
2.1.1.3. Vlastnosti.....	26
2.1.2. Aramidová vlákna.....	28
2.1.2.1. První zmínka.....	28
2.1.2.2. Výroba.....	28
2.1.2.3. Vlastnosti.....	28
2.1.3. Skleněná vlákna.....	29
2.1.3.1. První zmínka.....	29
2.1.3.2. Výroba.....	29
2.1.3.3. Vlastnosti.....	29
2.1.4. Čedičová vlákna.....	30
2.1.4.1. První zmínka.....	30
2.1.4.2. Výroba.....	30
2.1.4.3. Vlastnosti.....	30
2.2. Matrice.....	31

2.3. Výroba vláknových kompozitů .....	32
2.3.1. Pultruze .....	32
2.3.2. Lití do forem .....	34
2.3.3. Laminování ručním způsobem .....	34
2.3.4. Stříkaná výroba .....	34
<b>3. Možnosti spojování kompozitních materiálů .....</b>	<b>34</b>
3.1. Mechanické spoje .....	34
3.1.1. Nýtový spoj .....	35
3.1.2. Šroubový spoj .....	36
3.2. Lepený spoj .....	36
3.2.1. Výhody lepeného spoje .....	37
3.2.2. Nevýhody lepeného spoje .....	37
<b>Experimentální část .....</b>	<b>38</b>
<b>4. Příprava před experimentem .....</b>	<b>38</b>
4.1. Upínací stolička .....	38
4.2. Příprava testovaných vzorků .....	41
4.2.1. Řezání .....	41
4.2.2. Série měření .....	41
4.2.3. Pracovní postup lepení .....	42
4.2.4. Dělení vzorků a jejich označení .....	43
4.3. Experiment .....	45
4.4. Popis experimentu .....	46
<b>5. Měřené hodnoty - vzorky s rozptýlenou výztuží .....</b>	<b>48</b>
5.1. Vzorek RT_1 .....	48
5.2. Vzorek RT_2 .....	49
5.3. Vzorek RT_3 .....	50
5.4. Vyhodnocení vzorků RT_1,2,3 .....	51



---

5.5. Vzorek RT_8.....	54
5.6. Vzorek RT_9.....	55
5.7. Vzorek RT_10.....	56
5.8. Vyhodnocení vzorků RT_8,9,10.....	57
5.9. Vyhodnocení testu – vzorky s rozptýlenou výztuží.....	60
<b>6. Měřené hodnoty – vzorky s podélnou výztuží.....</b>	<b>61</b>
6.1. Vzorek RT_11.....	61
6.2. Vzorek RT_12.....	62
6.3. Vzorek RT_13.....	63
6.4. Vzorek RT_14.....	64
6.5. Vyhodnocení vzorků RT_11,12,13,14.....	65
6.6. Vzorek ICE_1.....	68
6.7. Vzorek ICE_2.....	69
6.8. Vyhodnocení vzorků ICE_1,2.....	70
6.9. Vzorek OUT_1.....	71
6.10. Vzorek OUT_2.....	72
6.11. Vyhodnocení vzorku OUT_1,2.....	73
6.12. Vyhodnocení testu – vzorky s rozptýlenou výztuží.....	76
<b>7. Ověření hypotézy.....</b>	<b>77</b>
<b>8. Závěr.....</b>	<b>77</b>
<b>9. Přílohová část.....</b>	<b>83</b>

## Úvod

Diplomová práce se zabývá problematikou spojování kompozitních materiálů. S vývojem techniky a požadavků na nové materiály, byly vyvinuty vláknové kompozity, které mají vysokou pevnost, odolnost a pružnost. Využívají se v nejnáročnějších odvětvích jako je kosmonautika, letectví a automobilový průmysl. Slabinou těchto materiálů je však jejich spolehlivé spojení tak aby nedegradovali samotný vysoce sofistikovaný materiál.

Teoretická část je zaměřena na vývoj kompozitních materiálů až do současnosti. První využívání kompozitních materiálů můžeme najít již od počátků lidské civilizace. Mezi kompozitní materiály můžeme zařadit i smíchanou hlínu se slámou, která se prokazatelně využívala již v Mezopotámii v době přibližně před 6 tisíci lety. Již ve starověku bylo využíváno základního principu kompozitních materiálů, kterým je využít dva rozdílné materiály s odlišnými vlastnostmi, čímž dosáhneme lepšího materiálu. Vlákná dodávají „tahovou“ pevnost a hlína zajišťuje soudržnost a chrání slámu před povětrností a ohněm. Dnes je tento princip stejný, jen prvotní materiály jsou poněkud sofistikovanější.

Experimentální část se zabývá analýzou a vyhodnocením dvou sérií laboratorního měření. První i druhá série čítala 7 vzorků. Kompozitní vzorky byly dvou druhů, kompozit s rozptýleným vláknem při povrchu a kompozity s podélnou výztuží. Na vzorcích byl proveden kolmý lepený spoj tak, aby jeden z prvků byl lepen kolmo a druhý podélně na vlákna. Slepený vzorek tvořil krátkou konzolu, která byla následně zatěžována. Pro lepení bylo zvoleno lepidlo Scotch-Weld™ Lepidlo EPX™ DP490 z důvodu vysoké pevnosti a snadného nanášení a míchání. V první sérii vzorků byla před lepením podchlazena a lepena za studena. Následně dva vzorky tvrdly v laboratorním mrazáku, dva vzorky tvrdly v exteriéru a tři vzorky v interiéru při pokojové teplotě. Druhá série vzorků nebyla podchlazena při nanášení lepidla a všech sedm vzorků bylo ponecháno v laboratorních podmínkách. Po stanovené době tvrdnutí (7dní) byly provedeny zkoušky na trhačce.

## **Cíle práce**

Hlavním cílem byla experimentální analýza smykové pevnosti lepeného spoje u dvou typů vzorků. Kompozity s rozptýlenou výztuží a kompozity s podélnou výztuží. Vzorky byly vystaveny různým vlivům, které ovlivňují výslednou pevnost. Následně grafické a statistické vyhodnocení pevnosti.

## **Motivace**

Hlavní motivací pro vyhotovení diplomové práce byla vrozená zvědavost. Z mé krátké praxe jsem již stihl vypozaovat, že v případě náročných statických podmínek lze většinu konstrukcí řešit z oceli. Toto řešení má ovšem v určitých podmínkách své nedostatky z hlediska nízké požární odolnosti a hmotnosti. A proto kompozitní materiály mohou být vhodnou alternativou při řešení těchto konstrukčních problémů. Tyto materiály mají velice vysokou pevnost, avšak jejich spoje jsou zatím největší slabinou.

## **Hypotéza**

Hypotéza pro diplomovou práci byla následující:

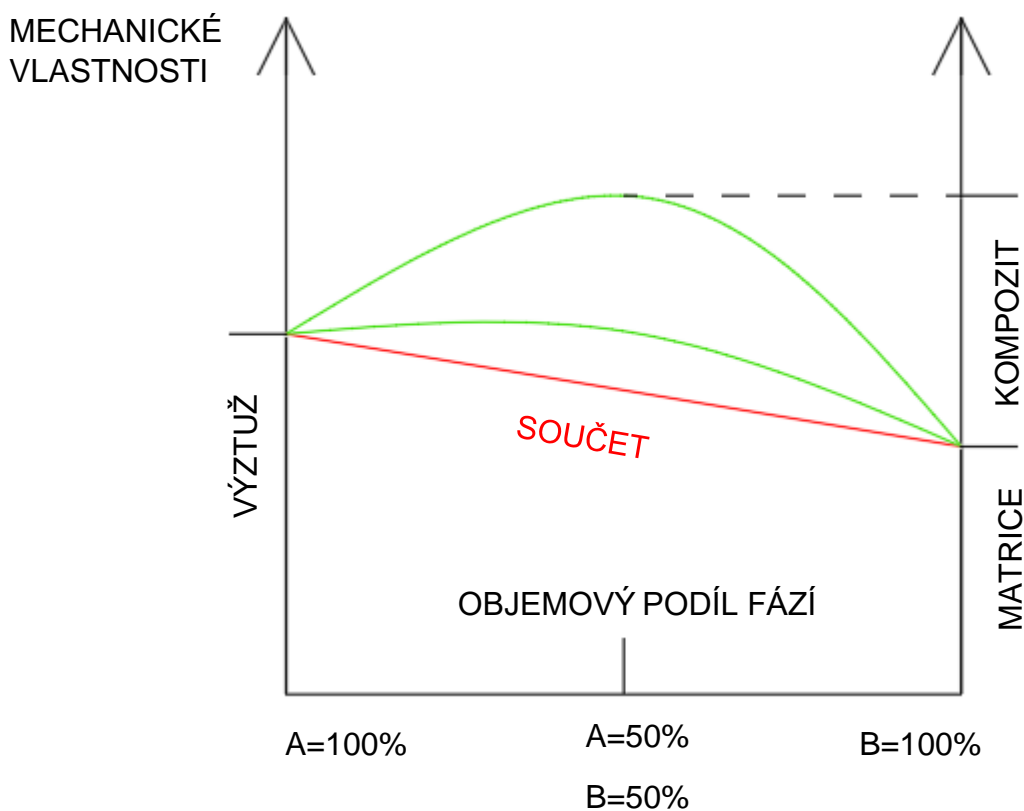
**Vliv klimatických podmínek na lepený spoj kompozitních materiálů.**

## Teoretická část

### 1. Kompozitní materiály

Z mikroskopického hlediska jsou dvě nebo více navzájem spojených fází, které se od sebe liší fyzikálními i chemickými vlastnostmi. Mezi jednotlivými fázemi se nachází tzv. „rozhraní“, které má vliv na výslednou pevnost kompozitu. Kompozit je tvořen spojitou maticí a nespojitým vláknem nebo výztuží. Výztuž má v naprosté většině případů vyšší pevnost, tvrdost a modul pružnosti než samotná matrice. Z globálního pohledu je však prvek z kompozitu homogenní.

U kompozitních materiálů se vyskytuje jev zvaný synergizmus, což znamená, že vlastnosti kompozitu jsou lepší než pouhý poměrový součet vlastností obou fází. Jedná se o velice významný jev, který napomáhá k utváření lepších a pevnějších materiálů (obr. č. 1).[1,2]

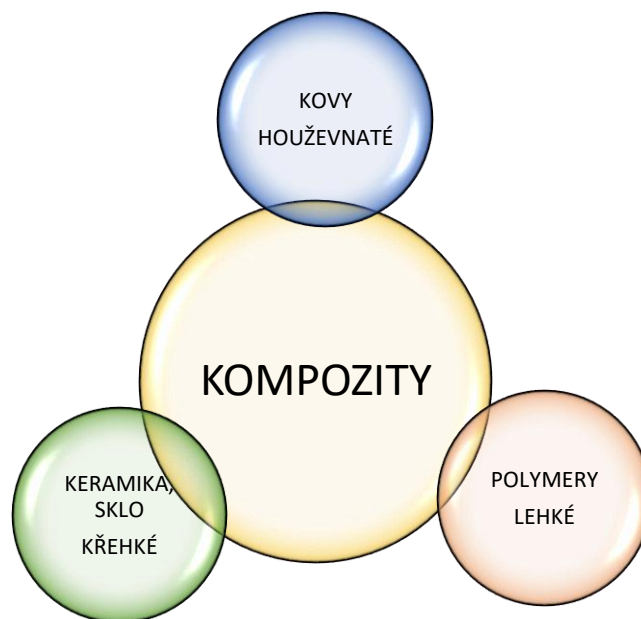


Obrázek č. 1 – Grafické znázornění synergizmu  
[Zdroj: autor diplomové práce]

Nejznámějším přírodním kompozitem je asi dřevo. Jedná se o celulózová vlákna v ligninu.

Na rozhraní jednotlivých fází vzniká interakce nejčastěji fyzikální případně fyzikálně chemická. Nelze však vyloučit ani chemickou, na fázových rozhraních se může vytvořit nebo může být úmyslně vytvořena mezifáze (vnesena např. obalením, pokrytím, chemickou reakcí), jejíž fyzikální vlastnosti mohou být i značně odlišné od vlastností výchozích materiálů.

Interakce jednotlivých fází a struktur pomáhá vytvářet nové lepší materiály, které vyzdvihují vhodné vlastnosti a potlačují vlastnosti nežádoucí (obr. č. 2). Lze uzpůsobit a navrhnout takové složení kompozitního materiálů s určitými vlastnostmi, které by neměl samostatný jednofázový materiál. Takové materiály se nazývají vláknové kompozity. [1,2]



Obrázek č. 2 – Vlastnosti materiálů pro kompozity.

[Zdroj: autor diplomové práce]

## 1.1. Dělení kompozitů

Vláknové kompozitní materiály lze dělit z několika hledisek. Podle velikosti průměru výztužných vláken, podle orientace výztužných vláken a podle tvaru výztuže. Dále pak je možné dělit kompozity podle materiálu výztuže. [1,2]

### Dělení kompozitů podle velikosti výztuže:

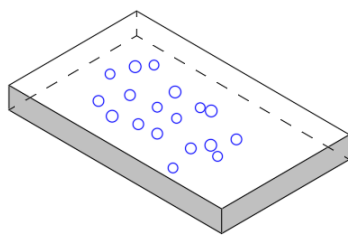
- makrokompozity (velikosti řádově v mm až cm)
- mikrokompozity (řádově v  $\mu\text{m}$ )
- nanokompozity (řádově v nm)

### Dělení kompozitů podle orientace výztuže:

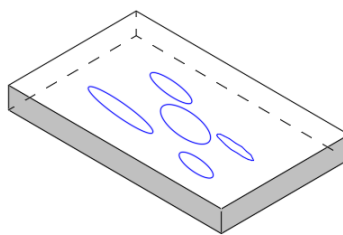
- preferovaná
- náhodná

### Dělení kompozitů podle tvaru výztuže (obr. č. 3):

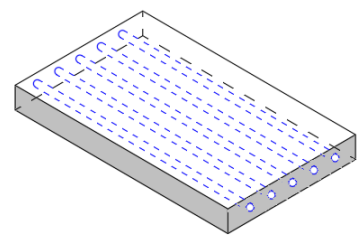
- částicové (izometrický či anizometrický tvar)
- vláknové (kontinuální či diskontinuální vlákna)



Izometrická výztuž



Anizometrická výztuž



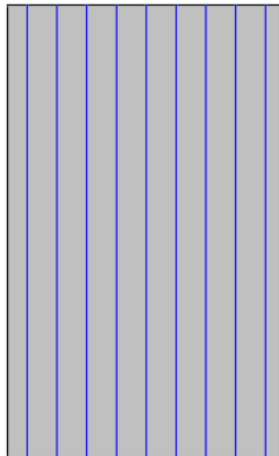
Vláknová výztuž

Obrázek č. 3 – Dělení kompozitu podle tvaru výztuže

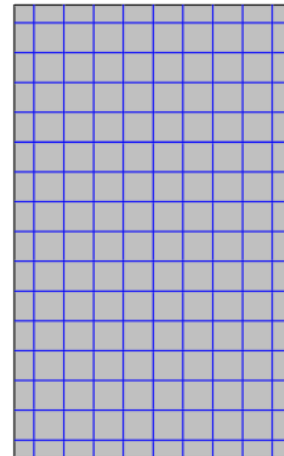
[Zdroj: autor diplomové práce]

### Dělení podle orientace vláken v matici (obr. č. 4)

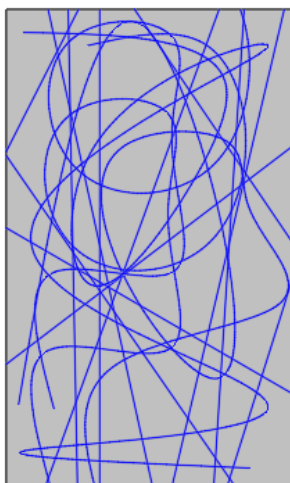
- jednosměrně usprádaná kontinuální vlákna
- křížem položená jednosměrná vlákna nebo tkanina
- rohož, nahodilá orientace vláken kontinuálních a krátkých - netkaná textilie
- víceosá výztuž z kontinuálních vláken - sešíváné jednosměrné vrstvy nebo tkaniny [1,2,3]



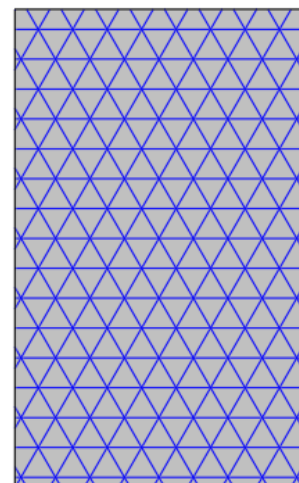
Jednosměrná  
výztuž



Výztuž křížem



Rohož



Víceosá výztuž

Obrázek č. 4 – Dělení kompozitu podle orientace vláken

[Zdroj: autor diplomové práce]

## 2. Vláknové kompozity

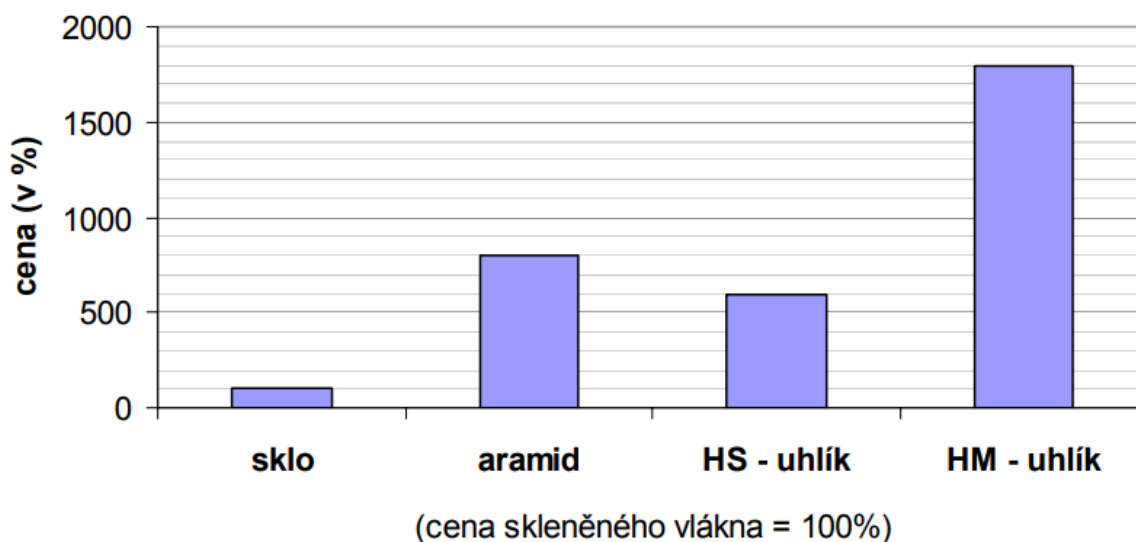
### 2.1. Vlákna

Pevnosti vláken jsou vždy významně větší než pevnost stejného materiálu v kompaktním stavu. Důvodem vyšší pevnosti je malý příčný průřez vláken, v tenkých vláknech jsou minimalizovány vrozené vady materiálu. Taktéž nebezpečnost povrchových vad je při malých příčných rozměrech menší, vady materiálu jsou mikroskopické a jejich orientace je pouze v podélném směru vláken. Hlavní nevýhodou je vysoká cena, zejména uhlíkových vláken (graf č. 1). [1,2,3]

Přednostně využívaná vlákna ve vláknových kompozitech jsou:

- a) skleněná . . . 5 – 15  $\mu\text{m}$
- b) aramidová (kevlar) . . . 5 – 15  $\mu\text{m}$
- c) uhlíková . . . 4 – 8  $\mu\text{m}$
- d) čedičové . . . 6 – 20  $\mu\text{m}$

**Porovnání cen vláken**



Graf č. 1 – Porovnání cen výztužných vláken

[Zdroj: <https://docplayer.cz/4294044-Vlakovne-kompozitni-materialy-jejich-vlastnosti-a-vyroba.html>]



## 2.1.1. Uhlíková vlákna

### 2.1.1.1. První zmínka

První uhlíkové vlákno představil světu Thomas Alva Edison, který použil bambusovou dřevinu k vyrobení prvního uhlíkového vlákna roku 1879. Karbonizované bambusové vlákno použil do své žárovky. [4,5]

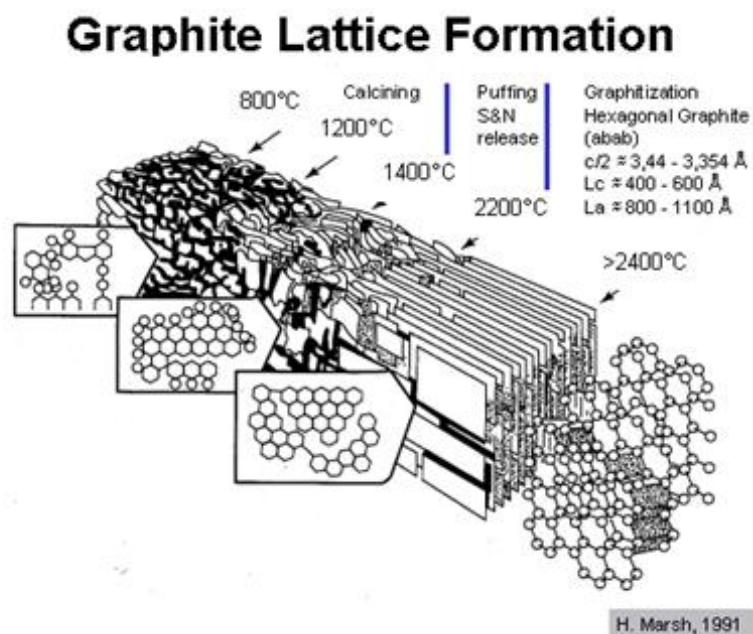
### 2.1.1.2. Výroba

První fází výroby uhlíkových vláken je zvláknění prekurzoru, kterým v dnešní době je polyakrylonitril stabilizovaný oxidačním způsobem - PAL. Na struktuře tohoto prekurzoru závisí výsledná pevnost vláken. Jedná se o zvláknění počáteční suroviny tavnou metodou nebo zvlákněním z roztoku. Dochází také k dloužení na potřebnou jemnost vláken.

Další výrobní fází je stabilizace. Stabilizace se provádí na vzduchu zahříváním na teploty, které jsou ve výrobním procesu považovány za nízké 200 - 450 °C na 20 – 30 minut. To způsobuje, že vlákna sbírají molekuly kyslíku ze vzduchu a dochází tak k přerovnání atomové struktury vláken. Při stabilizaci vzniká ve vláknech také vlastní teplo, které je kontrolováno a v případě potřeby musí být zabráněno přehřátí vláken. V praxi je využíváno tažení vláken skrze řadu zahříváných komor nebo vlákna prochází přes rozehráté válce a sypké materiály, které odebírají nadměrné množství produkovaného tepla.

Nejdůležitějším okamžikem výroby uhlíkových vláken je karbonizace. V této fázi dochází k přeměně prekurzoru na uhlíková vlákna. Tento proces se provádí v inertní atmosféře (nejčastěji v dusíkové), při teplotách mezi 1 000 °C – 2 000 °C. Bez přístupu kyslíku není vláknům umožněno hořet. Místo toho způsobují vysoké teploty rozkmitávání atomů ve vláknech tak, že většina neuhlíkových atomů je odstraněna. Výsledná vlákna obsahují 85 - 95 % uhlíku. V této fázi výroby mají vlákna nejvyšší tažnou pevnost.

Doplňkový mezistupněm výroby je tzv. grafitizace, kterou není nutné provést. Pokud se však provede, vznikají grafitová vlákna (obr. č. 5). Grafitizace se provádí také v inertní atmosféře ještě za větších teplot mezi 2 400 °C - 3 000 °C. Tím dojde ke zvýšení obsahu uhlíku téměř na 100%. Touto metodou docílíme také uspořádané vrstevnaté struktury, čímž dosílíme vyšší tuhosti vláken. [4,5]



Obrázek č. 5 – Výroba uhlíkových vláken

[Zdroj: <https://www.carbonandgraphite.org/index.php/home/physical-properties>]

Posledním stupněm výroby uhlíkových vláken je úprava jejich povrchu. Povrch vláken je nutné upravit z důvodu lepší soudržnosti v kompozitním materiálu. Úprava probíhá mírnou oxidací. Přidáním atomů kyslíku se stane povrch hrubším a tudíž přilnavějším pro další látky. Tím dojde k lepší mechanické vazbě mezi vláknem a matricí v kompozitu. K okysličení dochází přístupem vzduchu, oxidu uhličitého nebo ozonu. Případně ponořováním do různých žíravin jako chlornanu sodného nebo kyseliny dusičné. Dále mohou být vlákna pokryta vrstvami, které tvoří ochranu pro další zpracování. [4,5]

### 2.1.1.3. Vlastnosti

- A) uhlíková vlákna nižších parametrů – AS (average strength)
- pevnost v tahu < 1000 MPa
  - modul pružnosti v tahu < 100 GPa

Vlákna nižších parametrů jsou dodávána ve formě tkanin, pásek apod. Prekurzorem jsou izotropní smoly nebo viskóza (obr. č. 6).

B) uhlíková vlákna s vysokými mechanickými parametry (high performance carbon fibers), (graf. č. 2).

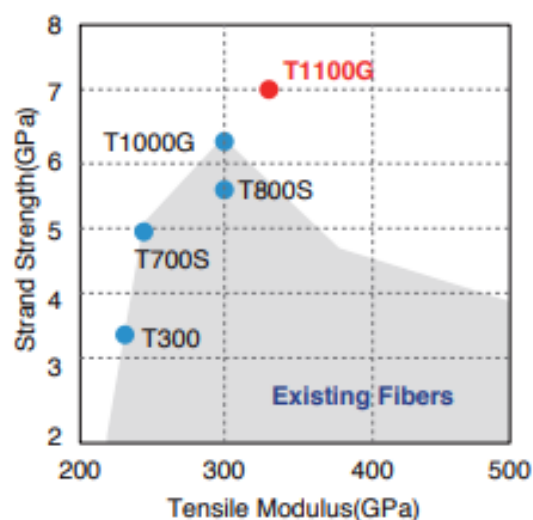
- pevnost v tahu 3,5 - 7 GPa
- modul pružnosti 230 - 930 GPa

- vysoko pevnostní vlákna – HS (high strength fibers)
- vysoko modulová vlákna – HM (high modul fibers)
- středně modulová vlákna – IM (intermediate modul fibers)
- super vysoký modul – UHM (ultra high modul fibers) [4,5]



Obrázek č. 6 – Výroba tkanin z uhlíkových vláken

[Zdroj: <https://www.compositestoday.com/2014/12/toray-set-acquire-carbon-fibre-prepreg-business/>]



Graf č. 2 – Tabulka pevní uhlíkových vláken společnosti Toray Industries

[Zdroj: [http://www.torayca.com/en/download/pdf/torayca\\_t1100g.pdf](http://www.torayca.com/en/download/pdf/torayca_t1100g.pdf)]

## 2.1.2. Aramidová vlákna

### 2.1.2.1. První zmínka

Jako vynálezce aramidových vláken můžeme označit Stephanie Kwolek, která pracovala jako výzkumná vědkyně ve společnosti DuPont. Tého chemičce se povedlo spřádat vlákna z krystalického roztoku již v roce 1965. Tento materiál nesl název meta-aramid obchodní název Nomex. V roce 1972 se stejná laboratoř zasloužila o vynález para-aramidu s obchodním označením Kevlar (obr. č. 7). [6,7,8]

### 2.1.2.2. Výroba

Přesná výroba je tajná. Je známo pouze, že vstupní surovinou jsou polymery z iontových složek  $\text{CaCl}_2$ , které se vážou na vodíkové můstky a organické rozpouštědlo N-metylpyrolidon. Tato sloučenina je vytlačována přes trysku, čímž dochází ke zvláknění, vlákna tuhnou ve spřádací lázni. Následně se pak suší a louží při teplotách 300-400 °C. [6,7]

### 2.1.2.3. Vlastnosti

Aramidová vlákna mají vysokou pevnost a tuhost. Vlákna mají vysokou odolnost proti chemickým látkám, netaví se a mají vysokou odolnost proti ohni. Při teplotách vyšších než 400 °C nehoří, pouze zuhelnatí, čímž nepodporují další hoření. Vlákna nejsou vhodná do vlhkého prostředí. Degraduje je UV záření. Tahová pevnost se pohybuje až k 3,6GPa. [6,7]



Obrázek č. 7 – Kevlarová tkanina společnosti DuPont

[Zdroj: <https://www.dupont.co.in/products-and-services/fabrics-fibers-nonwovens/fibers/brands/kevlar/products/dupont-kevlar-fiber.html>]

## 2.1.3. Skleněná vlákna

### 2.1.3.1. První zmínka

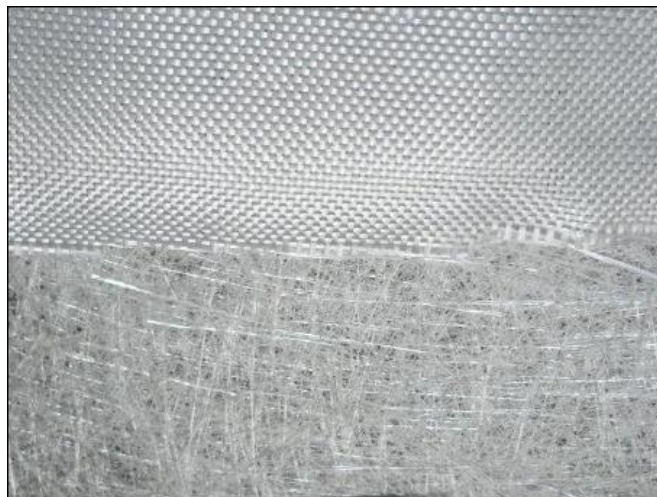
Počátky výroby skelných vláken jsou na konci 19. století. Jako začátek průmyslové výroby skleněných vláken se považuje rok 1930. [9,10]

### 2.1.3.2. Výroba

Kapalná skelná tavenina se zvlákňuje přes trysky a odtahuje rychlostí 30-60 m/sek. Poté samovolně tuhne na vzduchu. Samostatná vlákna jemnosti 5 -15  $\mu\text{m}$  se spojují do svazků, šlichtují a navíjí. Tímto způsobem se vyrábí více než 90% skleněných filamentů. Technologií pro výrobu existuje více v závislosti na výsledném využití sklených vláken. Lze připravovat vlákna foukáním přes trysku, tažením tyčí nebo modifikované tažení tyčí. Skleněná vlákna se dodávají ve formě tkanin, rohoží nebo rovingu. [9,10]

### 2.1.3.3. Vlastnosti

Pevnost skleněných vláken se pohybuje mezi 2,0 – 4,5 GPa. Skleněná vlákna lze použít v teplotním rozsahu od -50 do 450 °C. Snáší vlhkost, která ovšem při dlouhodobém působení snižuje jeho pevnost. Vlákna jsou odolná proti chemikáliím i účinkům UV záření. [9,10]



Obrázek č. 8 – Skleněná tkanina a skleněná rohož

[Zdroj: [https://pctuning.tyden.cz/index2.php?option=com\\_content&task=view&id=12243&Itemid=60&pop=1&page=99](https://pctuning.tyden.cz/index2.php?option=com_content&task=view&id=12243&Itemid=60&pop=1&page=99)]

## 2.1.4. Čedičová vlákna

### 2.1.4.1. První zmínka

Patent na zvláknění čediče dostal jako první Francouzský badatel Paul Dhé v roce 1923. V období studené války v 60. letech probíhal další výzkum a vývoj výroby vláken. O pokrok ve výrobě se zasloužily obě strany, USA i SSSR. Obě světové mocnosti viděly v čedičových vláknech pokrokový materiál pro vojenské účely. [11,12]

### 2.1.4.2. Výroba

Technologicky je výroba čedičových vláken velice podobná výrobě skleněných vláken. Čedičová tavenina se zvláknuje při teplotě okolo 1300°C. Při výrobě kontinuálního vlákna nesmí teplota roztaveného čediče překročit 1250°C. Vlákna jsou pak podle potřeby dloužena. Dodávána jsou totožně jako skleněná vlákna ve formě rohoží, tkanin a rovingu. [11,12]

### 2.1.4.3. Vlastnosti

Pevnost skelných vláken se pohybuje mezi 3,0 – 4,8 GPa. Čedičová vlákna lze použít v teplotním rozsahu od -260 do 760 °C krátkodobě do 1000 °C. Vlákna jsou odolná proti chemikáliím i účinkům UV záření. [11,12]



Obrázek č. 9 – Roving z čedičových vláken

[Zdroj: <https://www.je-art.cz/component/eventgallery/event/kompozity>]

## 2.2. Matrice

Pro výrobu kompozitních materiálů jsou používány čtyři matriční materiály, které jsou tvořeny z různých polymerních pryskyřic:

- epoxidové pryskyřice
- polyesterové pryskyřice
- fenolové pryskyřice
- polyimidové pryskyřice

**Funkce matričních pryskyřic v kompozitu jsou:**

- 1.) zdržet vlákna ve své pozici
- 2.) zajištění spolupůsobení a distribuce napětí
- 3.) ochrana vláken před poškozením
- 4..) přizpůsobit chemické a elektrické vlastnosti materiálu
- 5.) zajišťují interlaminární pevnost

**U vytvrzených kompozitů jsou vyžadovány vlastnosti:**

- 1.) adhezivní pevnost
- 2.) teplotní odolnost
- 3.) únavová pevnost
- 4..) chemická odolnost a odolnost proti vlhkosti
- 5.) vysoký poměr deformace a pevnosti

V dnešní době jsou asi nejvíce využívány epoxidové pryskyřice. Tyto pryskyřice vykazují vhodné základní vlastnosti a lze různými přísadami regulovat další vlastnosti, které jsou požadovány na výsledný kompozitní materiál. [1,2,3]



### **Nejdůležitější vlastnosti, které vykazuje vytvrzený epoxid:**

- 1.) skvělá adheze k vláknům
- 2.) malé smršťování v průběhu vytvrzování
- 3.) vysoká odolnost proti chemikáliím
- 4.) velký výběr v pevnostním a tuhostním spektru
- 5.) creepová a únavová odolnost
- 6.) nejsou toxické
- 7.) lze přidat samozhášivé přísady

## **2.3. Výroba vláknových kompozitů**

### **2.3.1. Pultruze**

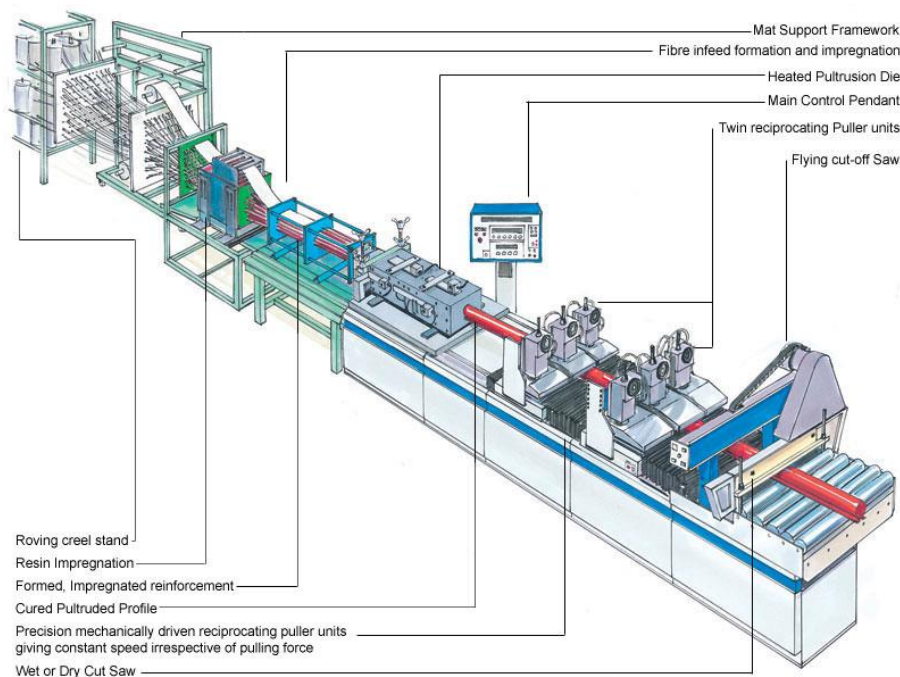
Jedná se o kontinuální výrobu vyztužených kompozitních materiálů, kde lze využít různé druhy vláken i pryskyřic. Proces tažení, při kterém vnikají kompozitní tyče různých profilů i délek (obr. č. 10).

Do výroby vstupují vyztužná vlákna ve formě rovingu i plošných rohoží a tekuté pryskyřice. Vyztužná vlákna jsou umístěna na cívkách. Tato vlákna jsou odvíjena do srovnávače, který zajišťuje jejich polohu. Proces zahrnuje tažení přes vyhřívanou ocelovou formu.

Tyče mohou mít při povrchu vrstvu z netkané textilie, tato vrstva nasycená pryskyřicí zlepšuje vlastnosti povrchu. Touto technologií je dosaženo vyšší odolnosti proti vniknutí chemikálií, UV záření a zlepšuje estetiku povrchu. Povrchová rouška také zabraňuje vyčnívání porušených vláken.

Dále lze výsledné profily smáčet v barvivo případně katalyzátoru pro získání lepších vlastností. [13]



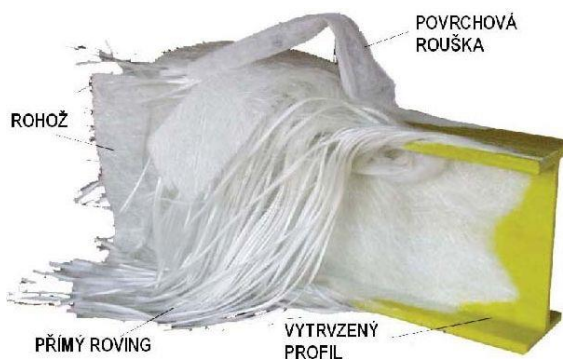


Obrázek č. 10 – Výrobní proces pomocí metody Pultruze  
[Zdroj: <http://www.orlibit.cz/technologie-kompozity.php>]

Odlíšnou metodou je výroba, kdy se smáčí výztužný roving, který je obalen tenkou rohoží, aby měl již hrubý tvar výsledného profilu. Následně je smáčen v tekuté pryskyřici, která může obsahovat barviva i katalyzátor.

Následně je prvek protahován přes formu. Odstraní se přebytečná pryskyřice a následně je profil vypékán.

Obě technologie jsou opatřeny konečným automatickým řezačem tyčí. Standardní délka je 6 m. Rychlost výroby je mezi 30 – 150 cm za minutu. Minimální tloušťka stěny profilu je 1,5 mm maximální se pohybuje okolo 50 mm z důvodu dostatečného prohřátí profilu a jeho polymerizaci. [13]



Obrázek č. 11 – Profil v průběhu výroby  
[Zdroj: <https://www.prefa-kompozity.cz/technologie-vyroby/materialove-vlastnosti/>]

### **2.3.2. Lití do forem**

Do připravené formy se vloží výztužná vlákna, mohou být v podobě rovingu, textilií i rohoží. Následně se forma zaleje pryskyřicí a ohřívá. Po vytvrzení prvku se vyjme komponent z formy a je připraven pro další zpracování. Často se musí odstranit nežádoucí nálitky. Pak lze dále smáčet v barvě případně katalyzátoru. [13]

### **2.3.3. Laminování ručním způsobem**

Komponenty vyráběné ručně se nejčastěji vyztužují textiliemi nebo rohožemi. Výztuž se ručně klade do formy v několika vrstvách. Pro lokální zesílení lze využít roving. Forma se následně zalije pryskyřicí a opět zahřívá, aby došlo k dostatečné polymerizaci struktury.

Hlavní výhodou této metody je poměrně nízká cena při menším počtu výrobků. Tyto výrobky mohou být i tvarově složitě. [13]

### **2.3.4. Stříkaná výroba**

Tato metoda, která je náročná hlavně na zručnost obsluhujícího personálu. Výroba probíhá stříkáním směsi pryskyřice a krátké výztuže na formu případně přímo na opravovaný povrch. Touto metodou lze opravovat i betonové nenosné konstrukce. Tato technologie se nejčastěji využívá při výrobě větších komponent, které jsou nenosné, případně samonosné. [13]

## **3. Možnosti spojování kompozitních materiálů**

Spojování kompozitních materiálů může být pomocí nýtů, šroubů nebo lepením. Případnou kombinací šroubového nebo nýtového spoje a spoje lepeného vznikne spoj hybridní. Každý typ spoje má své výhody a nevýhody. [14]

### **3.1. Mechanické spoje**

Mezi mechanické spoje řadíme nýtový a šroubový spoj. Oba tyto spoje mají shodné znaky. Oba spoje jsou typické svou potřebou zhotovení otvorů ve

spojovaných komponentech. Otvor v prvku způsobuje vznik koncentrátoru napětí ve struktuře kompozitu. Otvorem dojde taktéž k přerušení vláken, které jsou orientovány zejména vodorovně na hlavní směr napětí. Z tohoto důvodu nelze tyto spoje využívat u jednosměrně vyztužených kompozitů.

U těchto typů spojů vznikají lokální kontaktní tlaky, které mohou narušit povrch kompozitních prvků. Tento jev se dá eliminovat použitím vhodných podložek. V případě provedení hybridních spojů při kombinaci s podlepením spoje se dá navýšit pevnost spoje až o 25%.

Vedlejším účinkem těchto spojů je taktéž namáhání kompozitu otláčením, což může způsobovat lokální delaminaci jednotlivých vrstev. K delaminaci může docházet taktéž při vrtání otvorů pro mechanické spoje.

Tyto spoje jsou náročné na velké množství prvků, které způsobují složitost při montáži zejména ve výškách. Tyto spoje se skládají z mnoha komponentů a je zapotřebí montážní náradí.

Největší výhodou je jejich okamžitá pevnost. [14]

### **3.1.1. Nýtový spoj**

Tento spoj se řadí mezi spoje mechanické, které jsou typické pro svou potřebu zhotovení otvoru ve spojovaných komponentech.

Při samotném provádění nýtového spoje se musíme vyvarovat vzniku rázů, které jsou často součástí této technologie. Rázové impulzy mohou poškodit jemnou strukturu materiálu, který byl již oslaben o svou integritu provedením otvoru.

Tento spoj patří mezi nerozebíratelný, jako spojovací materiál jsou nejčastěji využívány slitiny hliníku. Nevýhodou je taktéž různá teplotní roztažnost obou materiálů.

Tento spoj je vhodný pro spoje, které jsou méně náročné na únosnost a životnost. [14]

### 3.1.2. Šroubový spoj

Tento spoj se řadí taktéž mezi spoje mechanické. Na rozdíl od spoje nýtového je tento spoj rozebíratelný. Tento fakt je asi největší výhodou, to umožňuje sestavení konstrukce v krytých podmínkách a následné rozebrání z důvodu přepravy.

Jako spojovací materiál lze použít klasické ocelové šrouby různých povrchových úprav. V případě, kdy jsou ocelové šrouby nežádoucí degradací spoje, je možné využít šrouby vyrobené z kompozitních materiálů (obr. č. 12). Tento požadavek může nastat zejména z důvodu požární odolnosti. Tyto prvky jsou již dnes v zahraničí běžně k dispozici. [14]



Obrázek č. 12 – Kompozitní šroub

[Zdroj: <https://www.cfccarbon.com/carbon-composite/carbon-composite-bolts-nuts.html>]

### 3.2. Lepený spoj

Lepené spoje jsou nerozebíratelné. Lze slepovat dva rozdílné materiály nebo totožné. Lepené komponenty se nazývají **adherendy**. Lepené spoje jsou charakterizovány adhezivní a kohezivní pevností.

**Adhezivní pevnost** lze charakterizovat jako schopnost lepidla přilnout k povrchu adherendu. Tuto pevnost ovlivňuje řada faktorů, které jsou závislé povrchu adherendu a jeho materiálu. Jsou jimi hrubost, pórovitost případné nerovnosti. Nejdůležitější je, aby povrch obou adherendů byl vždy odmaštěn a zbaven prachových částic.

**Kohezivní pevnost** je soudržnost lepidla samotného.[14]

Normy pro lepené spoje jsou:

- EN ISO 11339 pro zkoušení odlupování
- EN 1966 pro zkoušení lepených spojů ohybem
- EN ISO 13445 pro zkoušení smyku
- EN 15865 pro zkoušení krutu
- ČSN EN 1465
- ČSN ISO 10365

### **3.2.1. Výhody lepeného spoje**

- spojování různých materiálů - mohou být i nesvařitelné
- spojení i velice tenkých adherendů
- utěsnění spoje, eliminace vniknutí kapaliny do spoje
- snížení počtu součástí spoje oproti mechanickým
- vzhled spoje
- útlum hluku a chvění
- snížení hmotnosti
- spojení velkých ploch
- lze ovlivnit elektrickou či tepelnou vodivost spoje [14]

### **3.2.2. Nevýhody lepeného spoje**

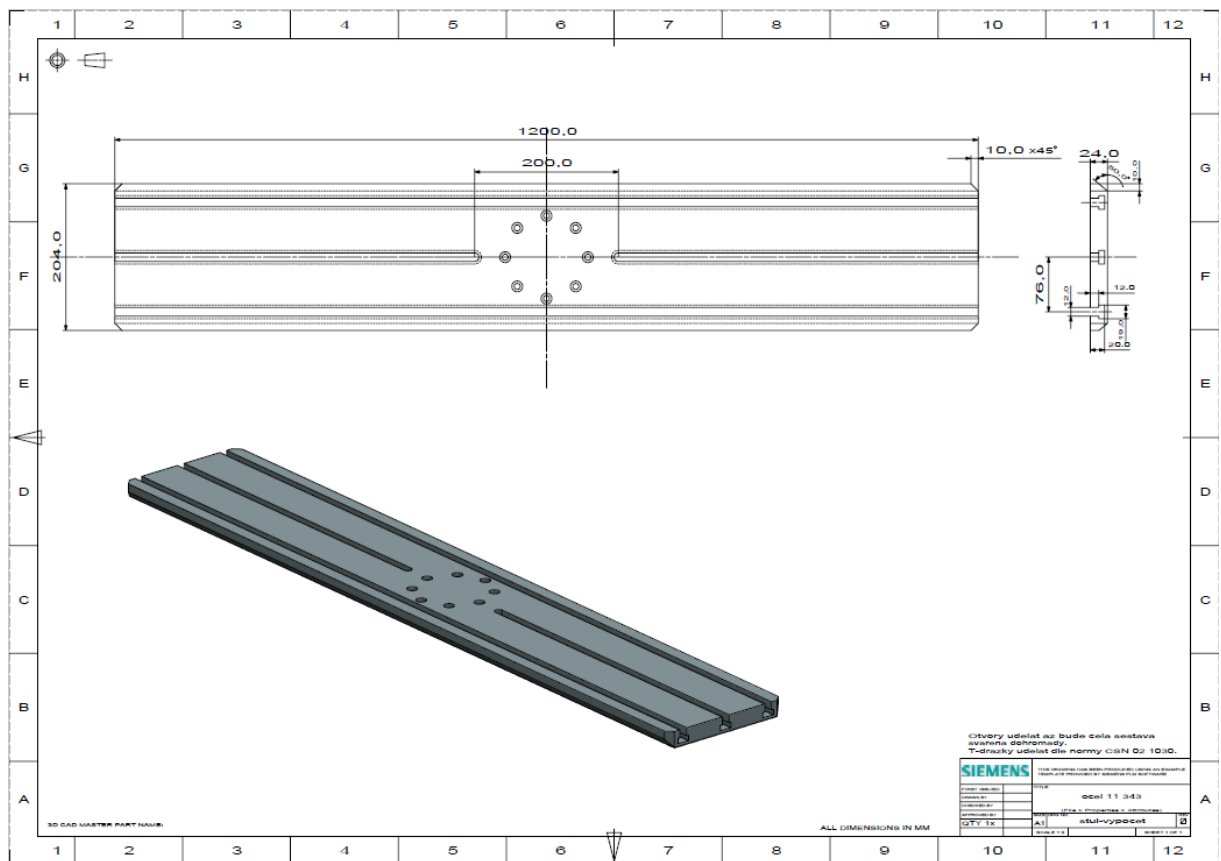
- doba vytvrzování
- nerozebíratelný
- malá odolnost proti dynamickému a normálovému namáhání odlupu
- nízká odolnost proti vysokým teplotám [14]

## Experimetální část

### 4. Příprava před experimentem

#### 4.1. Upínací stolička

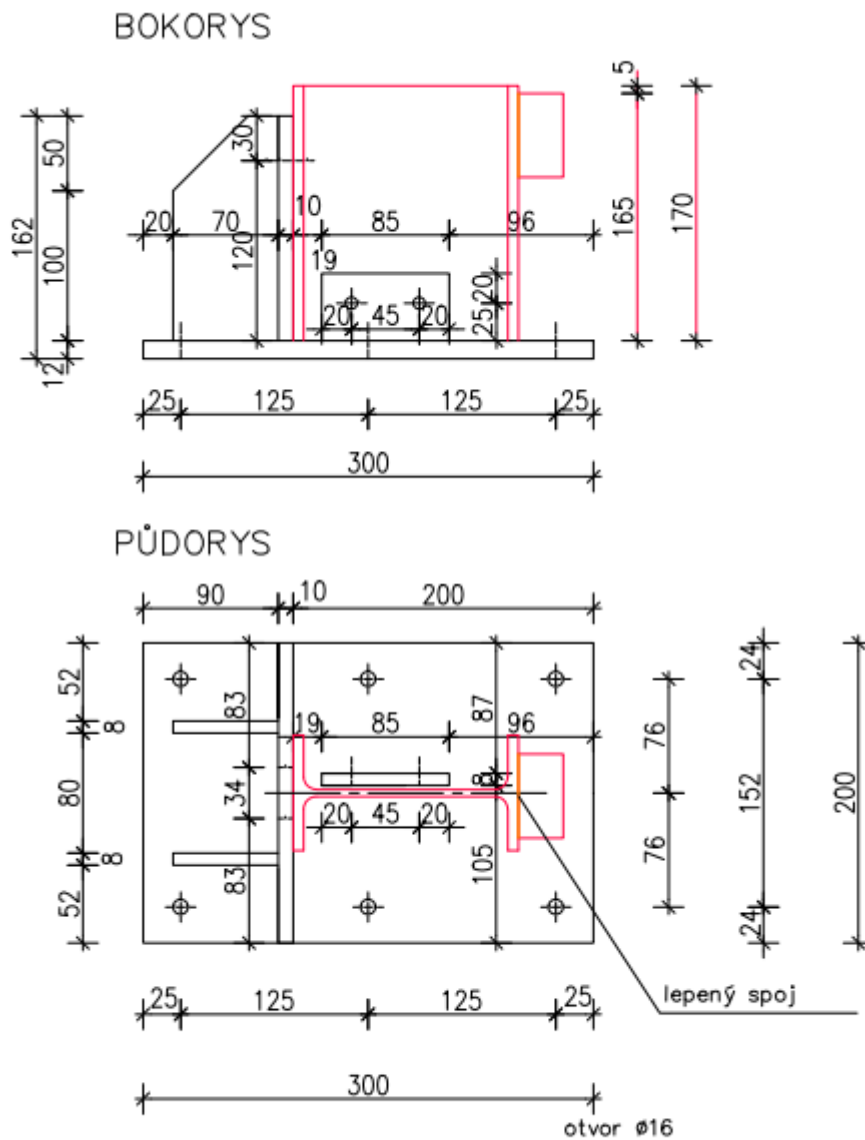
Pro realizaci experimentu bylo nejdříve nutné vyrobit upínací prvek z oceli, který se dal pevně přišroubovat ke stolu trhačky. Tato „stolička“, do které se upevnil testovaný vzorek, byla vyrobena v železářské dílně Stavební společnosti SIPA s.r.o. podle výrobní dokumentace, kterou jsem zpracoval. Jako vstupní podklad pro umístění kotvicích otvorů posloužila poskytnutá dokumentace k trhačce (obr. č. 13).



Obrázek č. 13 – Technický výkres stolu trhačky  
[Zdroj: výkres poskytnul Ing. Jan Krystek, Ph.D. ]

Jako vhodný materiál pro výrobu kotevní stoličky jsem zvolil konstrukční ocel S235. Hlavním důvodem byla dobrá svařitelnost a opracovatelnost. Rozměry jednotlivých prvků nebyly nijak staticky posuzovány. Tloušťky plechů byly zvoleny

podle mé zkušenosti a zkušenosti mistra ve výrobě. Stolička při experimentu nevykazovala deformace ani posuvy. Výkresová dokumentace viz (obr. č. 14).



Obrázek č. 14 – Výrobní dokumentace stoličky  
[Zdroj: autor diplomové práce]

Před zvolením smýkaného profilu bylo nutné provést předběžný výpočet únosnosti ve smyku, z důvodu omezené tlakové síly, kterou dokáže trhačka vyvinout. Tato síla činí 50kN. Při ploše čtvercové trubky 50/50/6 která je cca 1056mm<sup>2</sup>.

Vybrané lepidlo Scotch-Weld™ Lepidlo EPX™ DP490 je ve velké míře využíváno pro lepení kompozitních dílů zejména v automobilovém průmyslu. Jde o thixotropní dvousložkové epoxidové lepidlo, které dle podkladů od výrobce je vhodné pro spoje s požadavky na vysokou únosnost, teplotní odolnost a odolnost proti povětrnostním vlivům. Z tohoto důvodu je vhodné taktéž pro využití ve stavebnictví. Dle tabulky od výrobce udávající pevnost lepidla, bylo lepidlo zkoušeno ve 2 vytvrzovacích cyklech. Další podrobnosti o lepidle viz. **Příloha č. 1**.

1. cyklus vytvrzování trval 7 dní při 23 °C
2. cyklus vytvrzování trval 24h při 23 °C a 1h při 80 °C

Teplota (°C)	Pevnost ve stříhu (1) (N/mm <sup>2</sup> )	Pevnost ve stříhu (2) (N/mm <sup>2</sup> )	Pevnost adheze DaN/cm
-55	23,7	31,6	neuvádí se
23	30	28,7	9,24
80	11,9	12,7	7,32
120	2,8	3,2	neuvádí se
150	1,9	1,7	neuvádí se

Tab. č. 1 – Pevnost lepidla Scotch-Weld™ Lepidlo EPX™ DP490  
[Zdroj: <https://www.azktrade.cz/publicdoc/dp-490.pdf>]

**Výpočet:**

$$\tau = \frac{F}{A}$$

$$\tau = \frac{50000}{1056} = 47,35 \text{ N/mm}^2$$

$$30 < 47,35 \text{ N/mm}^2$$

**Závěr výpočtu:** Trhačka dokáže vyvinout dostatečný tlak pro překonání pevnosti lepidla lepeného spoji.



## 4.2. Příprava testovaných vzorků

### 4.2.1. Řezání

Po výrobě „stoličky“ a předběžném výpočtu pro zvolení smýkaného profilu, bylo možné připravit testovací vzorky. Kompozitní H profily vyztužené skelnou výztuží v polyesterové pryskyřici dvou velikostí H150/75/8 a H120/60/6 byly nařezány na cca 170mm dlouhé prvky. Čtvercové trubky 50/50/6 byly nařezány na 50mm dlouhé prvky. Do stojných H profilů jsem vyvrtal kotevní otvory souhlasné s upínací stoličkou. Při řezání i vrtání je nutné mít bezpečnostní pomůcky jako je respirátor a ochranné brýle. Materiálové vlastnosti viz. **Příloha č. 2**.

### 4.2.2. Série měření

Z důvodu omezeného množství testovacích vzorků jsme rozdělili experimentální část do dvou sérií po 7 vzorcích. V každé sérii byly 3 vzorky H150/75/8 s rozptýlenou výztuží při povrchu a 4 vzorky H120/60/6 s podélnou výztuží v celém profilu.

První série lepení byla provedena lepidlem Scotch-Weld™ Lepidlo EPX™ DP490. Vzorky první série byly podchlazeny na cca 10°C, vzorky druhé série byly zahřáty na normální pokojovou teplotu 21°C.

### 4.2.3. Pracovní postup lepení

- 1.) V místech plánovaného lepeného spoje je nejdříve potřeba zajistit dostatečnou přilnavost. Toho docílíme mechanickým porušením hladké plochy kompozitního profilu, použijeme smirkový papír různých hrubostí.
- 2.) Vzorek očistíme od prachu
- 3.) Jako odmašťovač jsem zvolil líh ve spreji, správné odmaštění má zásadní vliv na finální pevnost lepeného spoje
- 4.) Rozměření a umístění lepeného spoje. Čtvercový profil jsem umístil tak, aby tlačná hlava trhačky při zkoušce nenarazila do stojného H profilu.
- 5.) Dvousložkové lepidlo Scotch-Weld™ Lepidlo EPX™ DP490 se mísí v poměru 1:1. Při použití ručního aplikátoru 3M EPX™ a směsné trysky Quadro je nanášení lepidla snadné. Rovnoměrným vytlačováním lepidla se dávkuje stejné množství obou složek, které se mísí v trysce.
- 6.) Lepidlo jsem následně rovnoměrně roznesl po celé ploše čtvercového profilu ocelovou špachtlí.
- 7.) Následovalo osazení obou adherentů a jejich zatížení (obr. č.15). Vzorky byly pak podle označení umístěny do jednotlivých prostředí.



Obrázek č. 15 – Lepení vzorku - zatížení  
[Zdroj: autor diplomové práce]

#### 4.2.4. Dělení vzorku a jejich označení

##### Vzorek RT\_1

- Vzorek byl před lepením podchlazen na 10°C
- Stojný H150/75/8 profil s rozptýlenou výztuží při povrchu
- Doba vytvrzování 7 dní v laboratorních podmínkách při 20°C

##### Vzorek RT\_2

- Vzorek byl před lepením podchlazen na 10°C
- Stojný H150/75/8 profil s rozptýlenou výztuží při povrchu
- Doba vytvrzování 7 dní v laboratorních podmínkách při 20°C

##### Vzorek RT\_3

- Vzorek byl před lepením podchlazen na 10°C
- Stojný H150/75/8 profil s rozptýlenou výztuží při povrchu
- Doba vytvrzování 7 dní v laboratorních podmínkách při 20°C

##### Vzorek OUT\_1

- Vzorek byl před lepením podchlazen na 10°C
- Stojný H120/60/6 profil s rozptýlenou výztuží při povrchu
- Doba vytvrzování 7 dní, 2dny v laboratorních podmínkách 5 dní v exteriéru, v době od 18. do 22. listopadu, denní teploty se pohybovaly mezi 9-15°C noční teploty od -2 do +4°C, za občasného deště

##### Vzorek OUT\_2

- Vzorek byl před lepením podchlazen na 10°C
- Stojný H120/60/6 profil s rozptýlenou výztuží při povrchu
- Doba vytvrzování 7 dní, 2dny v laboratorních podmínkách 5 dní v exteriéru, v době od 18. do 22. listopadu, denní teploty se pohybovaly mezi 9-15°C noční teploty od -2 do +4°C, za občasného deště

### Vzorek ICE\_1

- Vzorek byl před lepením podchlazen na 10°C
- Stojný H120/60/6 profil s rozptýlenou výztuží při povrchu
- Doba vytvrzování 7 dní, 2dny v laboratorních podmínkách a 5 dní v laboratorním mrazáku při -12°C

### Vzorek ICE\_2

- Vzorek byl před lepením podchlazen na 10°C
- Stojný H120/60/6 profil s rozptýlenou výztuží při povrchu
- Doba vytvrzování 7 dní, 2dny v laboratorních podmínkách a 5 dní v laboratorním mrazáku při -12°C

### Vzorek RT\_8

- Vzorek měl před lepením teplotu 21°C
- Stojný H150/75/8 profil s rozptýlenou výztuží při povrchu
- Doba vytvrzování 7 dní v laboratorních podmínkách při 20°C

### Vzorek RT\_9

- Vzorek měl před lepením teplotu 21°C
- Stojný H150/75/8 profil s rozptýlenou výztuží při povrchu
- Doba vytvrzování 7 dní v laboratorních podmínkách při 20°C

### Vzorek RT\_10

- Vzorek měl před lepením teplotu 21°C
- Stojný H150/75/8 profil s rozptýlenou výztuží při povrchu
- Doba vytvrzování 7 dní v laboratorních podmínkách při 20°C

### Vzorek RT\_11

- Vzorek měl před lepením teplotu 21°C
- Stojný H120/60/6 profil s rozptýlenou výztuží při povrchu
- Doba vytvrzování 7 dní v laboratorních podmínkách při 20°C

## Vzorek RT\_12

- Vzorek měl před lepením teplotu 21°C
- Stojný H120/60/6 profil s rozptýlenou výztuží při povrchu
- Doba vytvrzování 7 dní v laboratorních podmínkách při 20°C

## Vzorek RT\_13

- Vzorek měl před lepením teplotu 21°C
- Stojný H120/60/6 profil s rozptýlenou výztuží při povrchu
- Doba vytvrzování 7 dní v laboratorních podmínkách při 20°C

## Vzorek RT\_14

- Vzorek měl před lepením teplotu 21°C
- Stojný H120/60/6 profil s rozptýlenou výztuží při povrchu
- Doba vytvrzování 7 dní v laboratorních podmínkách při 20°C

## 4.3. Experiment

Na trhačce, která je umístěna na FAV, jsme nejdříve s Ing. Janem Krystkem, Ph.D. odstranili upínací zařízení, které je umístěno na stole trhačky. Místo tohoto zařízení jsme upnuli kotevní „stoličku“ se vzorkem RT\_1. Do trhací hlavy jsme upnuli ocelovou desku, která měla rozměry 130/100/10mm. Tato ocelová deska měla sražené hrany (2 mm), pro lepší koncentraci napětí, a aby nebyly drceny návalky lepidla, čímž by byl test ovlivněn. Mezi H stojinou a tlačnou deskou jsme nastavili distanci cca 1 mm, proto aby se tlačná deska nevzepřela do stojného H profilu. Po vystředění vzorku a hlavy jsme nastavili osvětlení, fotoaparáty a kameru pro dostatečný záznam o experimentu (obr. č. 16). Nastavili jsme extenzometr pro měření deformace.

Následovalo nastavení zatěžování a rychlost posuvu tlačné hlavy trhačky. Z důvodu ojedinělého testu jsme zvolili pomalejší posuv 1 mm/min. Hodnotu předzatížení jsme zvolili 5 N, tato hodnota znamená zatížení, od kterého začíná počítat evidovat hodnoty zatížení a posuvů. Při testu jsme měřily 4 hodnoty zatížení, čas, posuv tlačné hlavy a deformaci extenzometrem.



Obrázek č. 16 – Příprava před experimentem  
[Zdroj: autor diplomové práce]

#### 4.4. Popis experimentu

Úkolem experimentu bylo zatěžovat krátkou konzolu co nejlépe vetknutí (obr. č. 17), aby došlo k eliminaci namáhání ohybovým momentem. Vzorek byl zatěžován až do úplného kolapsu spoje.

Pro následné zpracování bylo nutné zajistit pouze namáhání smykem. Při experimentu byly zaznamenávány 4 hodnoty, jak již bylo zmíněno. Tyto hodnoty byly ukládány do stolního počítače, který je napojen na trhací stroj. Trhačka vysílá informace do PC každou tisícinu sekundy, proto získané hodnoty z důvodu velkého množství dat nelze zpracovat jinak než graficky. Počítač automaticky vygeneroval maximální zatěžovací sílu a k ní vázanou deformaci.

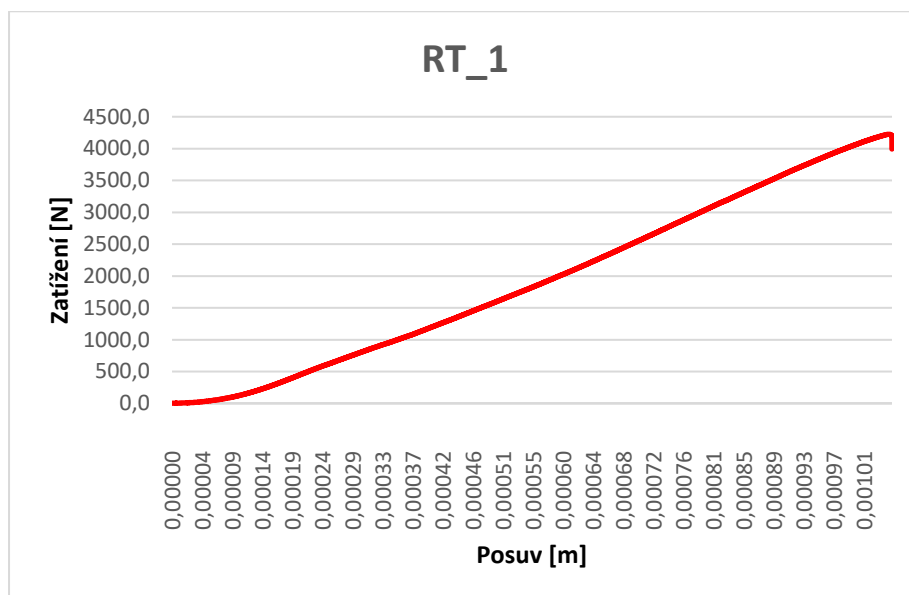


Obrázek č. 17 – Ukázka zatěžování vzorku  
[Zdroj: autor diplomové práce]

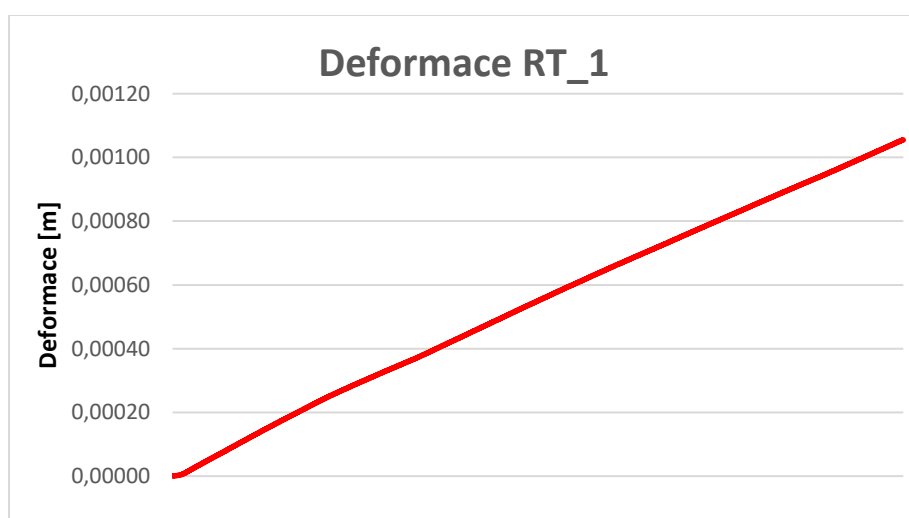
## 5. Měřené hodnoty – vzorky s rozptýlenou výztuží

### 5.1. Vzorek RT\_1

- Maximální síla: 4220 N
- Deformace při  $F_{\max}$ : 1,1 mm
- Doba testu: 73,25 s
- Datum testu: 22.11. 2019



Graf č. 3 – Vzorek RT\_1 – závislost zatížení na posuvu tlačné hlavy  
[Zdroj: autor diplomové práce]

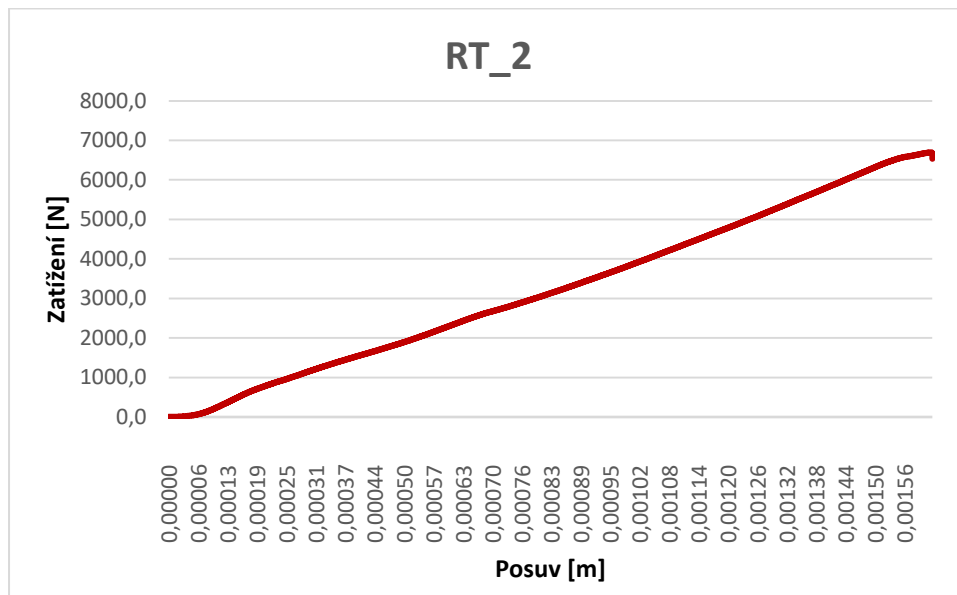


Graf č. 4 – Vzorek RT\_1 – průběh deformace  
[Zdroj: autor diplomové práce]

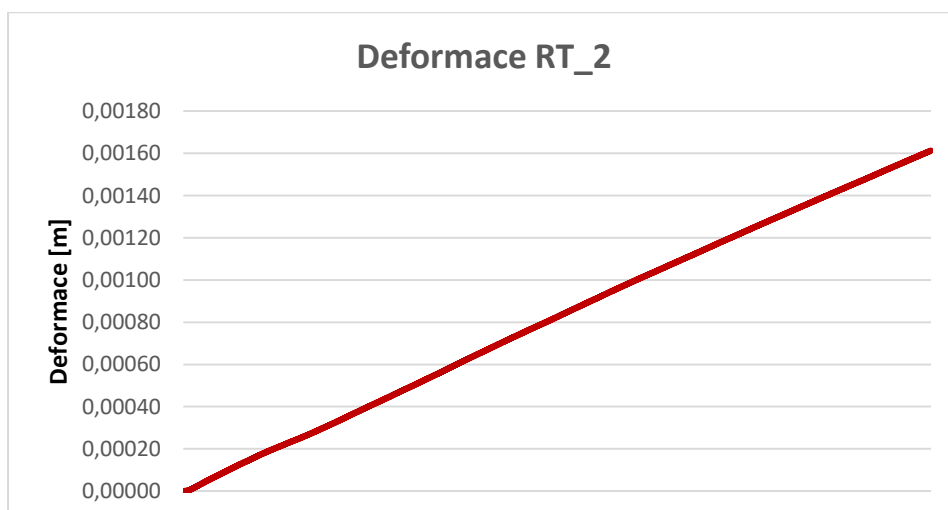


## 5.2. Vzorek RT\_2

- Maximální síla: 6700 N
- Deformace při  $F_{\max}$ : 1,6 mm
- Doba testu: 111,30 s
- Datum testu: 22.11. 2019



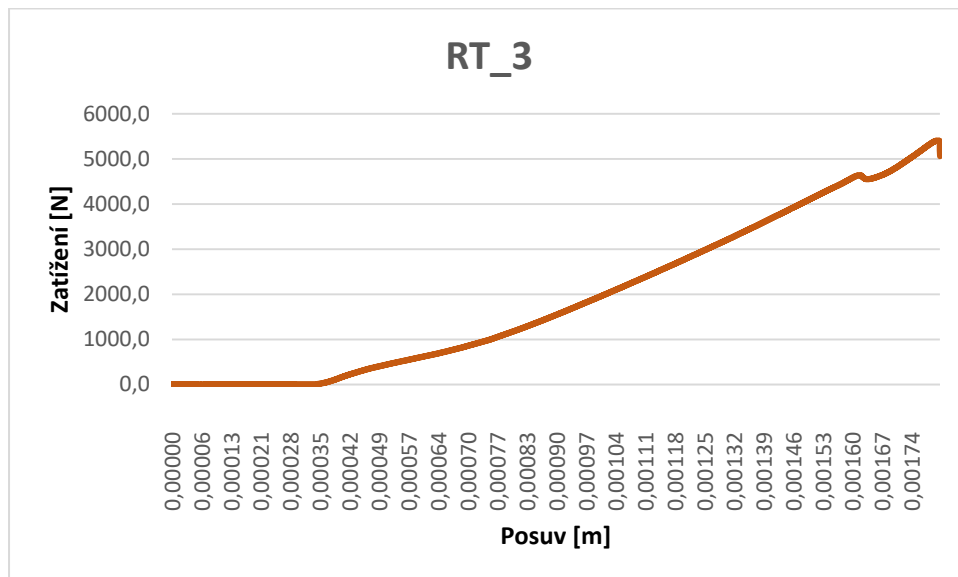
Graf č. 5 – Vzorek RT\_2 – závislost zatížení na posuvu tlačné hlavy  
[Zdroj: autor diplomové práce]



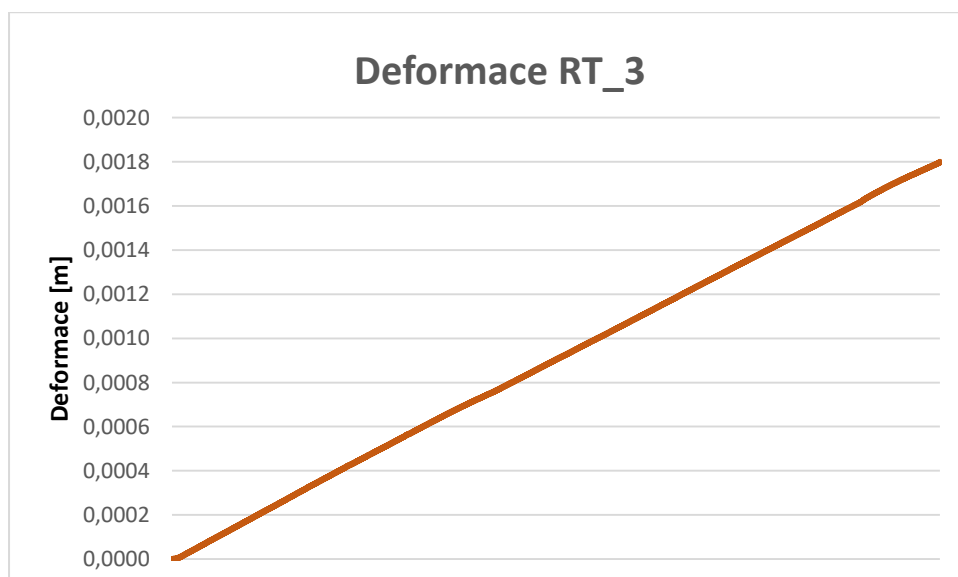
Graf č. 6 – Vzorek RT\_2 – průběh deformace  
[Zdroj: autor diplomové práce]

### 5.3. Vzorek RT\_3

- Maximální síla: 5410 N
- Deformace při  $F_{\max}$ : 1,8 mm
- Doba testu: 115,28 s
- Datum testu: 22.11. 2019

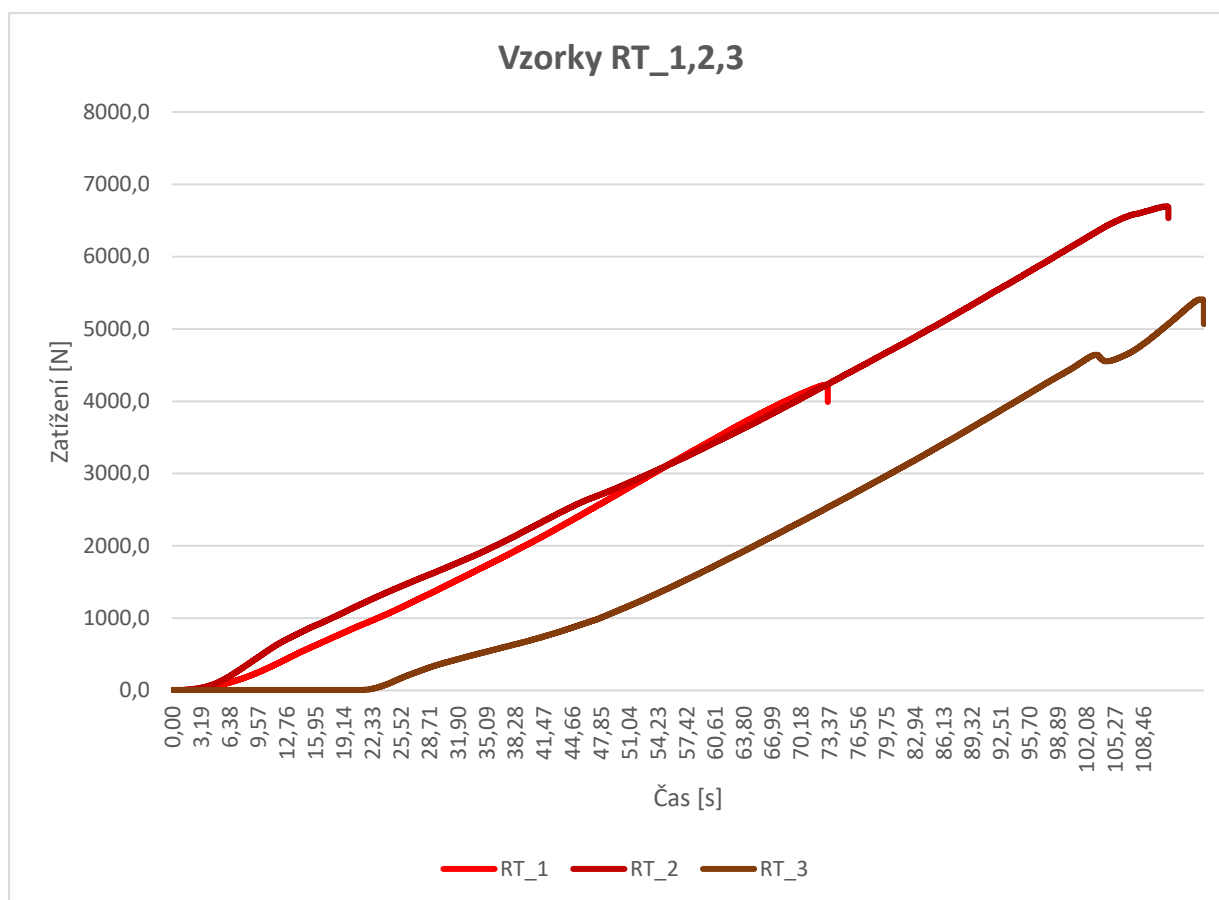


Graf č. 7 – Vzorek RT\_3 – závislost zatížení na posuvu tlačné hlavy  
[Zdroj: autor diplomové práce]



Graf č. 8 – Vzorek RT\_3 – průběh deformace  
[Zdroj: autor diplomové práce]

## 5.4. Vyhodnocení vzorků RT\_1,2,3



Graf č. 9 – Porovnání vzorků RT\_1,2,3  
[Zdroj: autor diplomové práce]

U vzorku RT\_1 se projevilo adhezní porušení, které zapříčinilo předčasný kolaps vzorku. Pro další zpracování jsem vzorek RT\_1 vyřadil.

Získaná data z experimentu jsem využil, jako vstupní informace pro statistické vyhodnocení únosnosti spoje. Dalšími vstupy byly geometrické charakteristiky.

Změřením rozměrů smýkaného čtvercového profilu 50/50/6 mm jsem zjistil poměrně závažné rozdíly v tloušťkách stěn. Tloušťka stěn profilu se pohybovala v rozmezí 5,9-6,6 mm. Průměrná hodnota těchto hodnot je  $t = 6,2$  mm, tuto hodnotu jsem zvolil jako základní konstantu. Vnitřní průřez měl taktéž poměrně značné nepřesnosti v rozměru. Průměrná světlost mezi stěnami čtvercového průřezu byla 37,0 mm.

Velikost zatěžovací síly je taktéž průměrná hodnota z výsledků experimentů RT\_2 a RT\_3, která činí 6055 N.

Histogram area-s.dis jsem zvolil proto, že jsem měl pouze dvě dostupné hodnoty, které jsou ve velkém rozptylu. Předpokládám, že obě hodnoty jsou extrémní daného rozptylu, a proto jsem zvolil histogram s 10% rozptylem od průměru.

### Naměřené hodnoty

$$\text{Plocha } A = 1056 \text{ mm}^2$$

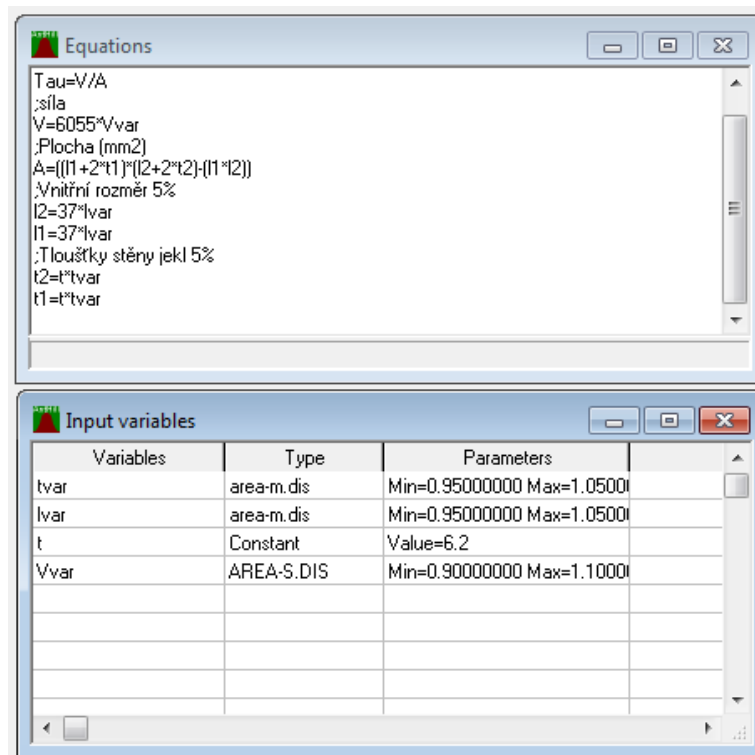
$$F_{\max,2} = 6700 \text{ N}$$

$$F_{\max,3} = 5410 \text{ N}$$

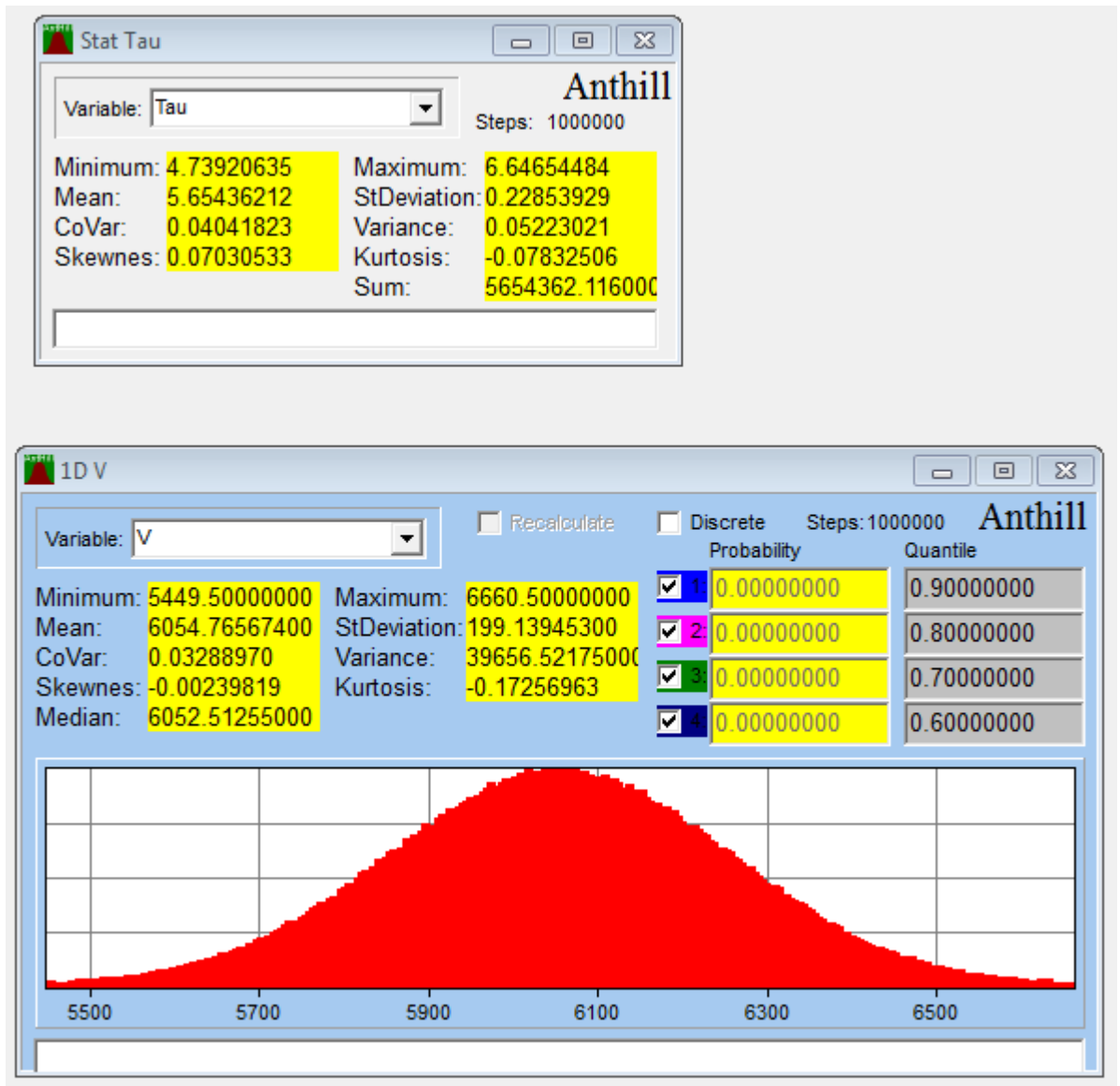
$$\tau_2 = \frac{6700}{1056} = 6,34 \text{ MPa}$$

$$\tau_3 = \frac{5410}{1056} = 5,123 \text{ MPa}$$

### Výpočet v Anthill



Obrázek č. 18 – Nastavení výpočtu RT\_2,3  
[Zdroj: autor diplomové práce]

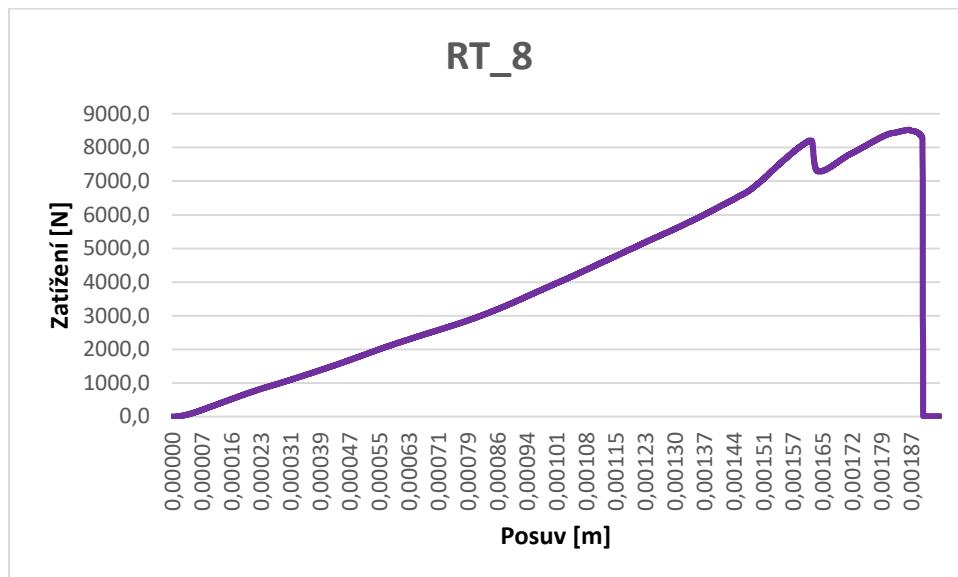


Obrázek č. 19 – Výpočet v Anthill pro vzorky RT\_2,3  
[Zdroj: autor diplomové práce]

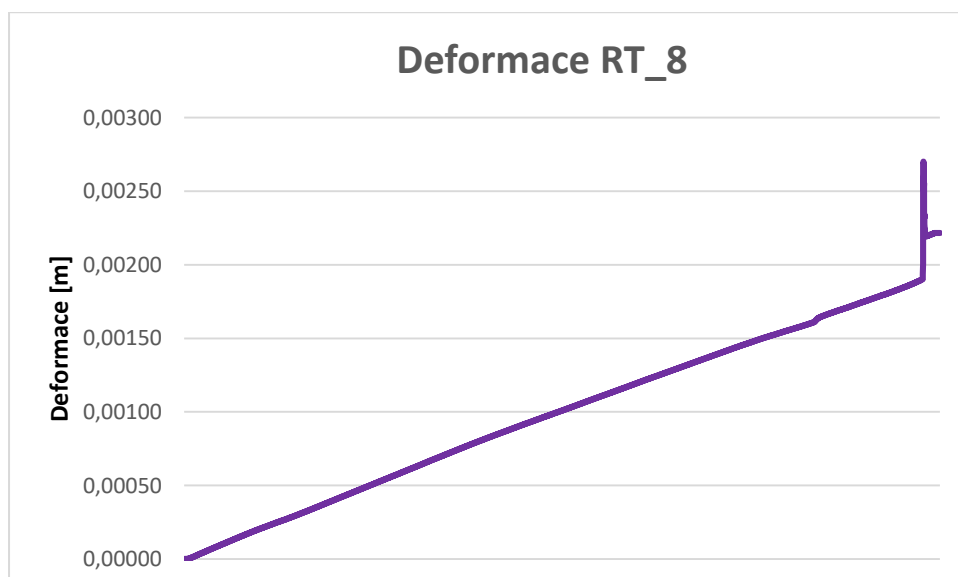
Parametry výpočtu jsou nastaveny tak aby rozsah zatěžujících sil byl v rozsahu měření. Výpočtem, kde jsou všechny hodnoty proměnné, získáme statistický rozptyl hodnot únosnosti spoje. Statistická únosnost spoje se pohybuje v rozmezí 4,74 – 6,64 MPa, s mediánem 5,65 MPa. Výpočet odpovídá naměřeným hodnotám.

## 5.5. Vzorek RT\_8

- Maximální síla: 8530 N
- Deformace při  $F_{\max}$ : 1,9 mm
- Doba testu: 138,23s
- Datum testu: 2.12. 2019



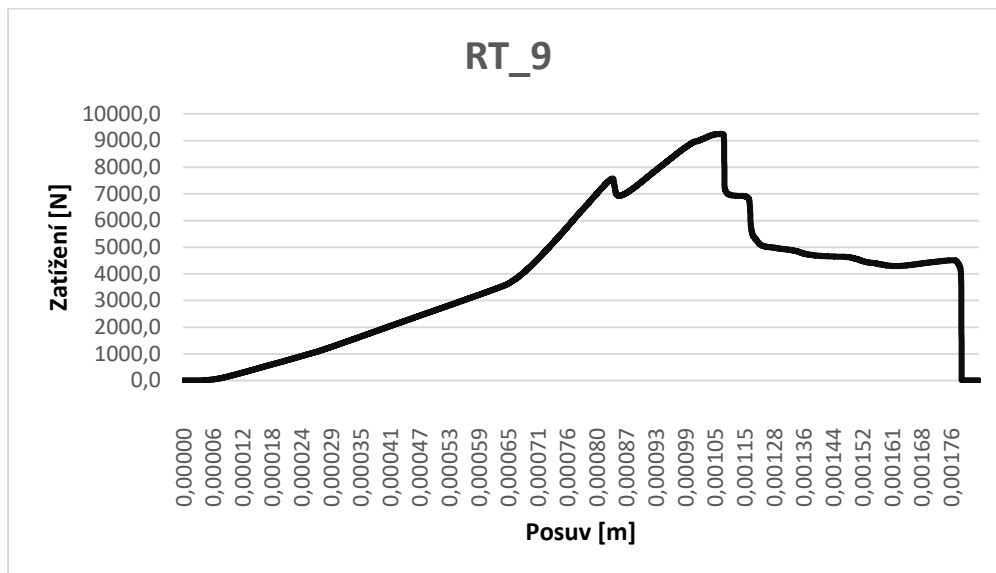
Graf č. 10 – Vzorek RT\_8 – závislost zatížení na posuvu tlačné hlavy  
[Zdroj: autor diplomové práce]



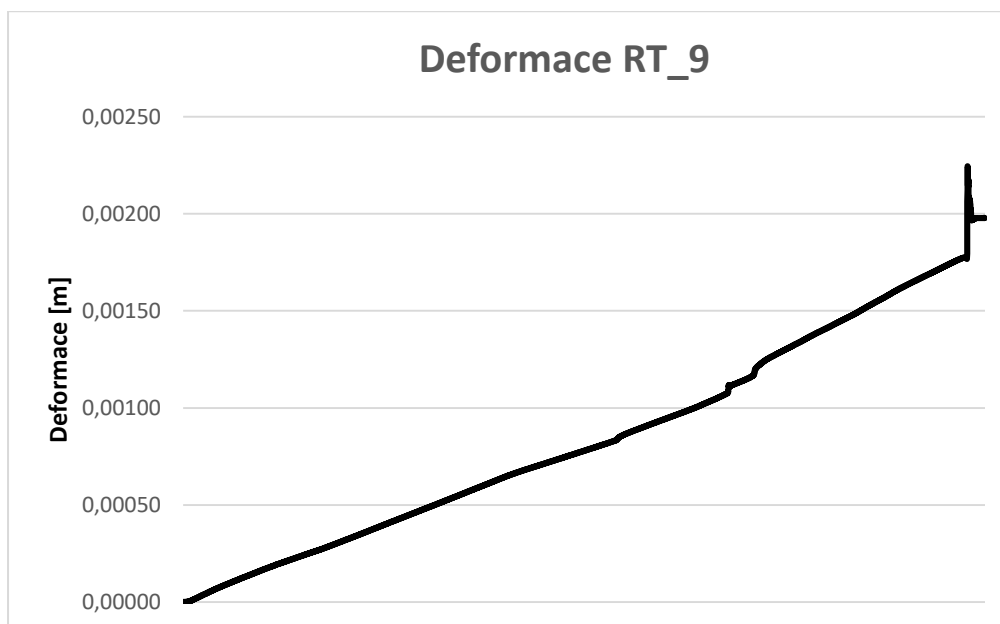
Graf č. 11 – Vzorek RT\_8 – průběh deformace  
[Zdroj: autor diplomové práce]

## 5.6. Vzorek RT\_9

- Maximální síla: 9250 N
- Deformace při  $F_{\max}$ : 1,1 mm
- Doba testu: 121,55 s
- Datum testu: 2.12. 2019



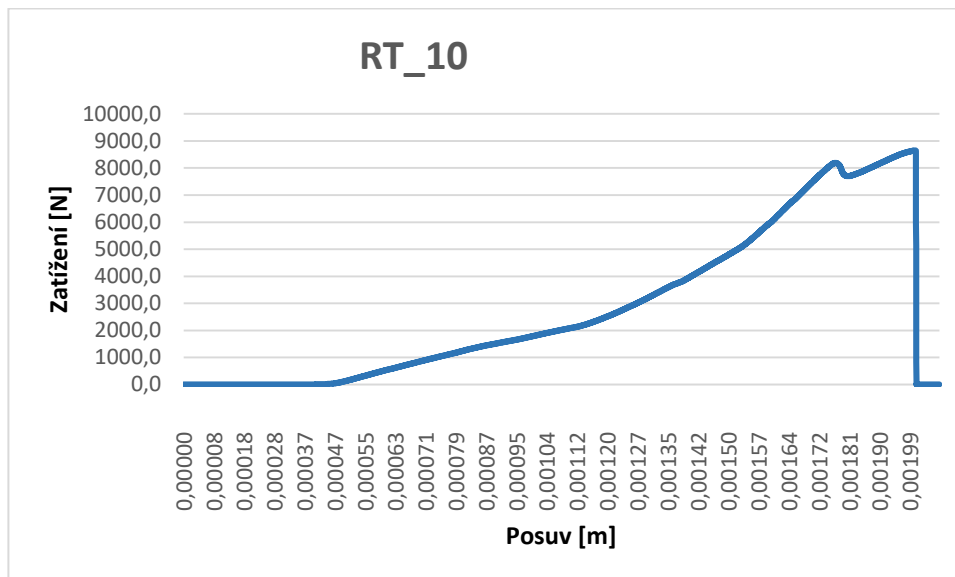
Graf č. 12 – Vzorek RT\_9 – závislost zatížení na posuvu tlačné hlavy  
[Zdroj: autor diplomové práce]



Graf č. 13 – Vzorek RT\_9 – průběh deformace  
[Zdroj: autor diplomové práce]

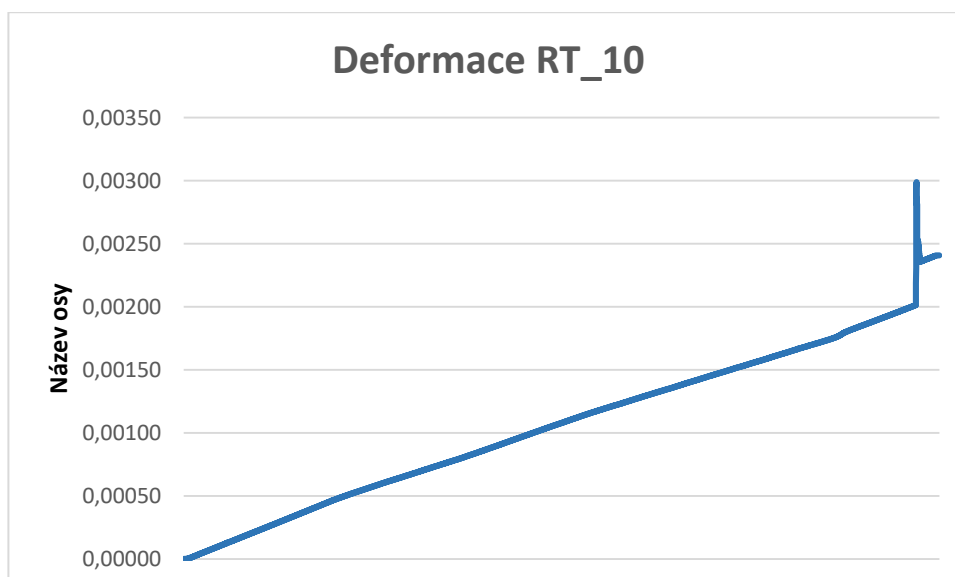
## 5.7. Vzorek RT\_10

- Maximální síla: 8650 N
- Deformace při  $F_{\max}$ : 2,0 mm
- Doba testu: 147,59 s
- Datum testu: 2.12. 2019



Graf č. 14 – Vzorek RT\_10 – závislost zatížení na posuvu tlačné hlavy

[Zdroj: autor diplomové práce]

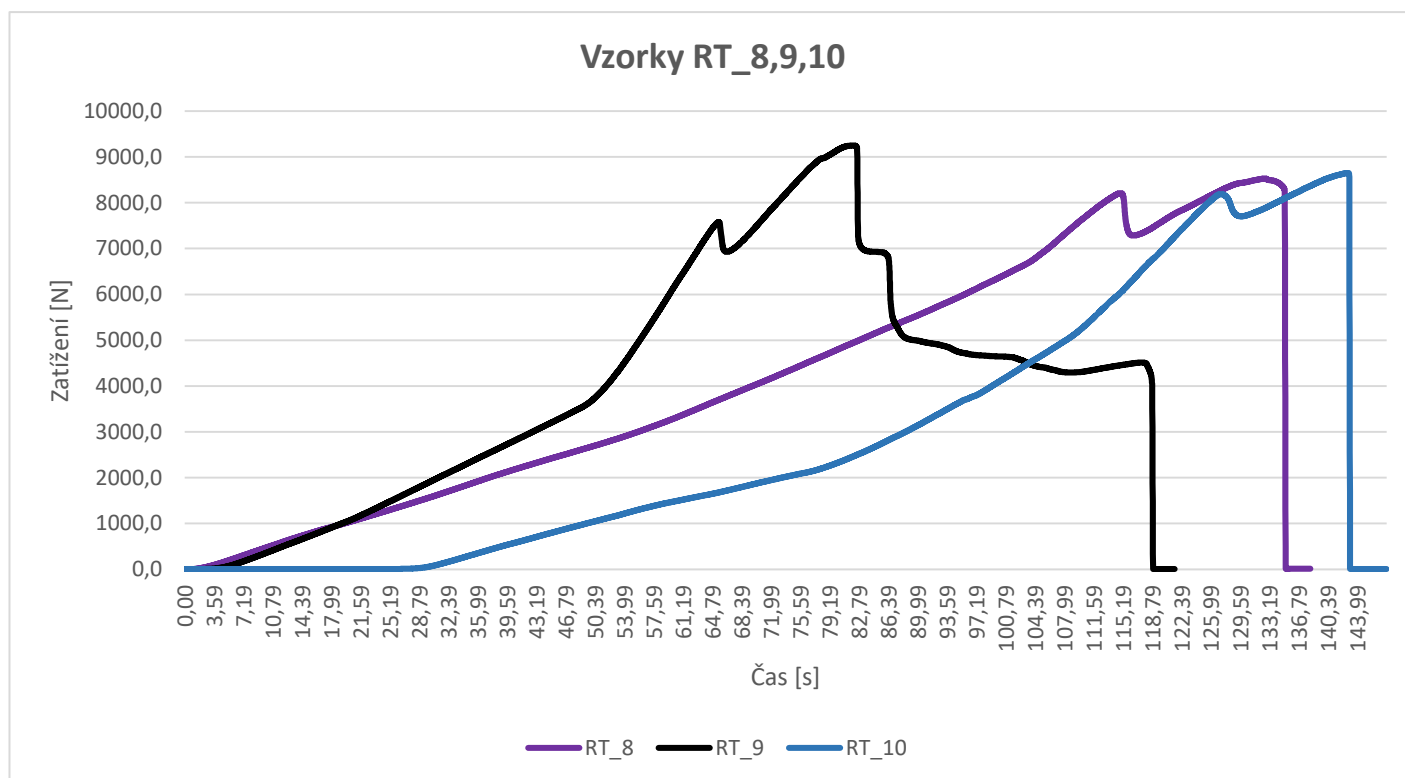


Graf č. 15 – Vzorek RT\_10 – průběh deformace

[Zdroj: autor diplomové práce]



## 5.8. Vyhodnocení vzorků RT\_8,9,10



Graf č. 16 – Porovnání vzorků RT\_8,9,10

[Zdroj: autor diplomové práce]

Vzorek RT\_9 se vymyká svým průběhem, a únosností. Po dosažení maximální síly je patrný náhlý pokles zatížení. Následuje okamžik, když prvek je schopen nést cca 50% maximálního zatížení než zkolabuje. Tento jev se pak vyskytuje u prvků, které jsou vyztuženy při povrchu podélnou výztuží. Myslím, že tento jev se dá přisoudit delším vláknům při povrchu matrice.

Pro vyhodnocení v softwaru AnthHill jsem opět využil totožná vstupní data geometrických rozměrů smýkaného profilu. Tentokrát jsem využil všechny tři naměřené hodnoty, jejich aritmetický průměr je 8810 N.

Jako vhodný histogram pro rozptyl zatížení opět vyšel histogram area-m.dis. Kritériem je zvolil takový rozptyl, aby obsáhl naměřené hodnoty. Pro přesnější zvolení histogramu by bylo potřeba provést více měření.

### Naměřené hodnoty:

Plocha A = 1056mm<sup>2</sup>

F<sub>max,8</sub> = 8530 N

F<sub>max,9</sub> = 9250 N

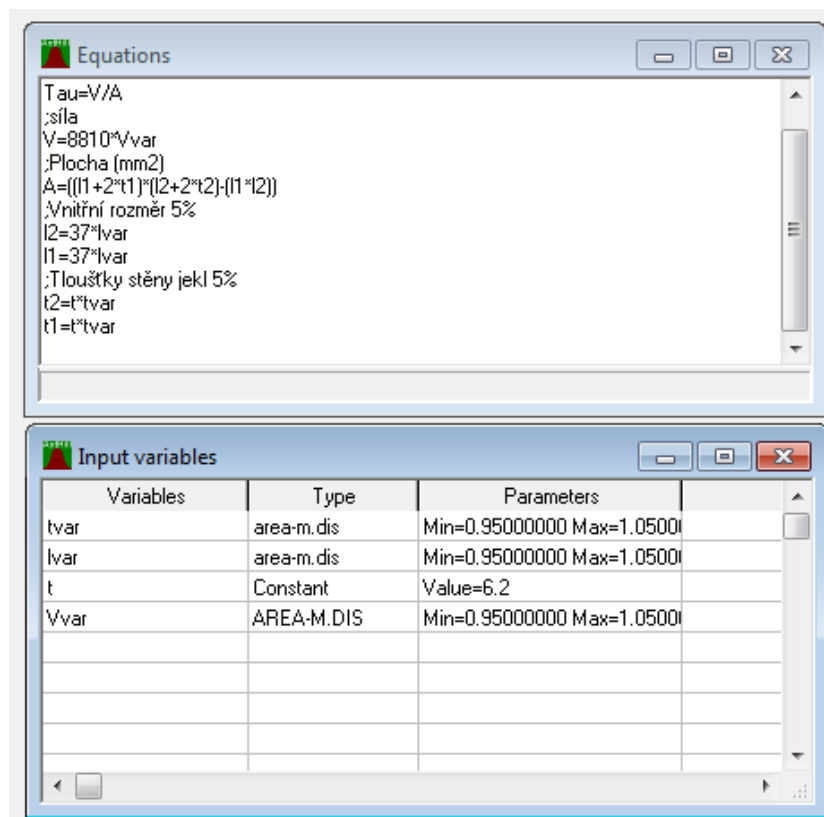
F<sub>max,10</sub> = 8650 N

$$\tau_8 = \frac{8530}{1056} = 8,077 \text{ MPa}$$

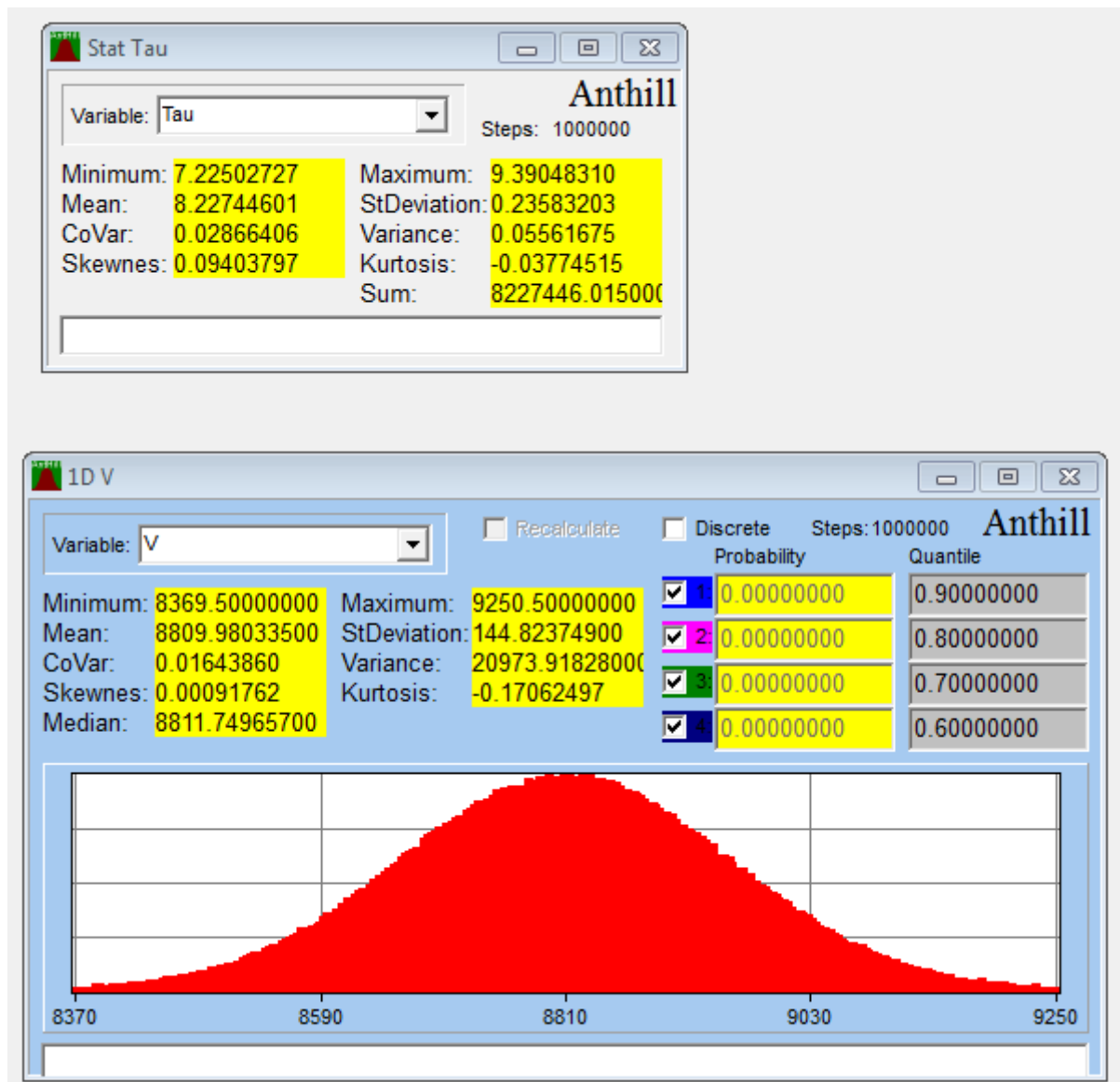
$$\tau_9 = \frac{9250}{1056} = 8,759 \text{ MPa}$$

$$\tau_{10} = \frac{8650}{1056} = 8,191 \text{ MPa}$$

### Výpočet v Anthill



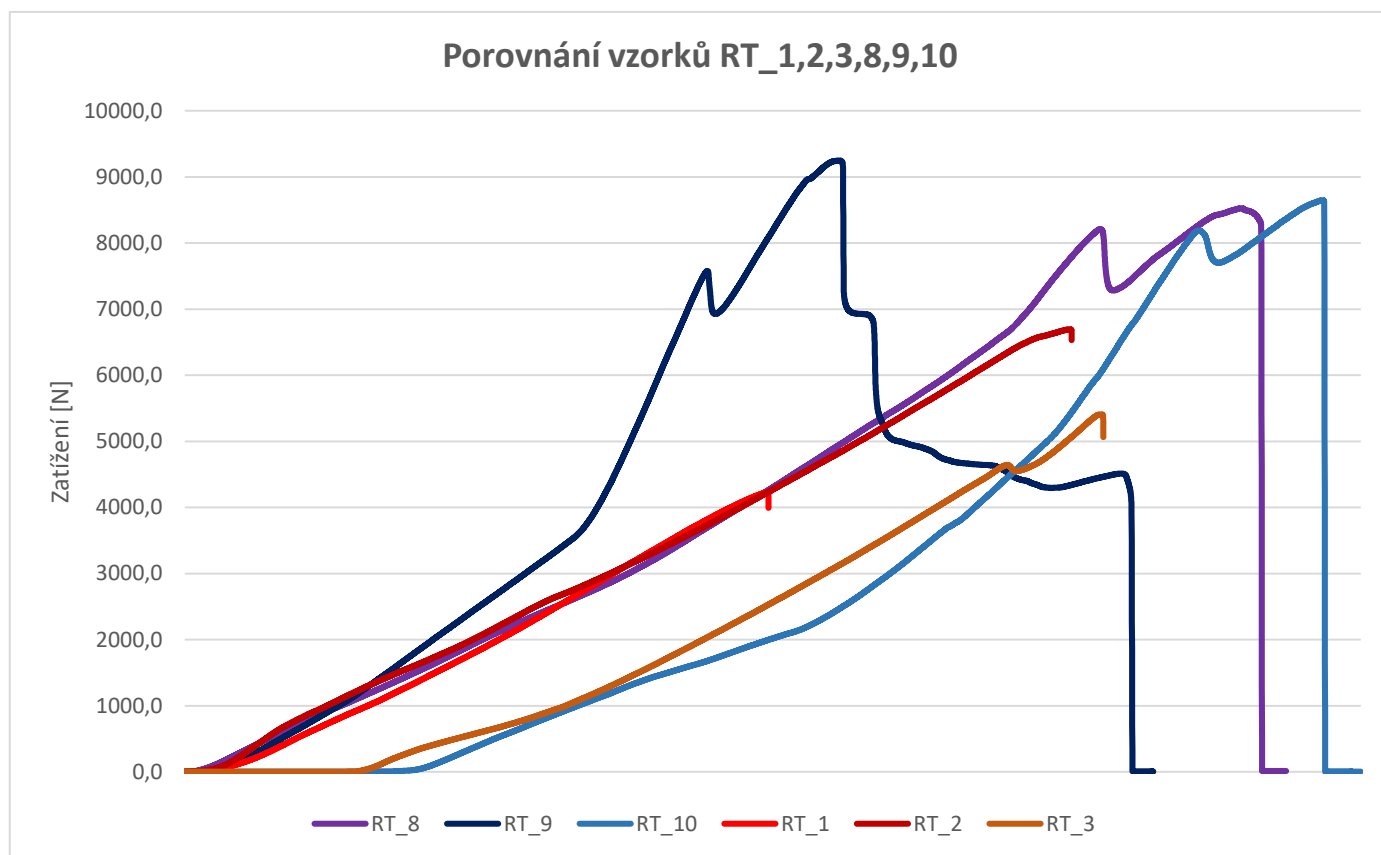
Obrázek č. 20 – Nastavení výpočtu RT\_8,9,10  
[Zdroj: autor diplomové práce]



Obrázek č. 21 – Výpočet v Anthill pro vzorky RT\_8,9,10  
[Zdroj: autor diplomové práce]

Statistická únosnost spoje se pohybuje v rozmezí 7,22 – 9,39 MPa, s mediánem 8,23 MPa. Výpočet odpovídá naměřeným hodnotám. Hodnota naměřeného zatížení u vzorku RT\_9 je brána jako extrémní. Důvodem toho závěru je i naprosto rozdílný průběh zatížení tohoto vzorku.

## 5.9. Vyhodnocení testu – vzorky s rozptýlenou výztuží



Graf č. 17 – Porovnání vzorků RT\_1,2,3,8,9,10

[Zdroj: autor diplomové práce]

Zkoušené vzorky, které byly nepodchlazeny před lepením, vykazují vyšší pevnost, než vzorky podchlazené před lepením. Statistický medián pevnosti nepodchlazených vzorků je 8,22 MPa zato u podchlazených vzorků je tato pevnost 5,65 MPa. Tento rozdíl tvoří 31% pokles pevnosti.

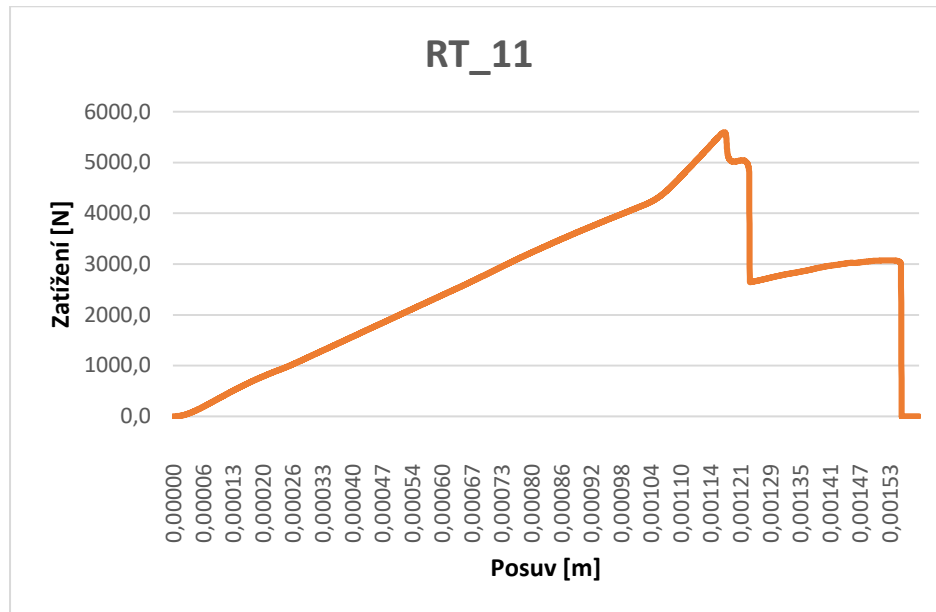
Vzorek RT\_1 byl vyřazen, z důvodu chybného nalepení. U vzorku RT\_3 bylo zatížení 5410 N u RT\_9 bylo zatížení silou 9250 N. Rozdíl obou hodnot je 3840 N, což tvoří 42% zatížení.

Podchlazené prvky mají po zatížení maximální hodnotou náhlý a okamžitý kolaps. Nepodchlazené prvky po překonání prvního zpevnění jsou schopny snášet ještě mírné navýšení zatížení, než zkolabují. Kolaps je taktéž poměrně náhlý.

## 6. Měřené hodnoty – vzorky s podélnou výztuží

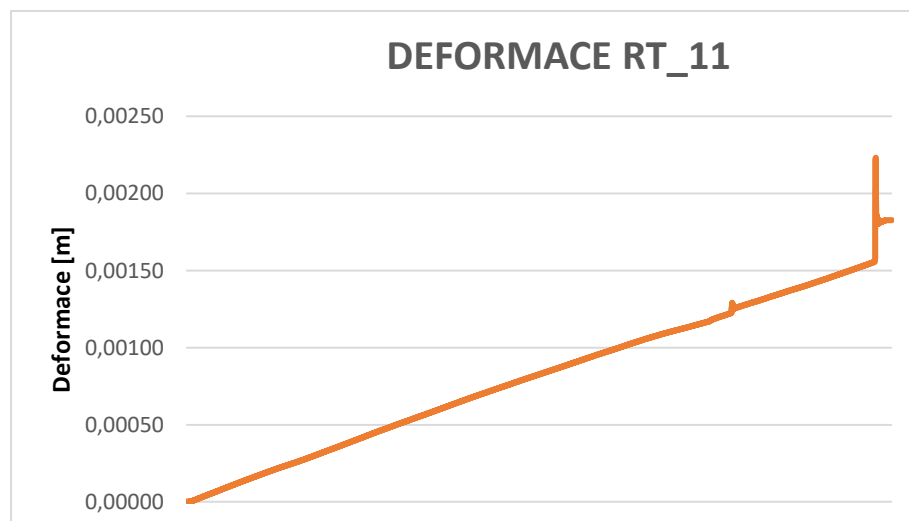
### 6.1. Vzorek RT\_11

- Maximální síla: 5590 N
- Deformace při  $F_{\max}$ : 1,2 mm
- Doba testu: 111,95 s
- Datum testu: 2.12. 2019



Graf č. 18 – Vzorek RT\_11 – závislost zatížení na posuvu tlačné hlavy

[Zdroj: autor diplomové práce]

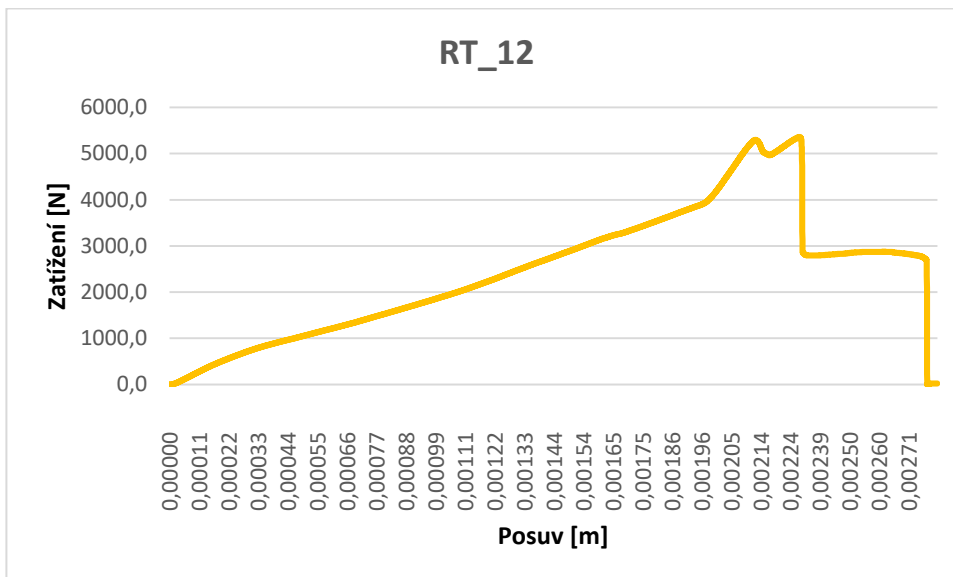


Graf č. 19 – Vzorek RT\_11 – průběh deformace

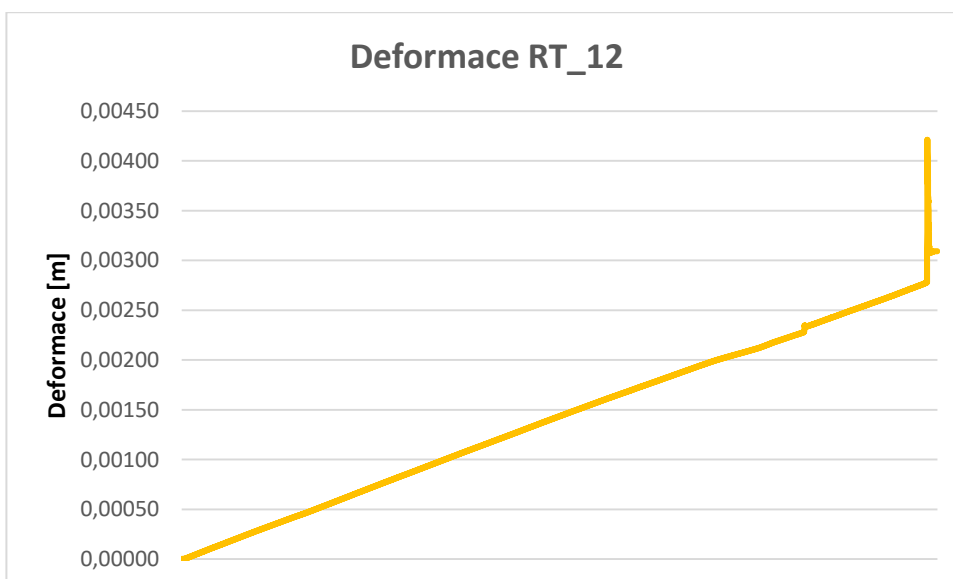
[Zdroj: autor diplomové práce]

## 6.2. Vzorek RT\_12

- Maximální síla: 5360 N
- Deformace při  $F_{\max}$ : 2,3 mm
- Doba testu: 192,98 s
- Datum testu: 2.12. 2019



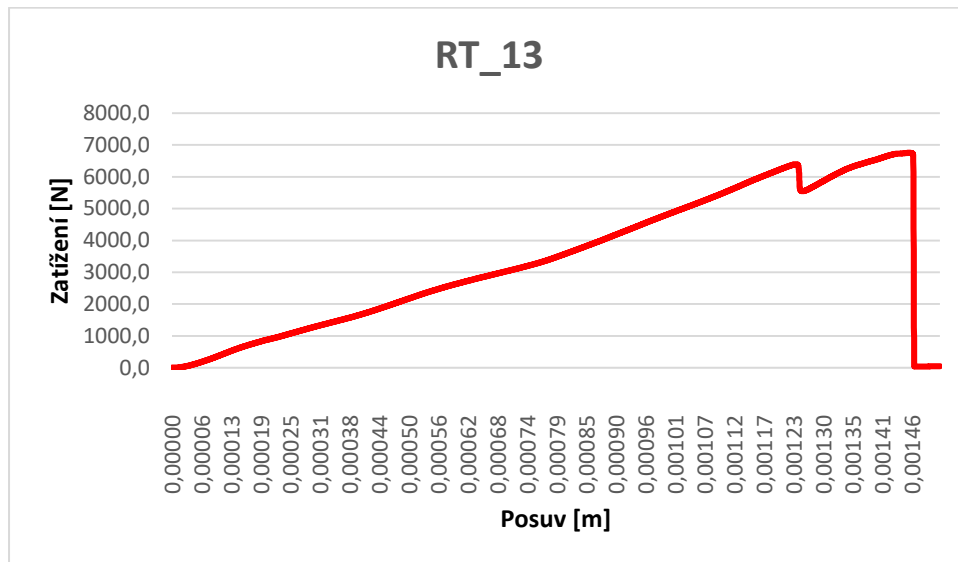
Graf č. 20 – Vzorek RT\_12 – závislost zatížení na posuvu tlačné hlavy  
[Zdroj: autor diplomové práce]



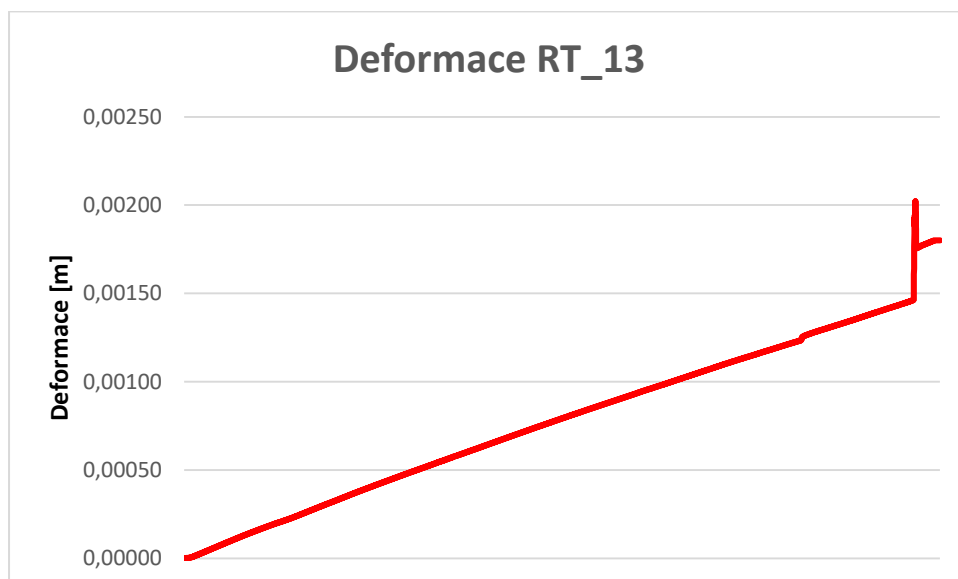
Graf č. 21 – Vzorek RT\_12 – průběh deformace  
[Zdroj: autor diplomové práce]

### 6.3. Vzorek RT\_13

- Maximální síla: 6750 N
- Deformace při  $F_{\max}$ : 1,5 mm
- Doba testu: 110,81 s
- Datum testu: 2.12. 2019



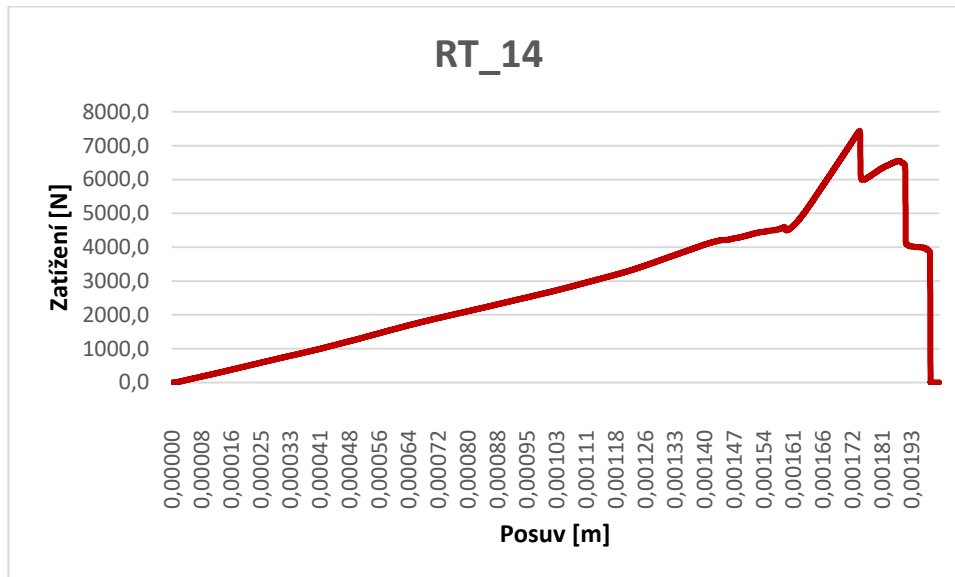
Graf č. 22 – Vzorek RT\_13 – závislost zatížení na posuvu tlačné hlavy  
[Zdroj: autor diplomové práce]



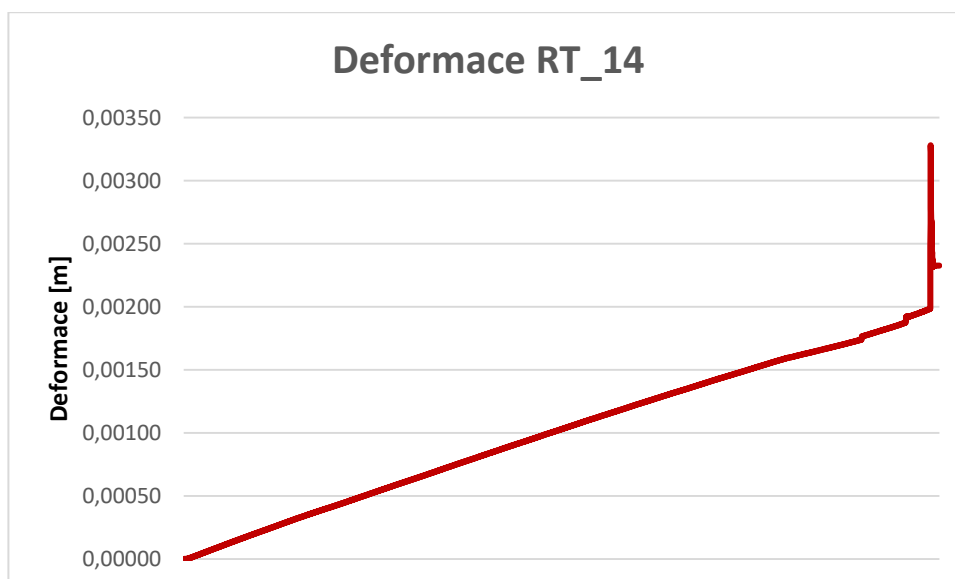
Graf č. 23 – Vzorek RT\_13 – průběh deformace  
[Zdroj: autor diplomové práce]

## 6.4. Vzorek RT\_14

- Maximální síla: 7440 N
- Deformace při  $F_{\max}$ : 1,7 mm
- Doba testu: 143,55 s
- Datum testu: 2.12. 2019



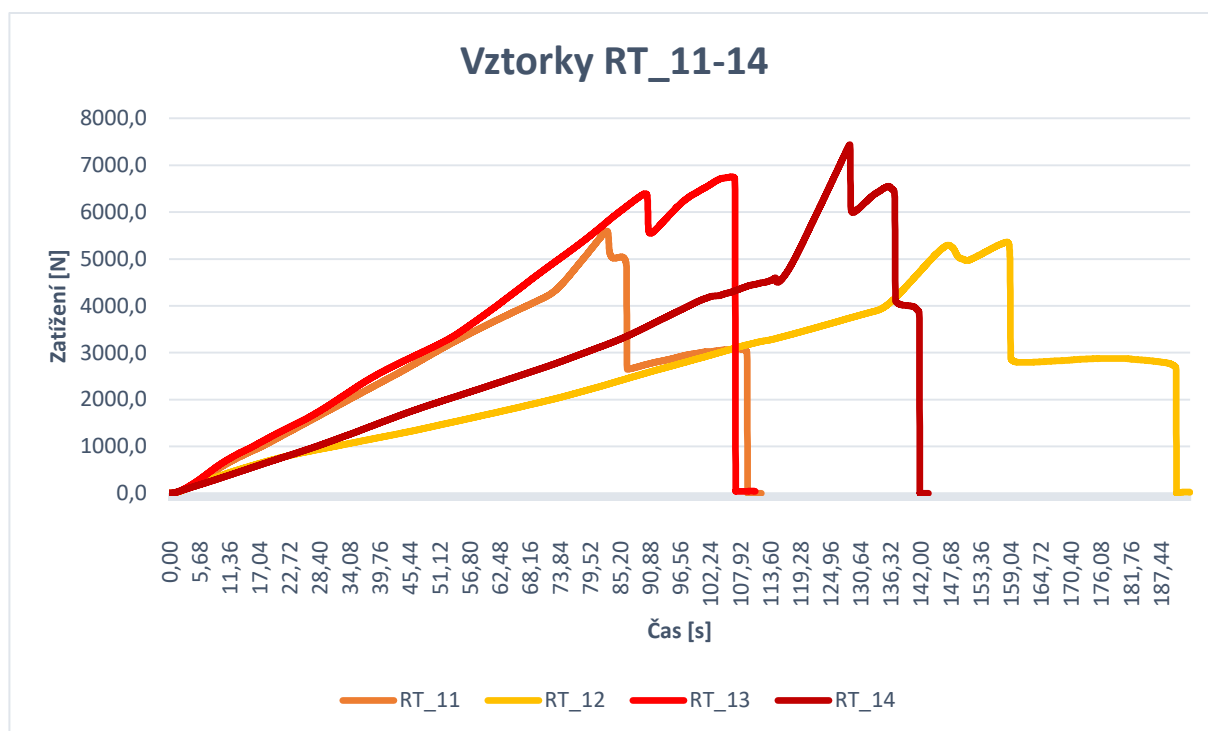
Graf č. 24 – Vzorek RT\_14 – závislost zatížení na posuvu tlačné hlavy  
[Zdroj: autor diplomové práce]



Graf č. 25 – Vzorek RT\_14 – průběh deformace  
[Zdroj: autor diplomové práce]



## 6.5. Vyhodnocení vzorků RT\_11,12,13,14



Graf č. 26 – Porovnání vzorků RT\_11,12,13,14

[Zdroj: autor diplomové práce]

Testované vzorky, které byly ponechány v laboratorních podmínkách, po dobu vytvrzování lepidla vykazují velice podobný průběh nárůstu zatížení. Porušení vzorků je jiné než u vzorků RT\_1,2,3,8,9,10, tyto vzorky vykazovaly rychlý nečekaný kolaps. Vždy smýkaný profil „vystřelil“ od stojného H profilu 150/75/8.

Tyto vzorky oproti předchozím vykazují menší únosnost, ale jejich porušení není tak náhlé. Po prudkém poklesu na cca 50% hodnoty zatížení, následuje zbytková únosnost spoje, při které dochází k vytrhávání vláken při povrchu profilu. I po úplném kolapsu není smýkaný profil „vystřelen“, ale visí na skleněných vláknech, které jsou vytržené z kompozitu.

Geometrické parametry výpočtu jsou totožné. Histogram zvolený pro zatížení je area-s.dis. z důvodu velkého rozptylu hodnot, jsem nepoužil aritmetický průměr, ale do výpočtu byla zadána poloviční hodnota maxima a minima z měření.

### Naměřené hodnoty:

Plocha A = 1056mm<sup>2</sup>

F<sub>max,11</sub> = 5590 N

F<sub>max,12</sub> = 5360 N

F<sub>max,13</sub> = 6750 N

F<sub>max,14</sub> = 7440 N

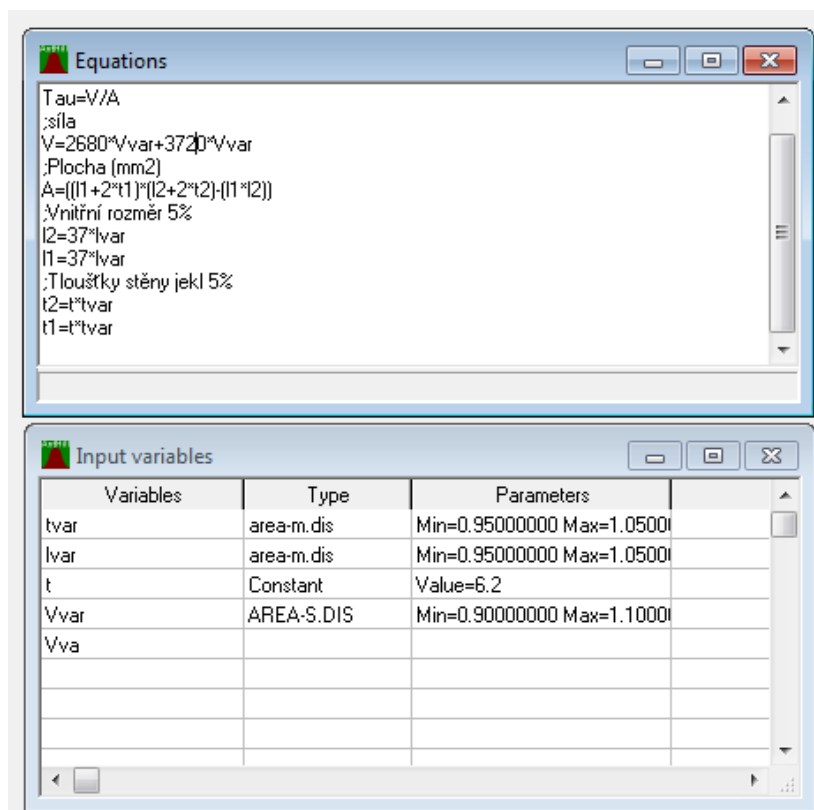
$$\tau_{11} = \frac{5590}{1056} = 5,29 \text{ MPa}$$

$$\tau_{13} = \frac{6750}{1056} = 6,39 \text{ MPa}$$

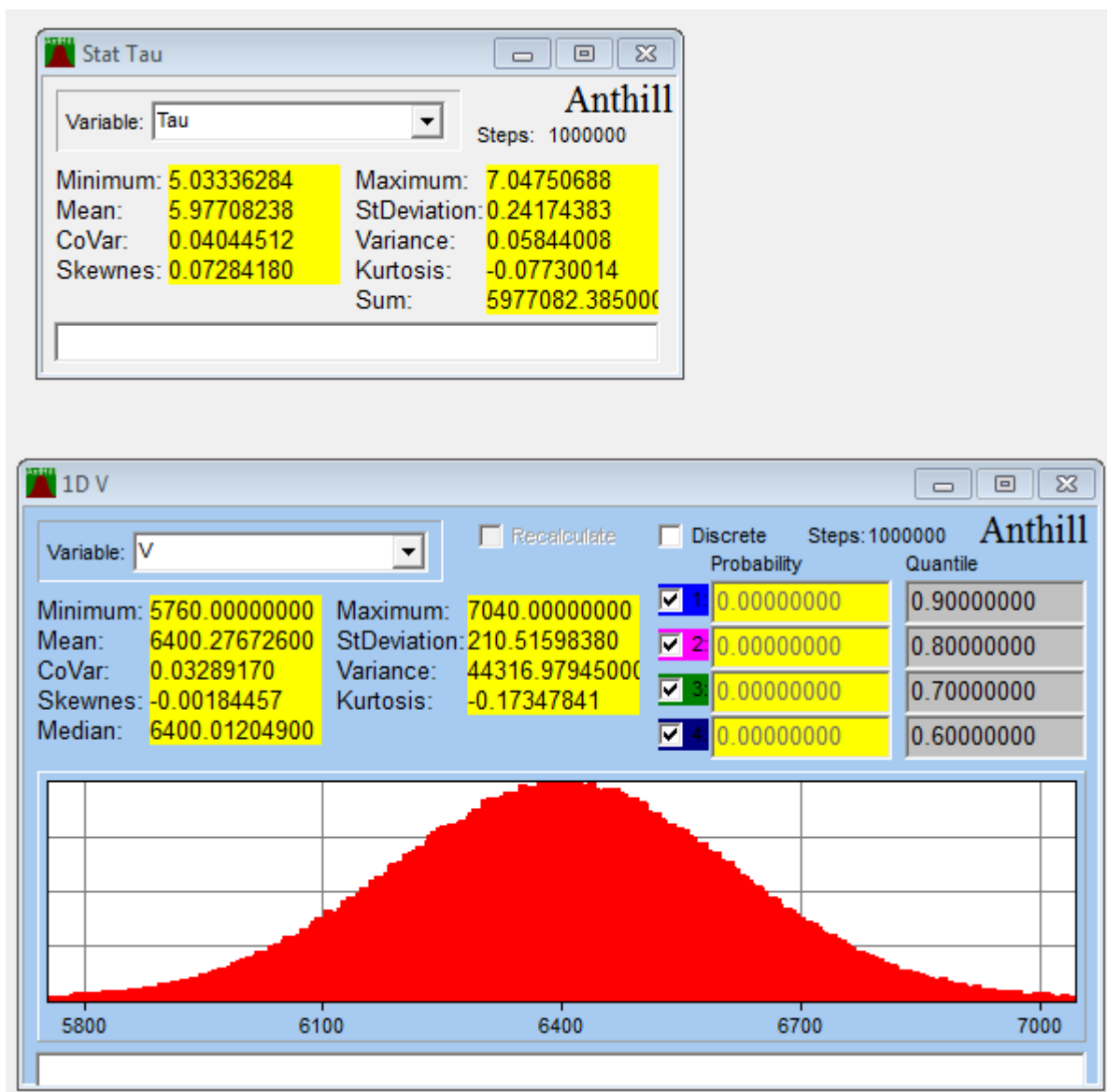
$$\tau_{12} = \frac{5360}{1056} = 5,08 \text{ MPa}$$

$$\tau_{14} = \frac{7440}{1056} = 7,05 \text{ MPa}$$

### Výpočet v Antill



Obrázek č. 22 – Nastavení výpočtu RT\_11,12,13,14  
[Zdroj: autor diplomové práce]

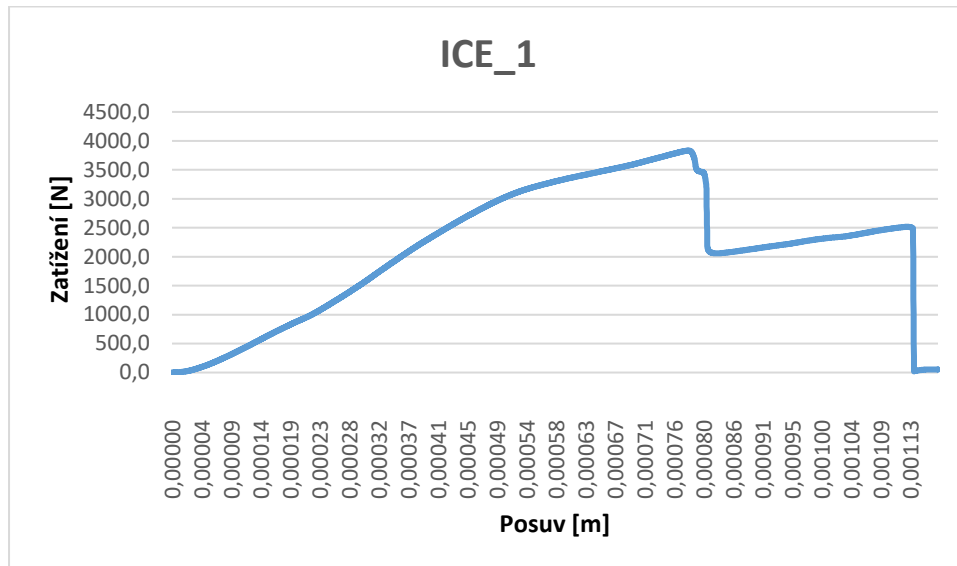


Obrázek č. 23 – Výpočet v Anthill pro vzorky RT\_11,12,13,14  
[Zdroj: autor diplomové práce]

Výpočet v Anthillu odpovídá pouze z hlediska napětí. Rozsah naměřených hodnot je moc velký pro použití standardních histogramů. Pro zpřesnění výpočtu by musel být vytvořen histogram podle rozsahu zkoušky, což by vyžadovalo větší množství zkoušek.

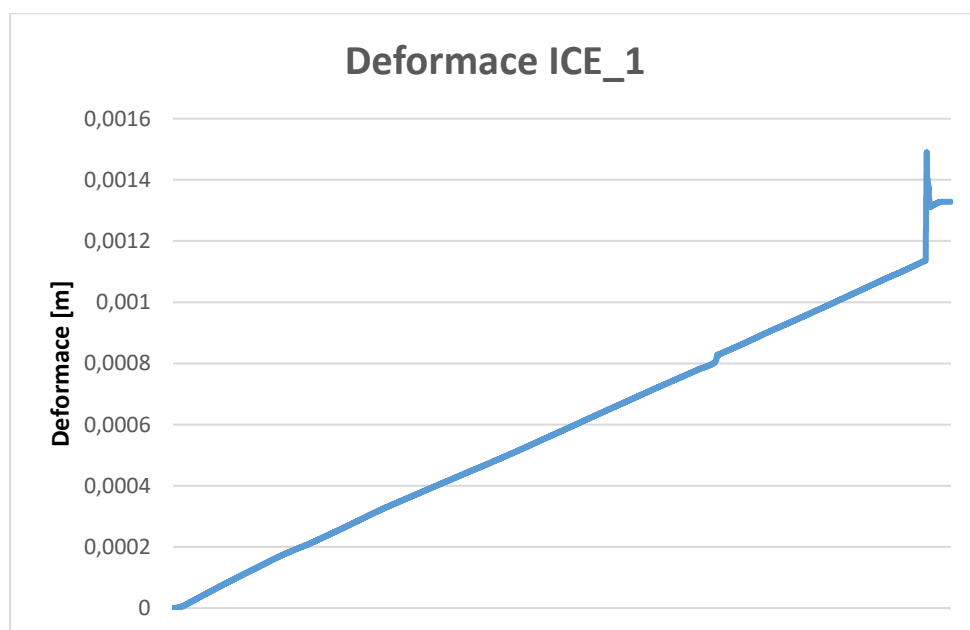
## 6.6. Vzorek ICE\_1

- Maximální síla: 3830 N
- Deformace při  $F_{\max}$ : 0,8 mm
- Doba testu: 81,44 s
- Datum testu: 22.11. 2019



Graf č. 27 – Vzorek ICE\_1 – závislost zatížení na posuvu tlačné hlavy

[Zdroj: autor diplomové práce]

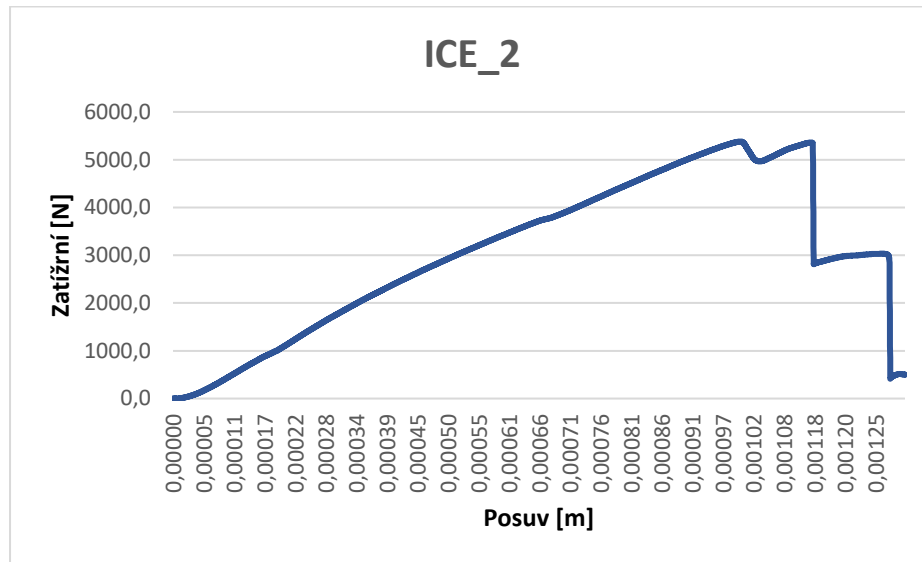


Graf č. 28 – Vzorek ICE\_1 – průběh deformace

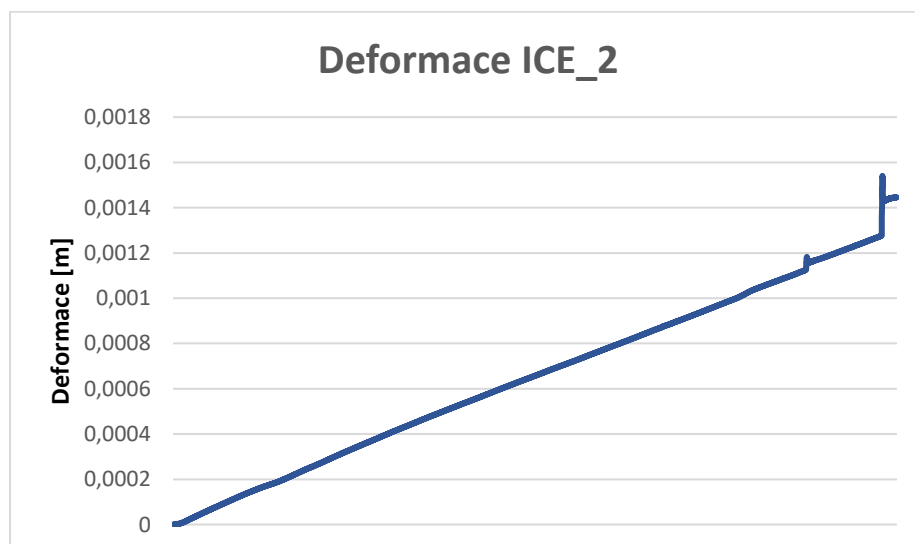
[Zdroj: autor diplomové práce]

## 6.7. Vzorek ICE\_2

- Maximální síla: 5380 N
- Deformace při  $F_{\max}$ : 1,0 mm
- Doba testu: 91,31 s
- Datum testu: 22.11. 2019

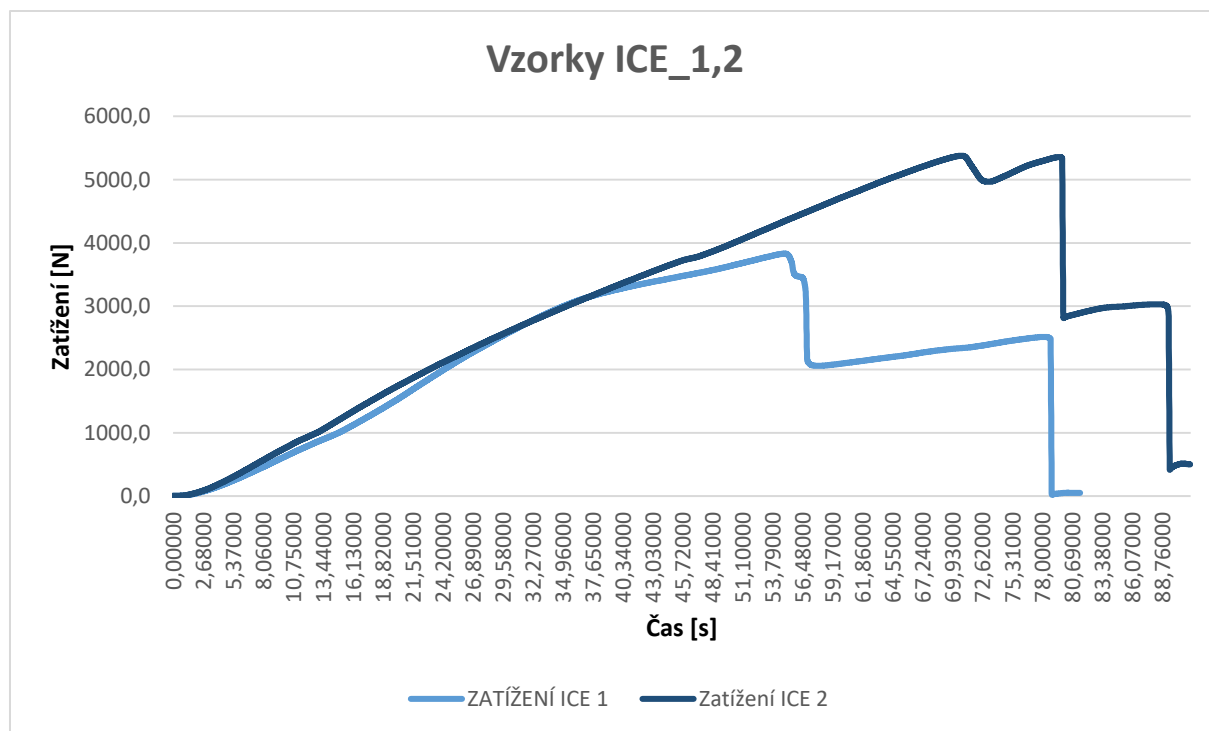


Graf č. 29 – Vzorek ICE\_2 – závislost zatížení na posuvu tlačné hlavy  
[Zdroj: autor diplomové práce]



Graf č. 30 – Vzorek ICE\_2 – průběh deformace  
[Zdroj: autor diplomové práce]

## 6.8. Vyhodnocení vzorků ICE\_1,2



Graf č. 31 – Porovnání vzorků ICE\_1,2

[Zdroj: autor diplomové práce]

Vzorky mají pro statistické vyhodnocení veliký rozptyl, vzorek ICE\_2 má hodnotu maximálního zatížení 5380 N, ICE\_1 3830 N což je pokles o 28,8%. Z dostupných histogramů nejsem schopen nasimulovat věrohodný výsledek.

### Naměřené hodnoty:

$$\text{Plocha } A = 1056 \text{ mm}^2$$

$$F_{\text{max,ICE}_1} = 3830 \text{ N}$$

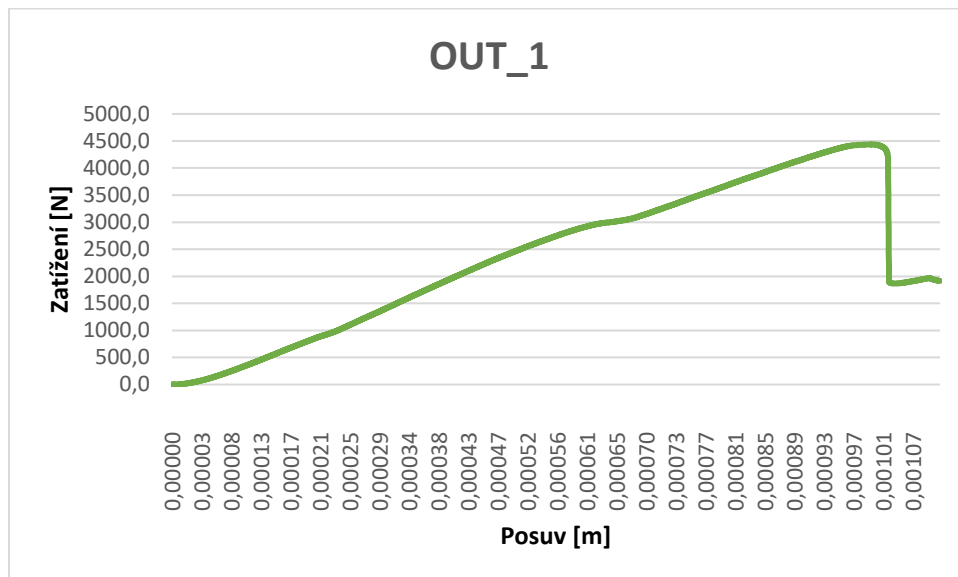
$$F_{\text{max,ICE}_2} = 5380 \text{ N}$$

$$\tau_{ICE_1} = \frac{3830}{1056} = 3,63 \text{ MPa}$$

$$\tau_{ICE_2} = \frac{5380}{1056} = 5,09 \text{ MPa}$$

## 6.9. Vzorek OUT\_1

- Maximální síla: 4440 N
- Deformace při  $F_{\max}$ : 1,0 mm
- Doba testu: 72,56 s
- Datum testu: 22.11. 2019



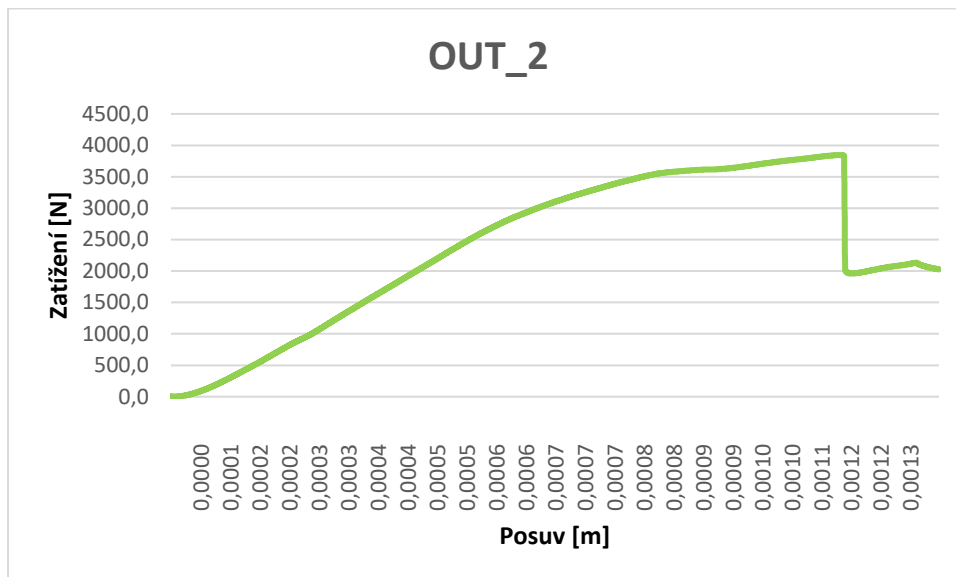
Graf č. 32 – Vzorek OUT\_1 – závislost zatížení na posuvu tlačné hlavy  
[Zdroj: autor diplomové práce]



Graf č. 33 – Vzorek OUT\_1 – průběh deformace  
[Zdroj: autor diplomové práce]

## 6.10. Vzorek OUT\_2

- Maximální síla: 3850 N
- Deformace při  $F_{\max}$ : 1,1 mm
- Doba testu: 87,80 s
- Datum testu: 22.11. 2019



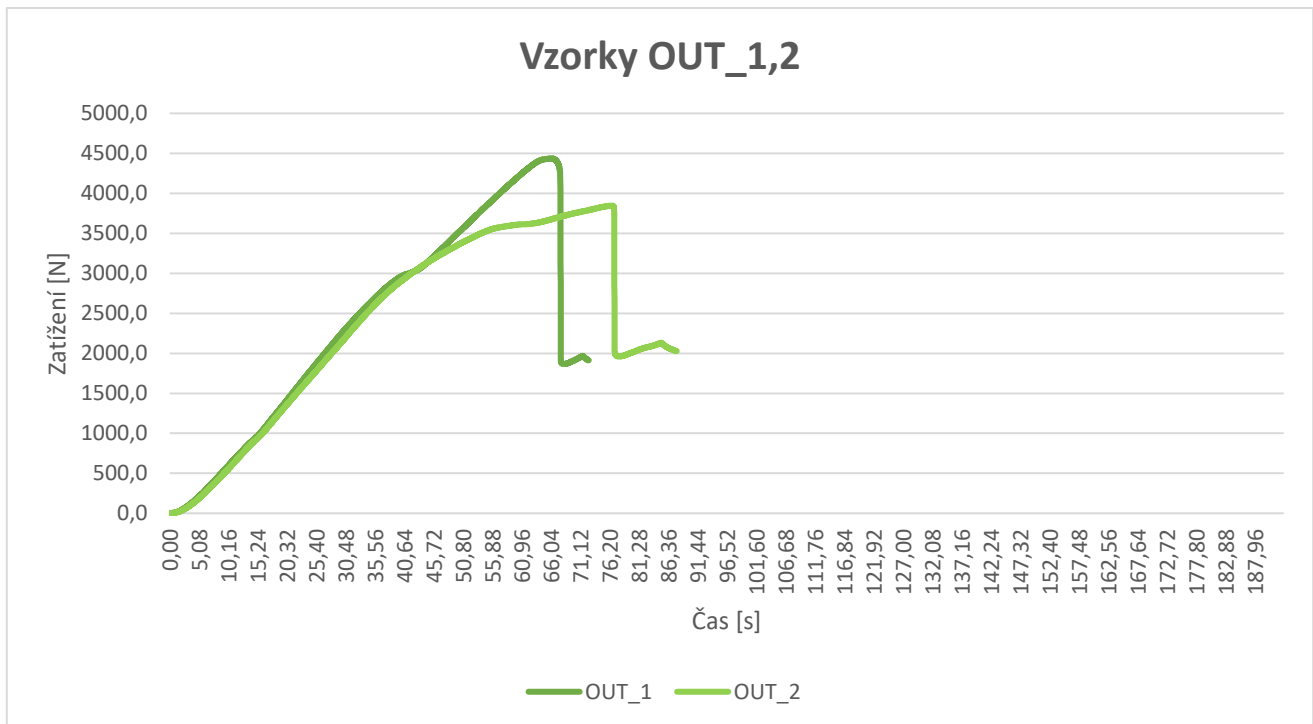
Graf č. 34 – Vzorek OUT\_2 – závislost zatížení na posuvu tlačné hlavy  
[Zdroj: autor diplomové práce]



Graf č. 35 – Vzorek OUT\_2 – průběh deformace  
[Zdroj: autor diplomové práce]



## 6.11. Vyhodnocení vzorků OUT\_1,2



Graf č. 36 – Porovnání vzorků OUT\_1,2

[Zdroj: autor diplomové práce]

Vzorky vykazují stejný průběh napětí a podobnou pevnost v rozsahu do 20%. Proto lze tyto prvky posoudit statistickým výpočtem s využitím histogramu area-s.dis. Tyto vzorky vykazují podobnou pevnost jako vzorky ICE\_1,2.

### Naměřené hodnoty:

Plocha A = 1056mm<sup>2</sup>

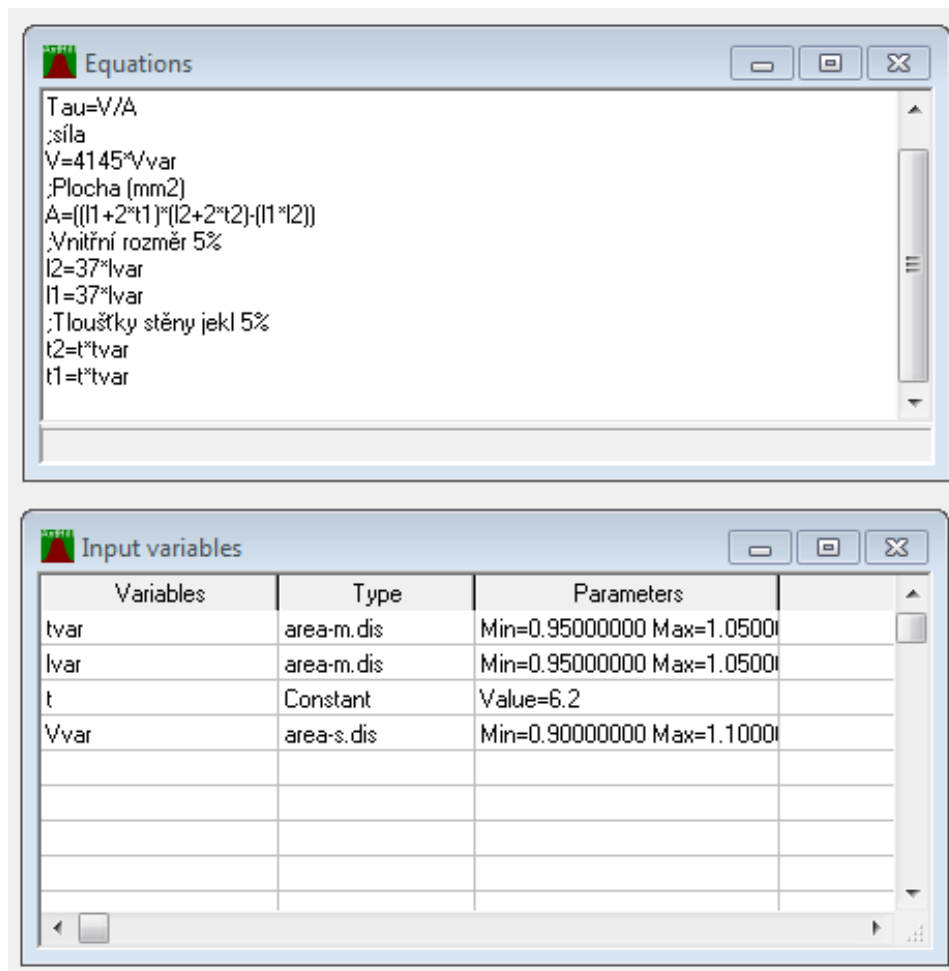
F<sub>max,OUT\_1</sub> = 4440 N

F<sub>max,OUT\_2</sub> = 3850 N

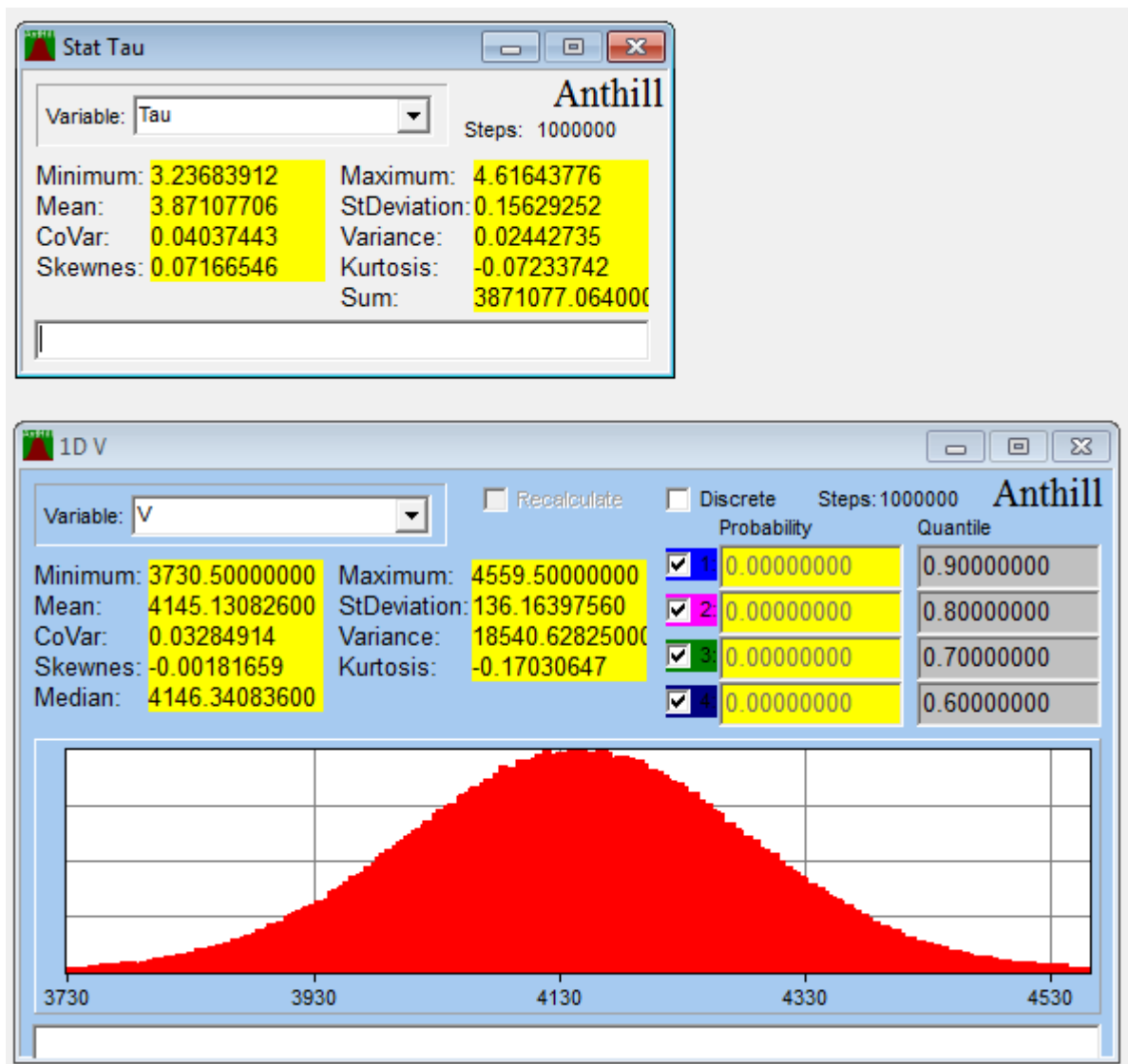
$$\tau_{OUT_1} = \frac{4440}{1056} = 4,20 \text{ MPa}$$

$$\tau_{OUT_2} = \frac{3850}{1056} = 3,65 \text{ MPa}$$

### Výpočet v Antill

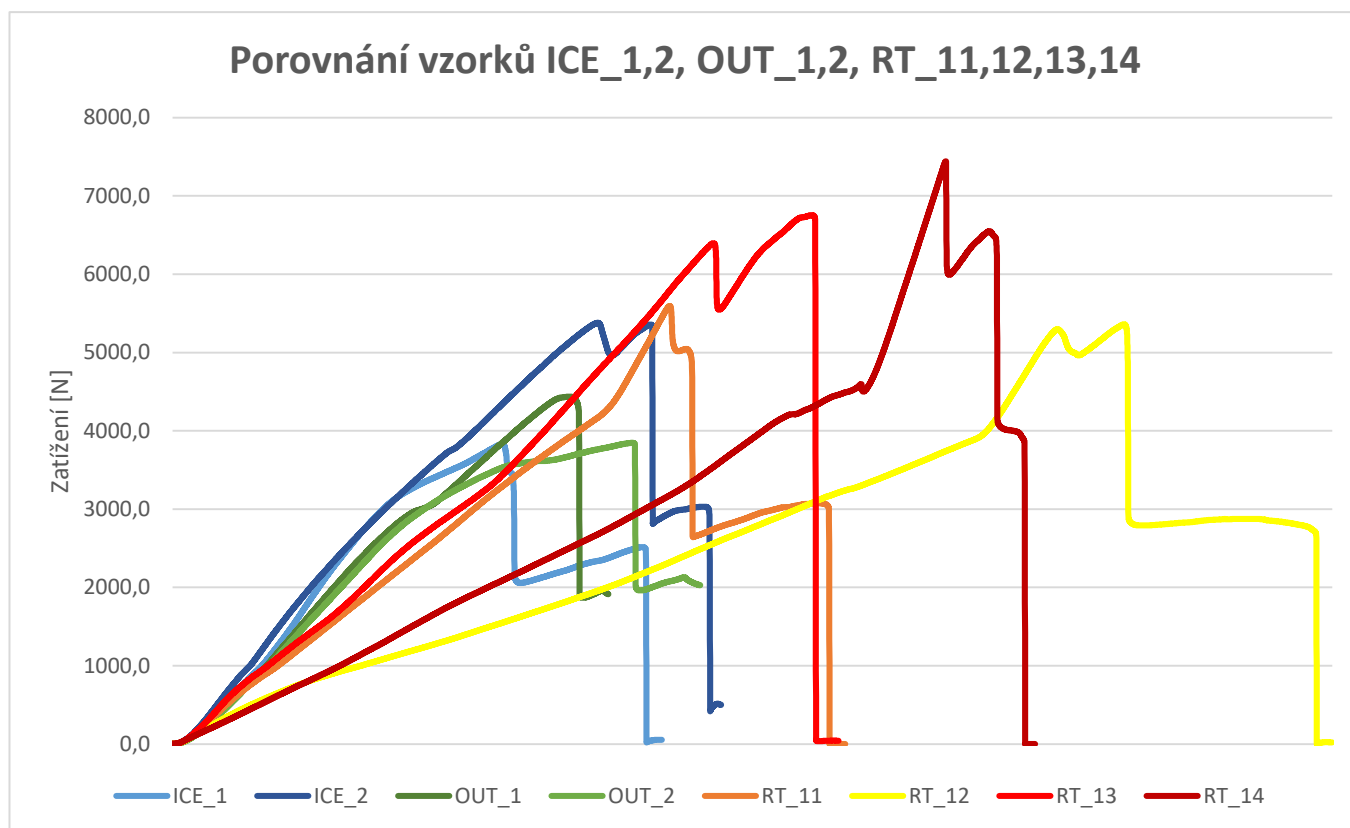


Obrázek č. 24 – Nastavení výpočtu OUT\_1,2  
[Zdroj: autor diplomové práce]



Obrázek č. 25 – Výpočet v Anthill pro vzorky OUT\_1,2  
[Zdroj: autor diplomové práce]

## 6.12. Vyhodnocení testu – vzorky s podélnou výztuží



Graf č. 37 – Porovnání vzorků ICE\_1,2, OUT\_1,2, RT\_11,12,13,14

[Zdroj: autor diplomové práce]

Vzorky, které byly ponechány při vytvrzování lepidla v laboratorních podmínkách, vykazují vyšší pevnost. Vzorky, které byly po zatuhnutí lepidla umístěny do laboratorního mrazáku nebo ponechány v exteriéru za účinků povětrnosti vykazují podobné pevnosti. Vzorky ICE\_1,2 měly velký rozptyl mezi hodnotami, a proto se nedal použít statistický výpočet pro získání mediánu hodnot. Z důvodu malého množství vzorků nemůžeme říci, které prostředí má horší účinek na výslednou pevnost spoje.

Vzorky ponechané v laboratoři mají statistický medián pevnosti 5,98 MPa, vzorky vystavené povětrnosti mají smykovou únosnost spoje 3,87 MPa. Rozdíl mezi únosnostmi je 35,3%.

Vzorek RT\_14 měl maximální únosnost 7440 N, nejmenší únosnost měl vzorek ICE\_1, která byla 3830 N, jedná se o propastný rozdíl 48,5%.

Vliv průběhu únosností je taktéž rozdílný, u vzorků ponechaných v laboratoři po překonání prvního zpevnění následuje druhé s poměrně vysokou únosností, která se pohybuje mezi 80 – 110 % první únosnosti. Následuje pak značný pokles na cca 50% únosnost s „mezí kluzu“, která přechází následně až do kolapsu.

Vzorky zmražené i ponechané venku mají jednodušší průběh, kdy po dosažení maximální hodnoty nastane prudký pokles zatížení na cca 50%. Následně nastane ještě krátké zpevnění před kolapsem.

## 7. Ověření hypotézy

Experimentem byla potvrzena hypotéza o vlivu teploty na únosnost lepeného spoje. Pokles pevnosti spoje je 31% respektive 35,3%. Dále byl zjištěn vliv struktury kompozitu. Rozdíl únosnosti vzorků podle struktury materiálu byl 27%.

## 8. Závěr

Cílem teoretické části diplomové práce je seznámit čtenáře s vláknovým kompozitem jako materiálem budoucnosti. Tento pokročilý materiál má vlastnosti, které lze využít ve všech technických odvětvích. V současnosti je využíván v mnoha oborech, kde je kladen důraz na vysokou pevnost při nízké hmotnosti. Často je toto řešení vykoupeno vysokou cenou tohoto materiálu. Především kompozity z uhlíkových vláken jsou cenově náročné. Například uhlíková vlákna výrobce Toray Industries T1100G, která jsou nejvýkonnější vlákna na trhu, stojí 825 USD za 1 kg.

Diplomová práce podrobně řeší dělení kompozitních materiálů podle různých kritérií. Hlavním hlediskem dělení kompozitů je podle materiál výztužných vláken. V diplomové práci jsou představeny nejběžnější varianty provedení výztužných vláken, které jsou blíže popsány. Je zde zahrnuta technologie výroby a fyzikální i chemické vlastnosti. Záměrně jsem neuváděl využití, protože každý den je kompozitní materiál využit na něco nového. Pro své značné výhody je využíván snad ve všech oborech.

Stavitelství je asi ze všech průmyslových odvětví tím nejkonzervativnějším oborem. To platí zejména pro Evropu. V zemích jako je Japonsko, Jižní Korea, Čína, Spojené Arabské Emiráty a USA je potřeba stavět do výšky. V dnešní době jsou inženýři těchto nejimpozantnějších staveb na limitech oceli a betonu, a proto budou nuceni sáhnout po vláknových kompozitech.

Spoje a styky jsou vždy slabým místem u všech materiálů, tento problém je u vláknového kompozitu o to větší, protože vykazuje obrovskou únosnost. Z tohoto důvodu se stala největším problémem kompozitu jeho vysoká pevnost, kvůli které je využíván. Vytvořit dostatečně únosný a spolehlivý spoj, který by nelimitoval únosnost kompozitních prvků, je skoro nemožné. Zatím jsou asi nejlepší variantou hybridní spoje, kdy je kombinován spoj šroubovaný s podlepením. Takový spoj je ovšem technologicky náročný a vyžaduje mnoho součástí. Proto je budoucností vláknových kompozitů lepený spoj.

Experimentální část diplomové práce se zabývá právě takovým spojem. Jako lepené komponenty byly zvoleny dva typy vzorků, které však byly vyrobeny ze stejných vstupních materiálů. Oba typy vzorků byly z kompozitních profilů, které obsahovaly matici z polyesterové pryskyřice. Výztužná vlákna byla skleněná. Lišili se tím, že stojina vzorku RT\_1,2,3,8,9,10 měla ve své struktuře rozptýlenou skleněnou výztuž při povrchu. Vzorky ICE\_1,2, OUT\_1,2, a RT\_11,12,13,14 měli při povrchu výztuž podélnou.

Na rozdílnost vzorků jsme přišli až při prvním měření, kdy vzorky RT\_1,2,3 vykazovali naprosto rozdílné průběhy únosnosti než vzorky ICE\_1,2 a OUT\_1,2. Z tohoto důvodu jsem byl nucen upravit vzorky pro druhou sérii měření.

Úkolem experimentální části bylo zjistit, jak velký vliv na únosnost smykového spoje má teplota a klimatické podmínky. Vzorky s rozptýlenou výztuží při povrchu byly v první sérii před lepením podchlazeny na 10 °C. Ve druhé sérii měli prvky stejnou teplotu, která byla v místi kde byly ponechány k vytvrdnutí. Po zpracování dat bylo zjištěno, že pokles únosnosti je 31%. Tento pokles je znatelný. Při porovnání vzorků ICE\_1,2, OUT\_1,2, RT\_11,12,13,14 zjistíme, že pokles únosnosti je 35,3%. Tento pokles je velice podobný jako u porovnání prvků RT\_1,2,3,8,9,10. Z tohoto důvodu se domnívám, že větší vliv na únosnost spoje má teplota, při které je nanášeno lepidlo a první hodiny tvrdnutí lepidla. Tento jev je poměrně zásadní.

Vzorky s podélnou výztuží při povrchu vykazovali od začátku nižší pevnost než vzorky s rozptýlenou výztuží. Při porovnání mediánu únosnosti prvků, které byly ponechány k vytvrdnutí lepidla v laboratoři, zjistíme, že rozdíl v únosnosti spoje je 27%. Těto fakt je pro návrh a využití kompozitních tyčí zásadní.

Experiment lze brát pouze orientačně z důvodu malého množství vzorků. Dále se nabízí zkoumat vliv teploty vzorku při nanášení lepidla na jeho únosnost. Po provedení více testů a jejich analýze, by bylo možné získat koeficienty, které by upravovaly pevnost spoje. Podobný princip, který se vyskytuje při návrhu dřevěných konstrukcí.

## Seznam použité literatury:

- [1] Prezentace: **Vláknové kompozitní materiály, jejich vlastnosti a výroba.** Informační a vzdělávací centrum kompozitních technologií & Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky FS ČVUT v Praze. [online]. [26.10.2007].  
Dostupné z: [http://www.kompozity.info/seminar/2\\_seminar/1\\_materialy\\_techologie.pdf](http://www.kompozity.info/seminar/2_seminar/1_materialy_techologie.pdf)
- [2] **Kratochvíl B., Švorčík V., Vojtěch D. Úvod do studia materiálů.** 1. vydání  
Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha 2005.  
ISBN 80-7080-568-4
- [3] Prezentace: **Kompozitní materiály.** Základy materiálového inženýrství.  
Katedra materiálu. Strojní fakulta.  
Technická univerzita v Liberci. Doc. Ing. Karel Daďourek. Liberec 2010 [online]  
Dostupné z: [http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady\\_kmt\\_bakalari/ZMI/06kompozityzmi.pdf](http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_bakalari/ZMI/06kompozityzmi.pdf)
- [4] **Toray Industries, Inc.** Toray Develops High Tensile Strength and Modulus Carbon Fiber TORAYCA® T1100G and High-performance TORAYCA® Prepreg. [online]. [10.3.2014]  
Dostupné z:  
<https://cs2.toray.co.jp/news/toray/en/newsrrs02.nsf/0/B126D9D8433675EE49257D11001770C5>
- [5] Uhlíkové vlákno. Wikipedie otevřená encyklopedie. [online]. [5.7.2019].  
Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Uhl%C3%ADkov%C3%A9\\_vl%C3%A1kno](https://cs.wikipedia.org/wiki/Uhl%C3%ADkov%C3%A9_vl%C3%A1kno)
- [6] **DuPont, DuPont™.** Společnost E. I. du Pont de Nemours and Company [online].  
Dostupné z: <https://www.dupont.cz/vyrobky-a-sluzby/construction-materials.html>
- [7] **Aramidová vlákna.** Wikipedie otevřená encyklopedie. [online]. [18.6.2019].  
Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Aramidov%C3%A1\\_vl%C3%A1kna](https://cs.wikipedia.org/wiki/Aramidov%C3%A1_vl%C3%A1kna)
- [8] **Stephanie Kwoleková.** Wikipedie otevřená encyklopedie. [online]. [8.8.2019].  
Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Stephanie\\_Kwolekov%C3%A1](https://cs.wikipedia.org/wiki/Stephanie_Kwolekov%C3%A1)
- [9] **Skleněná textilní vlákna.** Wikipedie otevřená encyklopedie. [online]. [10.6.2019].  
Dostupné z:  
[https://cs.wikipedia.org/wiki/Sklen%C4%9Bn%C3%A1\\_textiln%C3%AD\\_vl%C3%A1kna](https://cs.wikipedia.org/wiki/Sklen%C4%9Bn%C3%A1_textiln%C3%AD_vl%C3%A1kna)
- [10] **Jan Grégr.** *Skleněná vlákna - historie a současnost.* [online]. [24.4.2003].  
Dostupné z: <https://www.czechdesign.cz/temata-a-rubriky/sklenena-vlakna-historie-a-soucasnost>
- [11] **Čedičová vlákna.** Wikipedie otevřená encyklopedie. [online]. [10.6.2019].  
Dostupné z:  
[https://cs.wikipedia.org/wiki/Sklen%C4%9Bn%C3%A1\\_textiln%C3%AD\\_vl%C3%A1kna](https://cs.wikipedia.org/wiki/Sklen%C4%9Bn%C3%A1_textiln%C3%AD_vl%C3%A1kna)



- [12] Presentace: **Kompozitní tyčové výztuže**. Orlitech composite systems.[online]. [2.8.2019].  
Dostupné z: <https://drive.google.com/file/d/16TCptXz1DnJm8Ft3Z-0aWWCRrwq7RhJG/view>
- [13] **Technologie výroby**. Prefa kompozity. [online]. Dostupné z:  
<https://www.prefa-kompozity.cz/technologie-vyroby/materialove-vlastnosti/>
- [14] **Ing. Petr Bernardin, Ph.D.** *Disertační práce. Spojování kompozitních materiálů s kovem*. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta strojní. Katedra konstruování strojů. Plzeň 2016

## **Seznam použitého softwaru:**

- Microsoft Office Word 2016
- Microsoft Office Excel 2016
- AutoCAD 2017
- AntHill
- Zwick/Roell

## **9. Přílohová část**