

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta stavební

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí



Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Integrovaná bezpečnost staveb

Diplomová práce

**VLASTNOSTI FRP KOMPOZITŮ  
PŘI POŽÁRU**

PROPERTIES OF FRP COMPOSITES IN FIRE

Bc. Stanislav Bien

vedoucí práce: Ing. Zdeněk Sokol, Ph.D.

2019



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Bien

Jméno: Stanislav

Osobní číslo: 424378

Zadávající katedra: Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Integrální bezpečnost staveb

### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Vlastnosti FRP kompozitů při požáru

Název diplomové práce anglicky: Properties of FRP composites in fire

Pokyny pro vypracování:

V diplomové práci sumarizujte informace o vlastnostech kompozitních materiálů, jejich složení a možnou výrobu kompozitních profilů. V experimentální části ověřte pevnost kompozitních těles při ohybu se zahrnutím vlivu zvýšené teploty, zjištěné materiálové charakteristiky využijte při virtuálním modelování konkrétní konstrukce zatížené požárem.

Seznam doporučené literatury:

[1] ČSN EN ISO 14125 Vlákny vyztužené plastové kompozity - Stanovení ohybových vlastností, Praha: Český normalizační institut, 2003.

[2] ČSN EN ISO 527-1 Plasty - Stanovení tahových vlastností - Část 1: Obecné principy. Praha: Český normalizační institut, 2012.

[3] BODNÁROVÁ, Lenka. Kompozitní materiály ve stavebnictví. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002


[4] EHRENSTEIN, Gottfried. Polymerní kompozitní materiály. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009

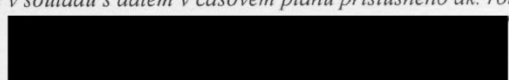
Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Zdeněk Sokol Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 8.10.2018

Termín odevzdání diplomové práce: 6.1.2019

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

  
Podpis vedoucího práce

  
Podpis vedoucího katedry

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

*Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové 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“.*

8.10.18

Datum převzetí zadání

  
Podpis studenta(ky)

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem na této diplomové práci pracoval samostatně, pouze pod odborným vedením Ing. Zdeňka Sokola, Ph.D. Veškeré podklady, ze kterých jsem čerpal, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

V Praze dne 04.01.2019

.....

Stanislav Bien

## **Poděkování**

Chtěl bych tímto poděkovat mému vedoucímu diplomové práce, panu Ing. Zdeňku Sokolovi, Ph.D., za trpělivost, cenné rady a za připomínky při řešení této práce.



---

# Obsah

Čestné prohlášení .....	III
Poděkování .....	IV
Obsah .....	V
Abstrakt .....	VII
Abstract .....	VII
1 Úvod .....	1
2 Výroba a vlastnosti kompozitů .....	3
2.1 Vlákna .....	6
2.1.1 Skleněná vlákna .....	8
2.1.2 Uhlíková vlákna .....	9
2.1.3 Aramidová vlákna .....	11
2.1.4 Čedičová vlákna .....	12
2.2 Matrice .....	14
2.2.1 Hořlavost pojiva .....	16
2.2.2 Degradace a barvení matrice .....	18
2.3 Výroba a zpracování kompozitů .....	18
2.3.1 Ruční kladení .....	19
2.3.2 Pultruze .....	20
2.3.3 Lisování ve formě .....	21
2.3.4 Lití do formy .....	22
2.3.5 Navíjení .....	23
2.3.6 Lisování se vstřikem matrice .....	23
2.3.7 Metoda vakuového vaku .....	24
2.3.8 Lisování v autoklávu .....	24
2.3.9 Kontinuální laminace .....	25
2.3.10 Odstředivé lití .....	26
2.4 Recyklace kompozitu .....	27
3 Experimentální část .....	28
3.1 Zkouška v tahu .....	28
3.2 Zkouška za ohybu .....	30
3.2.1 Požadavky na zkušební tělesa a měřící přístroj .....	30
3.2.2 Příprava zkoušky .....	32
3.2.3 Měření pevnosti v ohybu .....	37
3.2.4 Měření modulu pružnosti .....	42

---

3.2.5	Fotodokumentace – typy porušení vzorků .....	49
<b>4</b>	<b>Praktická část .....</b>	<b>52</b>
4.1	Průřezové a materiálové charakteristiky .....	54
4.1.1	Průřezové charakteristiky .....	55
4.2	Materiálové charakteristiky .....	56
4.2.1	Ocel.....	57
4.2.2	Kompozit.....	60
4.3	Tepelné zatížení lokálním požárem .....	61
4.3.1	Výpočet tepelného toku .....	61
4.4	Posouzení kompozitní lávky .....	72
4.4.1	Posouzení za pokojové teploty.....	78
4.4.2	Posouzení za požáru.....	81
<b>5</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>91</b>
	<b>Seznam obrázků.....</b>	<b>93</b>
	<b>Seznam tabulek .....</b>	<b>96</b>
	<b>Seznam grafů .....</b>	<b>97</b>
	<b>Citovaná literatura .....</b>	<b>99</b>
<b>6</b>	<b>Přílohová část.....</b>	<b>105</b>
6.1	Grafy pro sadu vzorků č.1 .....	105
6.2	Grafy pro sadu vzorků č.2 .....	111
6.3	Grafy pro sadu vzorků č.3 .....	118

---

## Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá kompozitními materiály na bázi plastů vyztužených vlákny. V rámci řešené práce je popsáno dělení těchto materiálů, jejich charakteristika a případné výhody a nevýhody, možnosti výroby kompozitů, praktickou aplikaci především ve stavební oblasti a požadavky na jejich zkoušení. Pro stanovení materiálových charakteristik je dále popsána zkouška vzorků testovaných za ohybu při zvýšené teplotě a analýza výsledků. Získané poznatky jsou následně aplikovány na konkrétním příkladu, jenž má ilustrovat možné využití těchto materiálů ve stavebním průmyslu.

### Klíčová slova

kompozit; plast; materiál; umělá vlákna; pultruze; vláknové kompozity; experiment; lokální požár; pryskyřice; sklo; hořlavost

## Abstract

This diploma thesis deals with a composite material based on plastic reinforced by fibres. Within the solution of this thesis is described division of these materials, their characteristic, advantage and disadvantage, options of manufacturing, practical application primarily in civil engineering and requirements of their testing. For determination of their material characteristics is also described testing of specimens in bending in elevated temperature and analysis of results. Obtained findings are then applied on particular example, which illustrates possible application in construction industry.

### Keywords

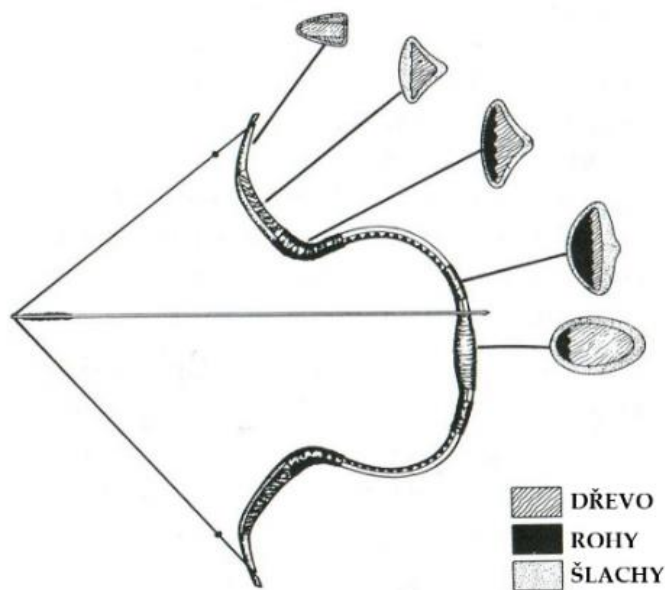
composite; plastic; material; artificial fibres; pultrusion; fibre composites; experiment; local fire; resin; glass; combustibility

# 1 Úvod

Kompozitní materiály jsou součástí živé i neživé přírody kolem nás již od počátku civilizace, jejich složení a struktura je odvozena z přírodních látek. Přírodním kompozitem tak může být např. dřevo, složené z vláken celulózy a ligninu či lidská kost tvořená fosforečnanem vápenatým a kolagenem, umělým kompozitem je pak např. cihla, beton, malty, azbestocementové výrobky či asfaltobeton. Kompozit byl využíván již ve starověkém Egyptě, ve kterém stavitelé při výrobě cihel mísili hlínu se stébly trávy, které pak působily jako primitivní výztuž [1]. První zmínky o výrobě kompozitu pak pochází z Mezopotámie, 3400 let př.n.l., kde stavitelé slepovali dřevěné proužky pro vytvoření překližky. Kompozitní materiál našel též využití v armádě, ve 12. století byly mongolskými válečníky vyráběny kompozitní luky složené z bambusu, zvířecích šlach, rohů a hedvábí, spojené přírodní pryskyřicí. [2] Pojem kompozitní materiál tak vytváří široký pojem zahrnující takřka všechny látky okolo nás. Podstatou kompozitního materiálu je sloučení dvou či více látek, odlišných fyzikálních vlastností, jež se spojením vhodně doplňují a vytváří tak synergii a výrobek s lepšími vlastnostmi s nehomogenní strukturou. Příkladem tak může být konstrukce železobetonu, jež spojuje odolnost v tlaku betonu a tahovou pevnost vložené ocelové výztuže. Rozvoj všech odvětví průmyslu v průběhu posledních sto let, především pak strojírenského, leteckého či zbrojního, vedl k vývoji a výzkumu celé řady nových kompozitních materiálů, jež umožnily nahradit stávající materiály vyšší pevností, odolností či menší hmotností.



obr. 1 Hliněná cihla vyztužená slámou [3]



obr. 2 Příklad kompozitního luku [2] (upraveno)

Cílem teoretické části této diplomové práce, je představení FRP kompozitů<sup>1</sup> vyztužených různými typy vláken, jejich rozdělení a výsledné vlastnosti dle zvoleného typu vlákna a pojiva. Dále má za cíl provést řešerši nejběžnější výroby kompozitu a popsat výhody a nevýhody zvolených metod.

Úkolem praktické části je zkoumání vlivu zvýšených teplot na zkušební tělesa během zkoušky čtyřbodovým ohybem. Výstupem je zjištění změny mechanických vlastností kompozitu vystaveného působení vyšších teplot běžně dosažených při požáru. Dosažené výsledky pak jsou použity při návrhu konkrétní kompozitní konstrukce vystavené zvýšeným teplotám, cílem této části pak je celkové zhodnocení využití kompozitních látek v oblastech výskytu možných hořlavých předmětů a případné řešení pro zabránění poškození těchto konstrukcí.

Cílem této diplomové práce tak je zhodnocení chování FRP kompozitu a jeho mechanických vlastností při zvýšené teplotě a ukázka praktické aplikace těchto materiálů ve stavební oblasti jako možnou náhradu ocelových či železobetonových konstrukcí.

<sup>1</sup> FRP – Fibre Reinforced Polymers – polymery či plasty vyztužené vláknny

## 2 Výroba a vlastnosti kompozitů

Rozmach využití kompozitu začal s vynálezem sklolaminát<sup>2</sup> tvořeného skleněnými vlákny a umělou pryskyřicí. Vlákná zaručují vysokou pevnost v tahu, zatímco pryskyřice drží vlákna pohromadě a zabraňuje jejich poškození či odštěpení. S vývojem nových materiálů byla skleněná vlákna nahrazena např. vlákny uhlíkovými, jež našla uplatnění především v leteckém průmyslu při opláštění letadel díky jejich pevnosti a nízké hmotnosti. Dle [4] tak například vzrostl podíl kompozitu v letectví z 5 % v roce 1970, až na 50 % u dnes vyráběných Boeingů 787 viz. obr. 6.

Využití vláknových kompozitů či polymerů vyztužených vlákny při výrobě nosných konstrukcí začalo nabývat na významu v 70. letech 20. století. Snaha nahradit konstrukční ocel, její vysokou cenu, hmotnost, vyprodukované emise při výrobě a také nutnost chránit ji proti korozi vedla k výzkumu pevných a zároveň lehkých kompozitních materiálů. Kompozity se tak dnes uplatňují například jako náhrada vložené ocelové výztuže v železobetonových prvcích či jako dodatečná povrchová výztuž ve formě lamel. Díky podstatně vyšší odolnosti vůči působícím chemikáliím (kyseliny, chloridy), nevodivosti, netečnosti vůči magnetickému poli a korozi je pak navržena kompozitní výztuž méně náchylná na dodržení krycí vrstvy betonu. Nevýhodou tohoto typu výztuže je vyšší pořizovací cena, nižší modul pružnosti v porovnání s ocelí a vliv dlouhodobě působícího betonu, ten je silně zásaditý a postupně degraduje použité pojivo.

---

<sup>2</sup> Vynalezen v roce 1932 americkým inženýrem Gamesem Slayterem (\*1896 - +1964)



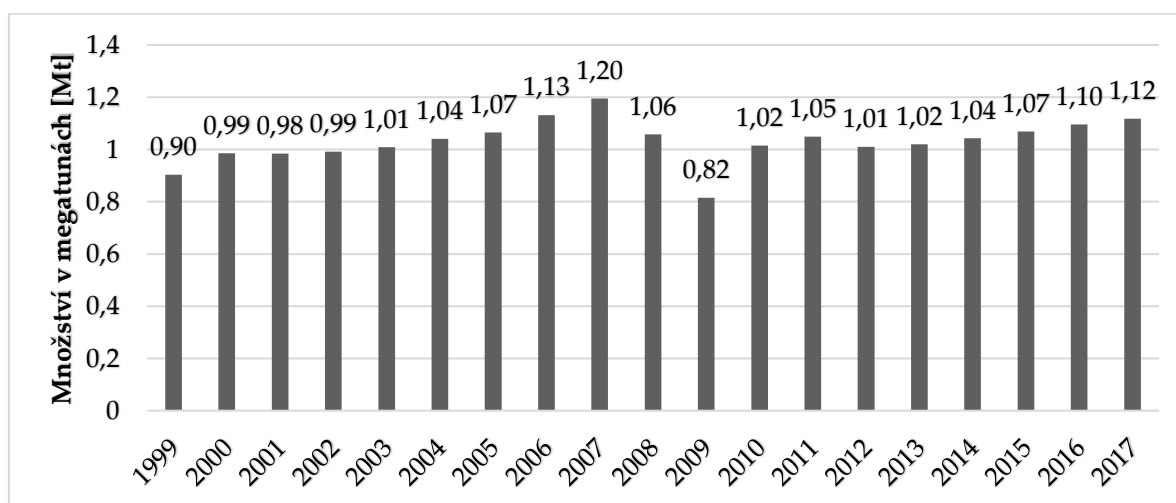
obr. 3 Detail kompozitní výztuže [5]



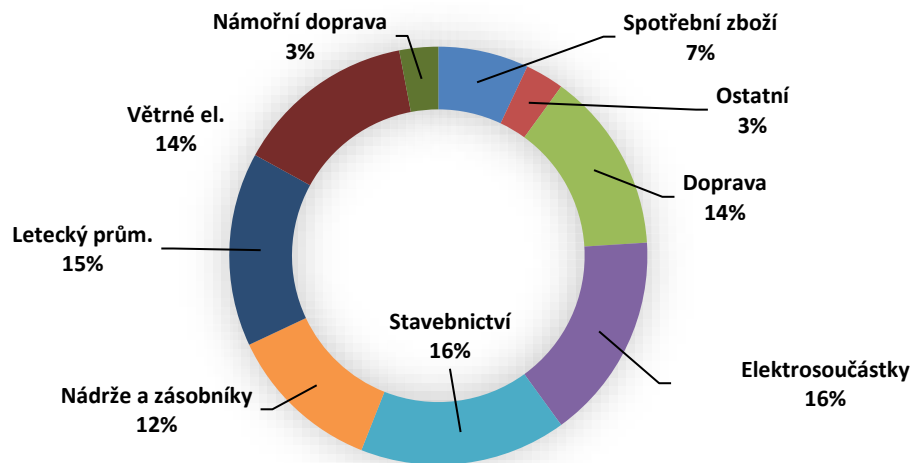
obr. 4 Aplikace uhlíkových lamel [6]

Kompozity jsou dnes využívány při konstrukci budov, mostů, rozvodů či nádrží s exponovanými prvky, u kterých vzniká požadavek na vysokou chemickou odolnost vlivem působení agresivního prostředí. Globálně pak stavebnictví zaujímá ve spotřebě kompozitních materiálů přibližně 16 % světové produkce. V případě evropského trhu došlo k celkovému propadu obchodu s kompozity v průběhu ekonomické krize mezi lety 2007 až 2009. Dnes se objem výroby pomalu blíží předkrizovým hodnotám z let 2006 a 2007, s meziročním růstem 2 % a hodnotou 1,118 Mt, viz. graf. 1.

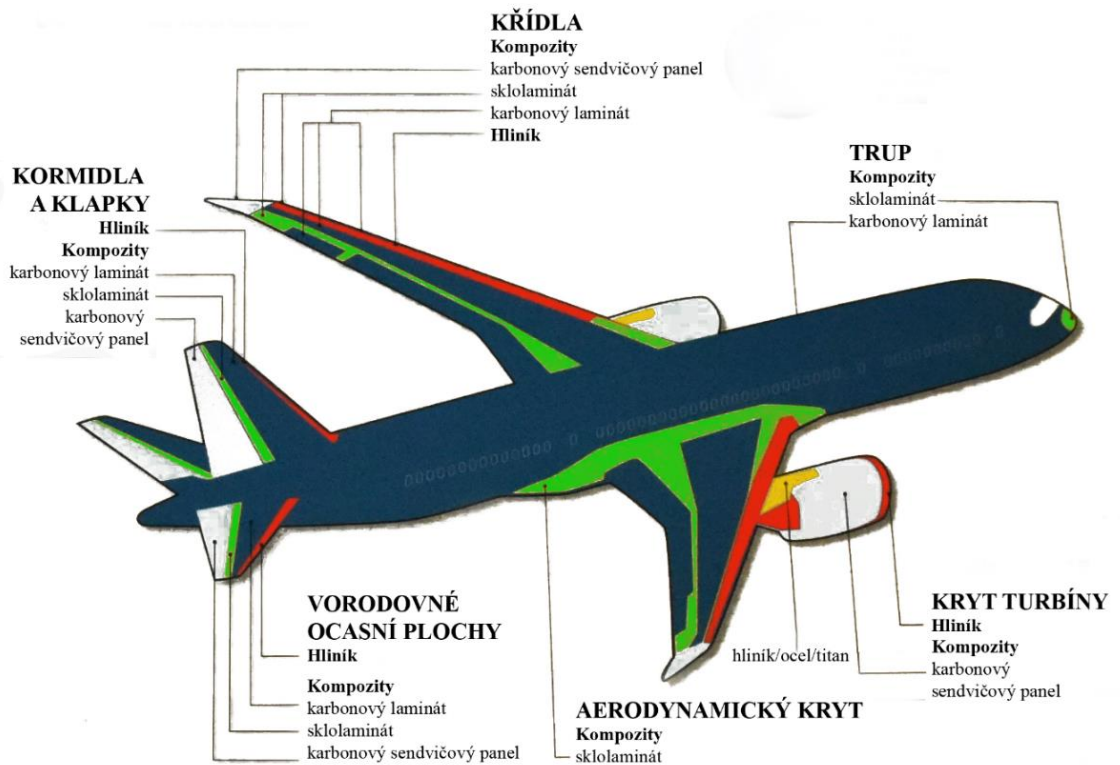
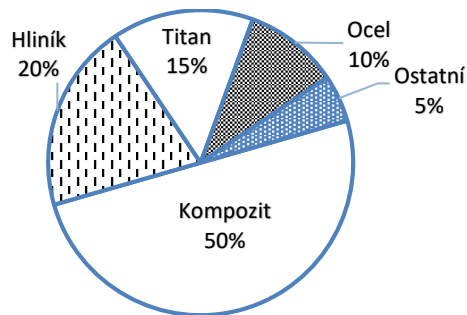
Největším producentem v Evropě je Německo následované Itálií, Francií a Španělskem. V případě celosvětového trhu dosáhla produkce skleněných vláken v roce 2017 bezmála 5,080 Mt, zároveň s rostoucí poptávkou roste i produkce vláken, a to především díky novým výrobcům v Číně, Indii a na Blízkém Východě. [7]



graf. 1 Evropská produkce kompozitů se skleněnými vlákny v megatunách [7]



obr. 5 Podíl jednotlivých odvětví na světové spotřebě kompozitů v r. 2017 [8]



obr. 6 Příklad materiálového složení Boeingu 787 Dreamliner [9] (upraveno)



## 2.1 Vlákna

Strukturu kompozitu tvoří dva základní prvky: výztuž a matrice. Výztuž má za úkol přenášet většinu vnějšího napětí působícího na konstrukci, zvyšovat její pevnost, houževnatost a tuhost. Vložená výztuž má pak podobu vláken o dané délce a orientaci, případně se jedná částicovou výztuž s kulovitým či destičkovitým tvarem. Výhoda výztužných vláken pak spočívá v jejich malých rozměrech a malém průřezu vláken, tím je sníženo množství vad vzniklých při jejich výrobě, případné poškození pak má charakter mikroskopických trhlin v podélném směru vlákna.

Pro stavební účely se dnes nejčastěji jedná o sekaná skelná vlákna využívaná jako rozptýlená výztuž do betonu či provazce využívané při konstrukci profilů metodou pultruze. V dalších oborech průmyslu pak jde o vlákna uhlíková, čedičová, keramická či kovová, z organických vláken pak vlákna aramidová, polyetylenová či tzv. whiskery<sup>3</sup>. Uplatnění však nalézají i přírodní vlákna ze lnu, konopí, bavlny či dřeva, oproti syntetickým vláknům sice vynikají nižší cenou, recyklovatelností či nižší hmotností, naopak jsou však značně hydrofilní, teplotně nestálé či hůře spojitelné s matricí.

Volba materiálu vlákna pak vychází z požadavků na mechanickou a chemickou odolnost výsledné konstrukce a na výslednou cenu kompozitu. Nejlevnějším typem vlákna je skleněné vlákno, a to díky levně dostupné surovině, následuje aramidové vlákno, jehož cenu však zvyšuje pomalý proces výroby. Nejdražším typem jsou lehká a pevná uhlíková vlákna, která se vyrábějí časově a energeticky náročným procesem.

tab. 1 Orientační cena jednotlivých typů vláken [4]

<i>Typ vlákna</i>	<i>Cena [€·kg<sup>-1</sup>]</i>	<i>Typ vlákna</i>	<i>Cena [€·kg<sup>-1</sup>]</i>
<i>Skleněné</i>	<i>2-3</i>	<i>Uhlíkové - standartní</i>	<i>20-80</i>
<i>Čedičové</i>	<i>4-6</i>	<i>Uhlíkové - vysokomodulové</i>	<i>100-500</i>
<i>Aramidové</i>	<i>20-30</i>	<i>Uhlíkové - speciální</i>	<i>100-1000</i>

<sup>3</sup> Monokrystalické vlákno s průměrem do 1 μm a délkou 3 až 4 mm, vynikají extrémní pevností, pružností a lomovou tužností. Uplatní se především s kovovou či keramickou matricí. [10]

Dle tvaru rozlišujeme vlákna:

- jednotlivá vlákna (tzv. roving)
- pramence vláken či příze
- netkané rohože
- tkaniny
- sekaná vlákna

Dle geometrie vložené výztuže:

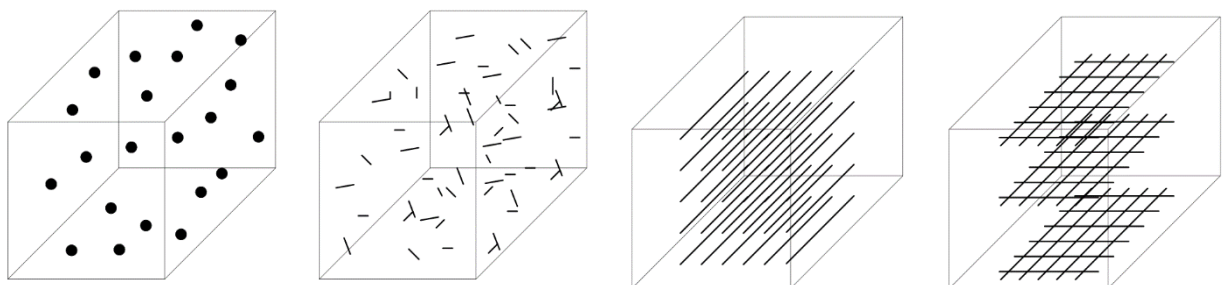
- s dlouhými vlákny (poměr délka/průměr  $> 100$ )
- s krátkými vlákny (poměr délka/průměr  $< 100$ )
- částicové (izometrický či anizometrický tvar)

Dle orientace vláken:

- jednosměrné
- mnohosměrné

Dle velikosti vložených vláken:

- makrokompozity (s velikostí v řádech milimetrů či centimetrů)
- mikrokompozity (řádově v  $\mu\text{m}$ )
- nanokompozity (řádově v  $\text{nm}$ )

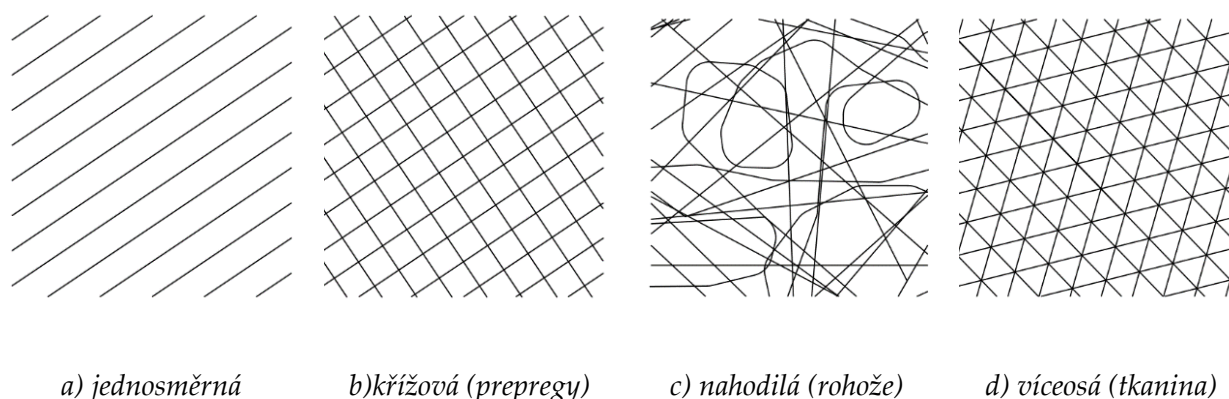


a) částicové

b) krátká vlákna

c) dlouhá vlákna

obr. 7 Dělení vláken dle geometrie



obr. 8 Orientace vláken v matrici

### 2.1.1 Skleněná vlákna

Nejčastěji používanými vlákny jsou vlákna skleněná. Tento tradiční materiál je vyráběn roztavením sklářského kmene tvořeným především  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a  $\text{B}_2\text{O}_3$ .<sup>4</sup> Toto vlákno se nazývá E-vlákno (electric) a je nejpoužívanějším typem, především pro svojí nízkou cenu, nehořlavost, světelnou propustnost a vynikající elektrickou izolaci. Skleněná vlákna jsou taktéž jako jediná používaná výtuzná vlákna izotropní, tedy jejich vlastnosti jsou ve všech směrech stejné. Nevýhodou těchto vláken je malá odolnost vůči kyselinám a zásadám či oděru. Při jejich aplikaci, zejména v leteckém průmyslu, tak tato vlákna bývají nejčastěji kombinována s uhlíkovými, skleněná vlákna tak tvoří vnitřní plášť letadla, zatímco odolnější uhlíková vnější. [4]

Druhým rozšířeným typem je S (strength)<sup>5</sup>, jež má vyšší obsah  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ <sup>6</sup> a  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Toto vlákno má oproti předchozímu typu vyšší pevnost v tahu, modul pružnosti a zároveň nižší hustotu, nachází tak využití např. při konstrukci rotorů helikoptér. Dále se jedná například o C-sklo s chemickou odolností, bezboritá ECR sklovina, která je vysoce chemicky odolná a AR sklovina odolná vůči alkáliím, z tohoto důvodu se využívá při vyztužování betonových konstrukcí. [4]

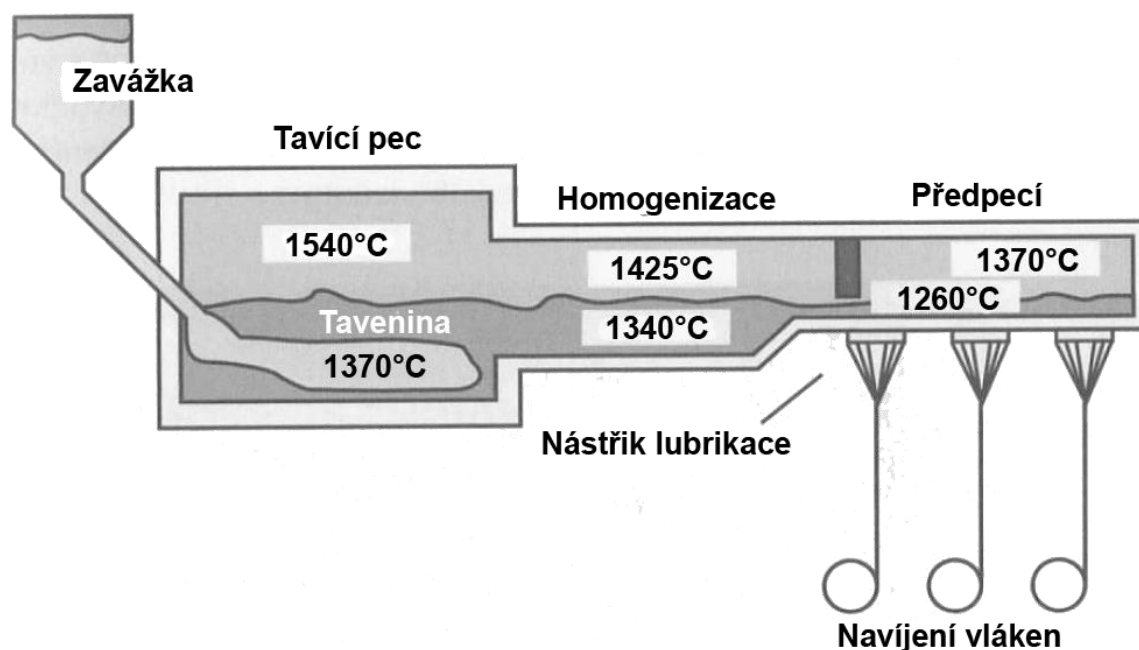
Proces výroby skleněných vláken, zahrnuje roztavení sklářského kmene ve sklářské peci při teplotě až 1540 °C. Roztavené sklo prochází skrze perforované desky z platiny či oceli,

<sup>4</sup> Oxid křemičitý; o. hořečnatý; o. hlinitý; o. boritý

<sup>5</sup> Označení S se používá v USA, v Evropě se jedná o R-sklo (resistance), v Japonsku o T-sklo

<sup>6</sup> Oxid vápenatý

jež obsahují až 3000 děr, vzniklá vlákna pak mají průměr od 3,5 do 20 mikrometrů. Před navíjením jsou vlákna opatřena lubrikací z důvodu jejich počáteční křehkosti, lubrikace může působit dočasně (ve formě škrobu) či trvale, kdy zajišťuje finální ochranu a spojení s použitou maticí. Pro využití v kompozitu jsou vlákna dodávána ve formě pramenců, tkanin, rohoží či nasekaných vláken (od 0,22 mm do 5 mm). [10]



obr. 9 Výroba skleněných vláken [4] (upraveno)

### 2.1.2 Uhlíková vlákna

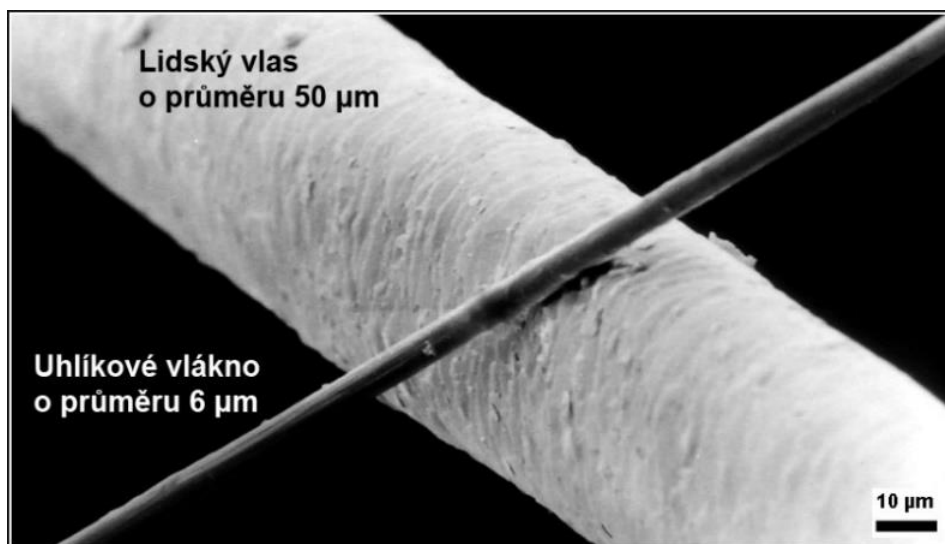
V oblasti vesmírného, leteckého či zbrojního průmyslu dochází k nahrazování skelných vláken vlákny uhlíkovými, ta tak tvoří součást trupů a křídel letadel, rotorů větrných elektráren, lodí či karosérií aut, přes třetinu spotřeby připadá na letecký průmysl a šestina na produkci sportovních potřeb. [4] Dle vlastností rozdělujeme uhlíková vlákna na vysokopevnostní HS s vysokou pevností v tahu a na vlákna vysokomodulová HM<sup>7</sup> s vysokým modulem pružnosti. Strukturu vláken tvoří z 90 % uhlík, dále kyslík (<1 %), vodík (<0,3 %) či dusík (<7 %). Výroba vláken se z 90 % provádí pyrolýzou organických vláken PAN<sup>8</sup>, z 10 % pak z celulózy či rozvlákněním anizotropní smoly z taveniny. Při teplotách dosahujících 1800 °C dochází k odštěpení všech látek vyjma uhlíku, získaná vlákna jsou leskle černá a jsou ještě za tepla spřádána, čímž získávají vysokou elasticitu.

<sup>7</sup> Z anglického High Strength a High Modulus

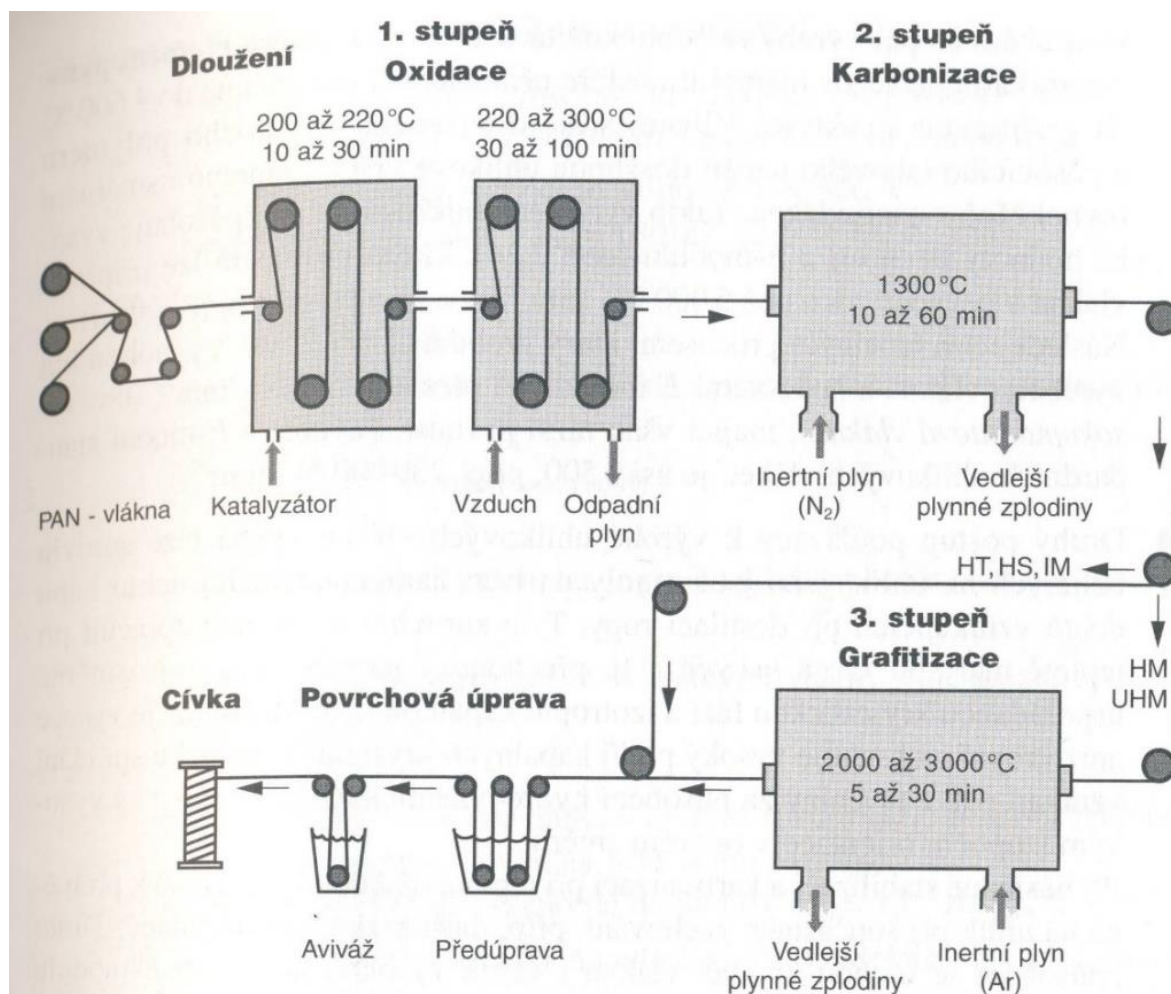
<sup>8</sup> PAN - Polyakrylonitrilová vlákna

Průměr spředených vláken je pak přibližně 5 až 10  $\mu\text{m}$  [10] [11]. Z důvodu malé adheze s pojivem jsou vlákna při výrobě povrchově upravována ponořením do kyseliny dusičné, plnicí funkci oxidačního činidla či se nechávají oxidovat na vzduchu, mimo zajištění lepší přilnavosti s matricí pak tento proces chrání vlákna vůči vlhkosti, chemickým látkám či elektrostatickým silám.

Výhodou uhlíkových vláken oproti skelným je nižší hmotnost (pohybující se mezi 1,6 až 2,0  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ), vyšší pevnost a vysoká odolnost i při teplotách až 2000  $^{\circ}\text{C}$  či vysoká odolnost vůči únavě. Vlákna mají vysokou odolnost vůči korozi a dobře se snášejí s lidskou tkání, to vede k jejich využití při konstrukci umělých končetin a implantátů. Uhlíková vlákna se také uplatňují při konstrukci radarů či satelitů z důvodu nerušení radarových paprsků. Nevýhodou vláken je pak jejich vyšší cena, nízká odolnost vůči nárazům či vysoká tepelná vodivost srovnatelná s mědí. Tepelná roztažnost pak dosahuje i mírně záporných hodnot. [4]



obr. 10 Porovnání velikosti uhlíkového vlákna s lidským vlasem [12]



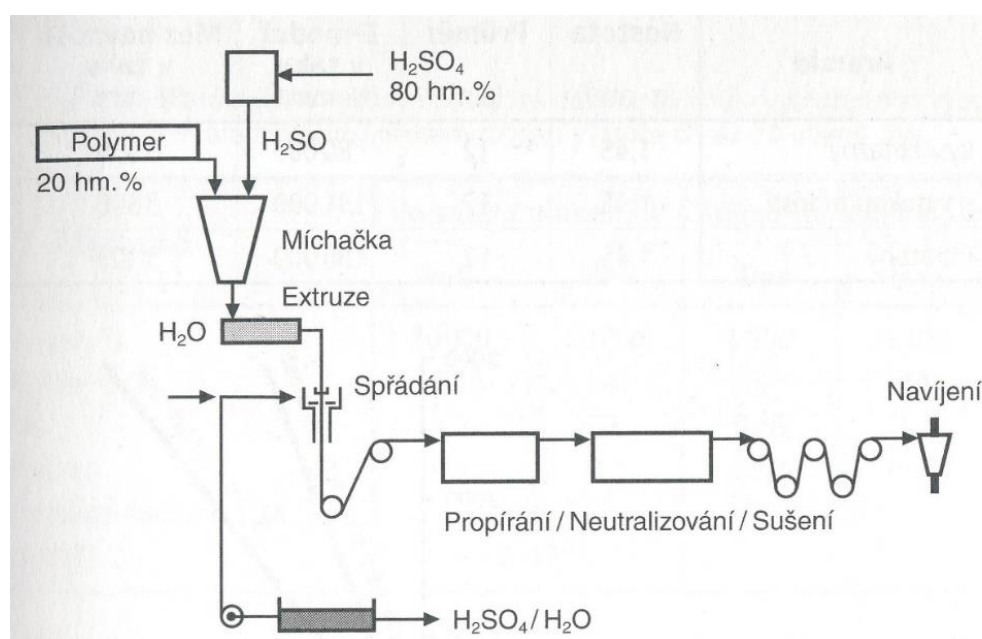
obr. 11 Schéma výroby PAN vláken [4]

### 2.1.3 Aramidová vlákna

Aramidová neboli kevlarová<sup>9</sup> vlákna jsou vytvořena na bázi lineárních polymerů. Slovo aramid pak vychází ze spojení slov aromatický a polyamid. Strukturu vlákna tvoří dlouhé řetězce aromatických jader pevně spojených vodíkovými můstky (-CO-NH-). Tato struktura přináší vláknům vysokou odolnost vůči mechanickému obrusu, tahu či vysokým teplotám. Teplota skelného přechodu nastává u těchto vláken přibližně při teplotě 300 °C, teplota rozkladu pak při 480 °C, z tohoto důvodu se aramidová vlákna uplatňují při konstrukci protipožárních obleků. Vlákna jsou nevodivá a pro svou absorpci rázové energie využívána ve zbrojním průmyslu při konstrukci neprůstřelných vest či přileb či jako náhrada azbestu v brzdových obloženích, pneumatikách či světlovodných kabelech.

<sup>9</sup> Obchodní značka firmy DuPont

Výroba vláken spočívá v jejich spřádání z vysokoviskozního 20 % roztoku a propírání v koncentrované kyselině sírové, pro lepší zpracování jsou vlákna dále propírána, neutralizována, sušena a opatřena aviváží. Spřádání z taveniny jako v případě skelných vláken není možné, neboť se teplota tavení nachází nad teplotou tepelného rozkladu. Nevýhodou aramidových vláken je absorpce vlhkosti (až 7 %), jež je činí citlivější oproti skelným či uhlíkovým vláknům, z tohoto důvodu jsou vlákna chráněna hydrofobní matricí. Matrice zároveň musí vlákna bezpečně ochránit vůči korozi či UV záření, které aramid poškozují. Mez pevnosti v tlaku je u aramidových vláken nižší než pevnost v tahu, z tohoto důvodu se jejich návrh nedoporučuje u konstrukcí namáhaných podélným tlakem. [4] [13]



obr. 12 Schéma výroby aramidových vláken [4]

## 2.1.4 Čedičová vlákna

Při nahrazování skleněných vláken se uplatňují vlákna bazaltová, ta se vyrábějí rozvlákněním anorganického čediče, tato výlevná vyvřelá hornina tvořící až 30 % zemské kůry má vysokou pevnost a tepelnou odolnost. Čedičová vlákna se tak uplatňují v protipožárních materiálech, protichemických materiálech či konstrukcích vystavených náhlým a prudkým teplotním změnám. Zároveň jsou vlákna odolná vůči UV záření, plísním a vlhkosti. Používají se tak jako součást tepelných izolací ve stavebnictví, geotextilií, armovacích tkanin (viz. obr. 14) či horkovzdušných filtrací. Nevýhodou vláken oproti skleněným je především jejich vyšší cena, která je přibližně dvojnásobná. [14]

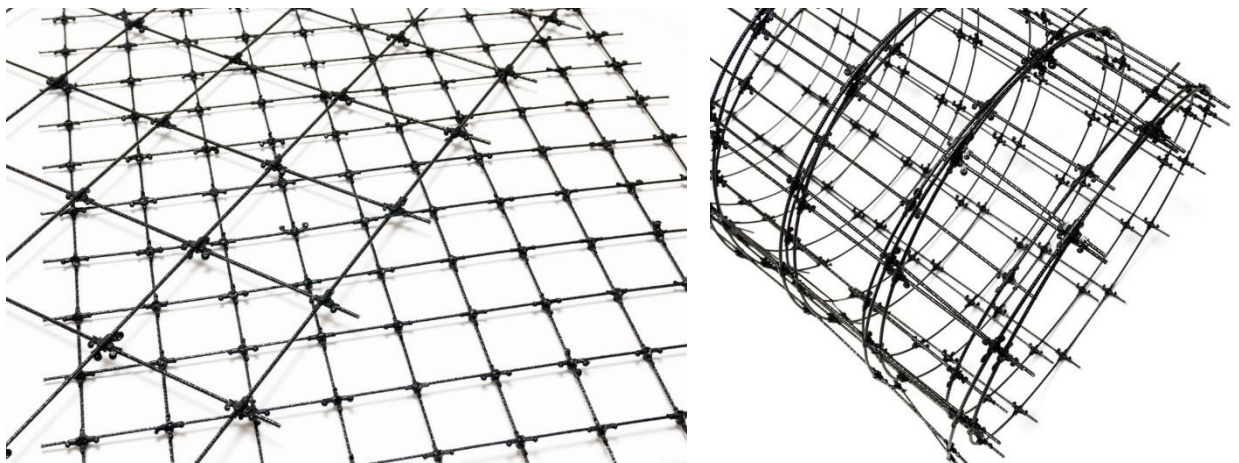
Zvláštním typem čedičových vláken jsou vlákna vzniklá přírodní cestou během vulkanických erupcí sopek, ta vznikají vyvrhnutím žhavé lávy do vzduchu a následným



rozptýlením působícího větru. Na Havaji jsou tato vlákna nazývána „vlasy bohyně Pele“<sup>10</sup>, na Islandu pak „vlasy čarodějnice“<sup>11</sup>, podle jejich vzhledu, křehkosti a ostrosti.



obr. 13 Příklad přírodních čedičových vláken zachycených na anténě [15]



obr. 14 Čedičová kompozitní síť [16]

<sup>10</sup> Bohyně Pele je v havajské mytologii bohyní ohně a sopek

<sup>11</sup> Z islandského originálu „Nornahár“



tab. 2 Vlastnosti vybraných vláken [4]

Typ vlákna	Hustota [g·cm <sup>-3</sup> ]	Modul pružnosti v tahu [kN·mm <sup>-2</sup> ]		Tepelná vodivost [W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	Pevnost v tahu [MPa]	Měrný el. odpor [Ω·cm]	Souč.tp.roztažnosti [10 <sup>-6</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	
		∥ s vlákny	⊥ k vláknům				∥ s vlákny	⊥ k vláknům
Skleněná vlákna								
E-sklo	2,60	73	73	1	2400	10 <sup>14</sup> ÷10 <sup>15</sup>	5	5
R-sklo	2,53	86	86	1	3500		4	4
Uhlíková vlákna								
HM	1,8	300	-	15	3000	10 <sup>-3</sup> ÷10 <sup>-4</sup>	-1,2	12
HS	1,75	240	15	17	5000		-1	10
Aramidová vlákna								
HM <sup>12</sup>	1,45	130	5,4	0,05	3000	10 <sup>5</sup>	-4	52
LM <sup>13</sup>	1,44	65	-	-	2800		-2	40
Čedičová vlákna	2,7	86-90	-	-	2800-4800	-	-	-

## 2.2 Matrice

Matrice (též pojivo či matrix) má za úkol přenášet namáhání na vlákna, spojit a chránit je, ta jsou samostatně velmi křehká a obtížně drží tvar a směr. Typ použitého pojiva tak určuje odolnost celé konstrukce vůči korozi, teplotě, ohni či elektricko-izolační vlastnosti. Vlivem zvýšené teploty a tlaku dochází k zesíťování prostorové sítě a vytvrzení materiálu, který tak získává mechanickou odolnost a odolnost vůči tavení a rozpouštění. Kombinací pojiva a vložených vláken tak dostáváme materiál, který je pevný a zároveň velmi odolný, matici přitom volíme dle její viskozity a povrchového napětí tak, aby bylo zajištěno smočení všech vláken a nedocházelo ke vzniku vzduchových bublin uvnitř struktury. [4]

Dle původu pojiva rozeznáváme:

- anorganická pojiva (např. cement, sádra, vápno)
- organická pojiva
  - termoplasty (např. polyethylen, polypropylen, polyvinylchlorid, polystyren)

<sup>12</sup> Vysokomodulové vlákno

<sup>13</sup> Nízkomodulové vlákno

- reaktoplasty (např. epoxidy, vinyl estery, polyestery)

Dle materiálu rozeznáváme:

- kompozity s polymerní matricí (pojivo tvoří např. polypropylen, polyamid, epoxid či styren-butadien, vlákna pak především sklo, uhlík či aramid)
- kompozity s kovovou matricí (slitiny hliníku, hořčíku, titanu či železa, sekundární fázi tvoří keramická či wolframová vlákna)
- kompozity s keramickou matricí (pojiva na bázi oxidu křemíku či zirkonia, doplněná vlákny z keramiky či uhlíku)
- kompozity s uhlíkovou matricí (tvořené uhlíkem a uhlíkovými vlákny)

Nejčastěji dnes využívaným pojivem jsou epoxidové pryskyřice, a to především z důvodu dobré adheze s použitými vlákny, nízkým dotvarováním, chemickou odolností a dobrou odolností vůči únavě či tečení. Epoxidy jsou také odolné vůči dynamickému namáhání, což je činí ideálním pojivem pro uhlíková vlákna využívaná při nejnáročnějších aplikacích, zároveň pak nachází uplatnění nejenom v kompozitech, ale především v lacích, lepidlech či nátěrech.

Dále se používají nenasycené polyesterové pryskyřice, jejichž výhodou spočívá v dobré zpracovatelnosti, nízké ceně (přibližně 3 až 4krát levnější než epoxidové), velkému smrštění až 9 % a dobré odolnosti vůči povětrnostním podmínkám. Nevýhodou polyesterů je styren obsažený v matrici, kde plní funkci rozpouštědla (cca 40 % roztok). Při jeho uvolňování dochází k poškozování životního prostředí, uvolňování je pak částečně sníženo aplikací ochranné vrstvy (např. parafínu) která vytvoří na povrchu tenký film. Další uplatnění nachází pryskyřice ve stavebnictví při výrobě umělého kamene, zalévacích hmot, litých podlah či dlažby.

Alternativu k epoxidovým a polyesterovým pryskyřicím tvoří pryskyřice vinylesterové, ty dosahují vyšší houževnatosti, teplotní odolnosti až 220 °C a vysoké chemické odolnosti. Z těchto důvodů se tento typ pojiva uplatní u konstrukcí umístěných v agresivním chemickém prostředí jako jsou chladicí věže, odsiřovací zařízení, přepravní nádrže, čistírny odpadních vod či chemicky odolné rošty.

tab. 3 Mechanické vlastnosti pojiva [17]

<i>Typ pojiva</i>	<i>Hustota [g·cm<sup>3</sup>]</i>	<i>Pevnost v tahu [MPa]</i>	<i>Modul pružnosti [GPa]</i>	<i>Modul pružnosti ve smyku [GPa]</i>	<i>Použitelné do teploty [°C]</i>
<i>Epoxidy</i>	1,2	130	4,5	1,6	90 – 200
<i>Polyestery</i>	1,2	80	4,0	1,4	60 – 100
<i>Fenoly</i>	1,3	70	3,0	1,1	120 – 200
<i>Polyamidy</i>	1,4	70	4,0 – 19,0	1,1	250 - 300

### 2.2.1 Hořlavost pojiva

Obecnou nevýhodou pojiv při návrhu je nízká zápalná teplota, dlouhodobé doutnání a dýmotvornost, vedoucí k ohrožení osob při požáru, to vede ke snížení použitelnosti FRP kompozitů u podzemních staveb, v obytných budovách či shromažďovacích prostorech. V porovnání s běžnými plastovými prvky však FRP kompozit při vyšších teplotách neodkapává, při snížení hořlavosti tak nachází uplatnění plniva, nátěry a odolná pojiva. [18] V tomto případě se nejvíce uplatní pojiva na bázi fenolických pryskyřic z důvodu jejich obtížné zápalnosti, malé kouřotvornosti a chemické odolnosti. [4] [19].

Další možností při snižování hořlavosti je použití retardérů hoření a snížení obsahu organické složky ve finálním produktu. Cílem retardérů tak je zpomalení rychlosti šíření plamene po povrchu či samozhášivý efekt, i přesto však nelze dosáhnout nehořlavosti. Jejich použití může dále vést k degradaci mechanických vlastností kompozitu, odolnosti vůči vnějším vlivům, barvy a paradoxně i vést ke zvýšení kouřotvornosti a produkci toxických zplodin hoření.

Příkladem těchto chemických zpomalovačů hoření jsou anorganické retardéry jako jsou halogeny či  $\text{Al}(\text{OH})_3$  též zvaný ATH. Hydroxid hlinitý (ATH) je nejrozšířenějším retardérem na světě, jedná se o bílý prášek získávaný z bauxitu. Po zahřátí nad 200 °C se rozkládá na vodní páru, která ředí směs paliva a kyslíku a absorbuje část vzniklého tepla, a na oxid hlinitý vytvářející na povrchu prvku tenký ochranný filtr. Pro kompozity zpracovávané nad 200 °C není možné ATH z výše uvedeného důvodu použít, bývá tak nahrazován např. hydroxidem hořečnatým  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ . Princip zpomalovače hoření

je v tomto případě stejný jako u ATH, zároveň při rozkladu dochází k neutralizaci kyselých plynů vzniklých při hoření plastu jako je  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  či  $\text{CO}_2$ .<sup>14</sup>

Výraznou nevýhodou těchto dvou zmiňovaných sloučenin je jejich nízká účinnost, to vede k nutnosti přidávání vysokých koncentrací (až 60%) a tím možnému snížení mechanických vlastností kompozitu. Dalším zpomalovačem mohou být sloučeniny antimonu ( $\text{Sb}_2\text{O}_3$ ), ten se při hoření uvolňuje do ovzduší a ve své plynné fázi se dále váže s halogeny, kyslíkem či vodou. Zabraňuje tak dalšímu uvolňování halogenů či přístupu kyslíku, obecnou nevýhodou je jeho toxicita, možná karcinogenita a podráždění dýchacích cest. [20]

Lepší fyzikální vlastnosti, ovšem za vyšší cenu, poskytují organické retardanty, jedná se například o trifenylofosfát ( $\text{C}_{18}\text{H}_{15}\text{O}_4\text{P}$ ) využívaný taktéž jako změkčovadlo při výrobě syntetických pryskyřic. Při jeho tepelném rozkladu dochází k uvolňování kyseliny fosforečné, která vytváří ochrannou povrchovou vrstvu kompozitu, nevýhodou je pak především vyšší těkavost a tím i snížení účinnosti v průběhu času. [20]



a) Pojivo uvolněné ze zkušebního tělesa během ohybové zkoušky vlivem zvýšené teploty

b) Zahoření zkušebního tělesa v píce během ohřevu

obr. 15 Příklady degradace kompozitu vlivem zvýšených teplot (foto autora)

<sup>14</sup> Oxid sírový; oxidy dusíku; o. uhličitý

## 2.2.2 Degradace a barvení matrice

Častým problémem používaných pojiv je jejich nízká odolnost vůči ultrafialovému záření, to je částečně absorbováno vloženými vlákny a dochází tak k poškození povrchu kompozitu. V případě světlých kompozitů tak dochází k jejich žloutnutí a v případě ostatních barev k rozkladu pigmentu, to je patrné především u pojiv na bázi styrenů jako jsou polyestery a vinylestery.

Částečnou ochranu skýtá návrh pojiv s ochrannými příměsemi jako je neopentylglykol či akryl, případně aplikace ochranné syntetické sítky z polyesteru či nylonu, která se aplikuje na povrch kompozitu. Další možností je přidávání plniv, které blokují průchod slunečních paprsků do hloubky materiálu, jedná se například o uhličitán vápenatý či mastek. Nevýhodou je možná degradace fyzikálních vlastností při vyšším obsahu těchto přísad ve struktuře kompozitu. [21]

Pro zbarvení kompozitu jsou do pojiva přidávána především anorganická barviva o velikosti 100 až 400  $\mu\text{m}$ . Při volbě zbarvení je pak nutné vzít v úvahu tvrdost vložených pigmentů a jejich účinek-poškrábání či poškození výztužných vláken, jako například u bílých pigmentů na bázi  $\text{TiO}_2$ , ty mají vysokou stálost vůči světlu, ale zároveň vysokou tvrdost což vede k abrazi vláken. [4]

tab. 4 Příklady pigmentů využívaných pro barvení kompozitů [4]

<i>barva</i>	<i>název</i>	<i>chem. vzorec</i>	<i>hustota [g·cm<sup>3</sup>]</i>	<i>tvrdost dle Mohse</i>
<i>modrá</i>	<i>kobalt</i>	$\text{Co}$	4,4	5,5
<i>zelená</i>	<i>oxid chromitý</i>	$\text{Cr}_2\text{O}_3$	5,2	9
<i>červená</i>	<i>oxid železitý</i>	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	5,2	5-6
<i>černá</i>	<i>saze</i>	$\text{C}$	1,8-1,9	1-2
	<i>oxid železitý</i>	$\text{Fe}_3\text{O}_4$	5,2	5-6
<i>bílá</i>	<i>oxid titaničitý</i>	$\text{TiO}_2$	3,9-4,2	5,5-7,5
	<i>sulfid zinečnatý</i>	$\text{ZnS}$	4,0	3

## 2.3 Výroba a zpracování kompozitů

Výroba kompozitů je dána charakterem finálního dílce, při výběru jeho zpracování tak hraje roli několik faktorů, u kterých je nutné zhodnotit výhody a nevýhody a případně zvolit určitý kompromis.

Výběrové faktory:

- Velikost výrobku
- Tvar povrchu a požadavek na jeho kvalitu
- Požadované vlastnosti výrobku
- Sériovost
- Cena výroby

Velikost a tvar finálního výrobku je nejdůležitějším faktorem při výběru výrobní technologie, některé metody umožňují pouze omezené tvary (např. metoda navíjení či odstředivého lití), některé pak jsou limitovány velikostí výrobku (např. metoda pultruze). Dalším faktorem při volbě výrobního postupu je sériovost výrobků a jejich produkované množství, při malém počtu dílců není ekonomicky rentabilní využívat např. metodu autoklávu, a naopak pro sériovou výrobu není vhodné volit ruční kladení. Při požadavku na dodržení finálních vlastností výrobku, je nutné zvolit vhodný typ pojiva a vláken, jejich použití a zpracování je totiž značně závislé na zvolené technologii. Dále uvádím několik běžných způsobů výroby a zpracování kompozitu.

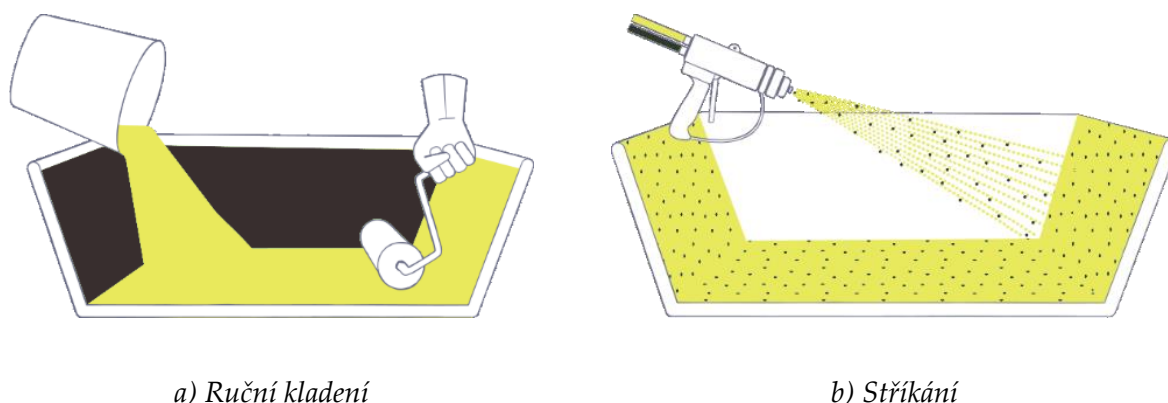
### 2.3.1 Ruční kladení

Ruční kladení či kontaktní lisování je nejlevnější způsob výroby, neboť vyžaduje nejméně vybavení z dále popsanych metod. Metoda spočívá v ručním kladení výztužných vláken na ošetřený povrch tzv. gelcoat<sup>15</sup>, či do formy a následná aplikace pryskyřice pomocí štětce či válečku. Zrychlení procesu výroby, je možné pomocí stříkací aparatury s pistolí, tou se nanáší na povrch směs krátkých sekaných vláken a pojiva. Tento způsob výroby je používán např. při konstrukci lodí, bazénů či nádrží.

Výhodou těchto metod je variabilita tvaru a velikosti výsledné konstrukce a nižší cena. Nevýhodou pak proces výroby, jenž je náročný na lidskou práci a čas, nízká produktivita oproti jiným metodám, kvalita pouze jedné strany povrchu, vyšší obsah vzduchových bublin pohybující se mezi 2-3 % či nutnost ekologického odsávání styrenu, obsaženého v používaných pryskyřicích.

---

<sup>15</sup> Gelcoat – povrchová ochranná vrstva laminátu, chráníci proti vnějším vlivům a zároveň plnící estetickou funkci, její tloušťka se pohybuje od 0,3 do 1 mm

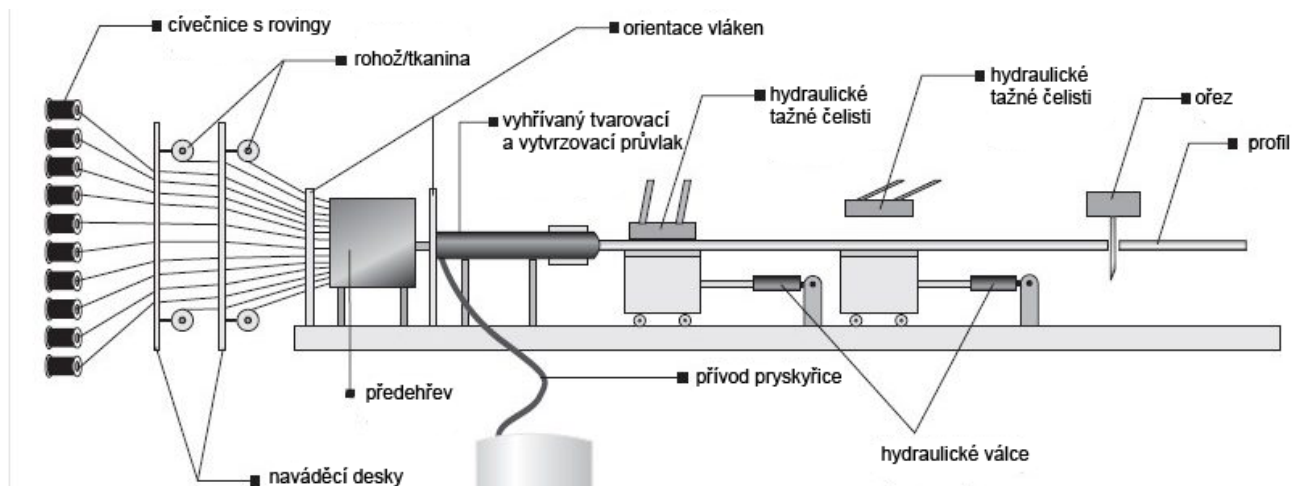


obr. 16 Příklad ručního kladení [22] (upraveno)

### 2.3.2 Pultruze

Pultruze neboli tažení je jednou z nejčastějších forem výroby kompozitů pro stavební účely. Při této metodě se využívají cívky s navinutou skelnou výztuží, jež je vtažena do srovnávače a protažena skrze lázeň s pryskyřicí a plnivem. Tento krok zajistí výztuži ochranu vůči vnějším vlivům, chemickou odolnost, odolnost vůči UV záření či případnou samozhášivost. Následně je prosycená výztuž vedena skrze připravené formy a vytvrzovací zařízení, jež ji vytvarují a zpevní do finálního produktu. Na výstupu je produkt řezán na potřebné délky.

Výhodou této techniky je především automatizace, rychlost, nízká cena a dobré mechanické vlastnosti, neboť technologie zaručuje pravidelné rozložení vláken v průřezu. Pultruze je tak využívána při výrobě protlačovaných profilů, které nahrazují ocelové válcované profily používané ve stavebnictví, maximální šířka vzniklých profilů je 500 až 1000 mm, tloušťka stěn pak až 50 mm. Nevýhodou této techniky je nutnost zachovat konstantní tvar při výrobě aktuálního profilu či náklady spojené s vyhříváním tvarovacích průvlaků. [23] [24]



obr. 17 Výroba pomocí pultruze [24] (upraveno)



obr. 18 Použití protlačovaného profilu při renovaci lanové dráhy (foto autora)

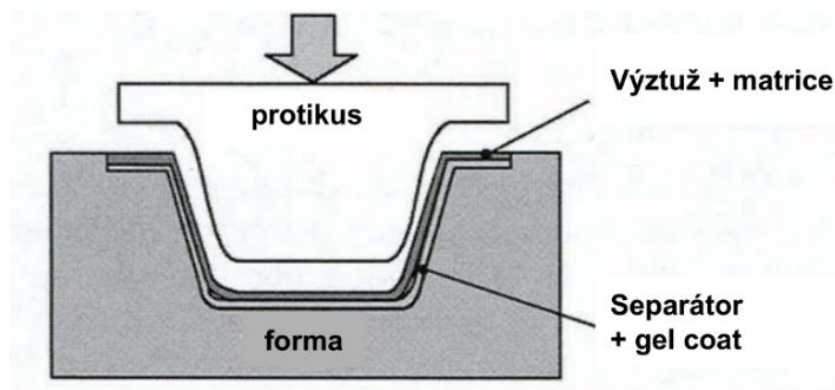
### 2.3.3 Lisování ve formě

Při lisování jsou využívány prepregy SMC a BMC, ty jsou vloženy do požadované formy a umístěny do lisu (obr. 19). Následně jsou za vysokého tlaku a tepla kompozity vytvrzeny. SMC<sup>16</sup> je materiál složený z různých prvků, vznikající míšením polyesterové pryskyřice, plniva a modifikátorů. Pryskyřice je nanášena na sekanou skelnou výztuž a doplněna ochrannou fólií. Celá struktura je dále umístěna do série válců a dochází tak k pevnému spojení pojiva a vláken. Výsledný produkt je dodáván např. v rolích či plátech, nařezán do požadovaného tvaru a vytvrzen. Výhodou je především vysoká produktivita a oboustranný kvalitní povrch, nevýhodou pak vysoká pořizovací cena výrobních

<sup>16</sup> SMC – Sheet Molding Compound



lisů, a tudíž výhodnost pouze v rámci sériové výroby. BMC<sup>17</sup> je kompozitní materiál vzniklý smícháním skelných vláken, termosetické pryskyřice a minerálních plniv. Produkovaná hmota je dále využívána při výrobě pomocí vstřikování či lisování [10] [23].



obr. 19 Výroba lisováním [25] (upraveno)

### 2.3.4 Lití do formy

Při této metodě je pryskyřice postupně vlévána do forem, křížem vyztužených vloženými vlákny, forma je poté ohřívána čímž dojde k vytvrzení pryskyřice. Následně je forma odstraněna a výsledný produkt nařezán na potřebné rozměry, takto vyrobené produkty se využívají např. při konstrukci pochozích roštů nebo schodišťových stupňů. Výhodou metody je vyšší tuhost těchto výrobků, nevýhodou pak je absence ochranné podpovrchové roušky z důvodu použité technologie, menší objem vložené výztuže a tím i odolnost vůči nárazům.

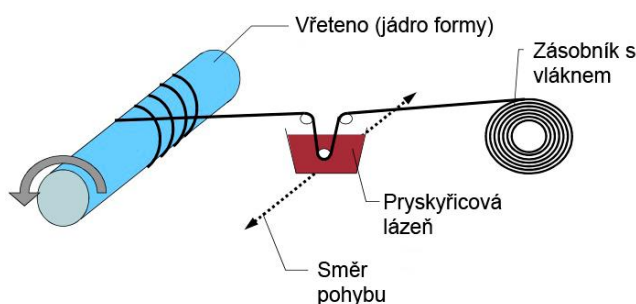


obr. 20 Použití pochozí roštu při renovaci lanové dráhy na Petřín (foto autora)

<sup>17</sup> BMC – Bould Molding Compound

### 2.3.5 Navíjení

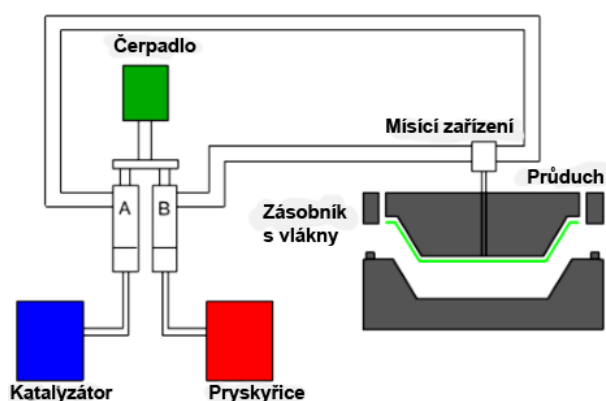
Při této metodě je svazek výztuží navíjen na formu-jádro, která může být vyjímatelná či se po ukončení stává součástí výrobku. Na otáčivou formu je postupně navinuta výztuž obalená pryskyřicí případně navlhčená po navinutí, následně je výrobek vložen do pece a vytvrzen. Výhodou je automatizace produkce a dobré fyzikální vlastnosti, nevýhodou pak vysoké pořizovací náklady na navíjecí stroje a obtížné odstraňování vložené formy. Tato metoda je využívána při výrobě potrubí, nádrží a nádob či zásobníků paliv. [10]



obr. 21 Výroba navíjením [26] (upraveno)

### 2.3.6 Lisování se vstříkem matrice

Lisování se vstříkem či tzv. reakční vstříkování<sup>18</sup> je metoda, při které se do formy vkládá suchá výztuž a poté je uzavřena. Následně je do formy vstříknuta pryskyřice pod tlakem 0,25-0,35 MPa tak, aby došlo k celkovému prosycení vložené výztuže, po vytečení přebytečné pryskyřice se výrobek nechá vytvrdnout a vyjme se z formy. Výhodou je oboustranně dobrý povrch a dobrá tloušťková tolerance, nevýhodou pak vysoké náklady na pořízení formy a nižší obsah skleněné výztuže [10].

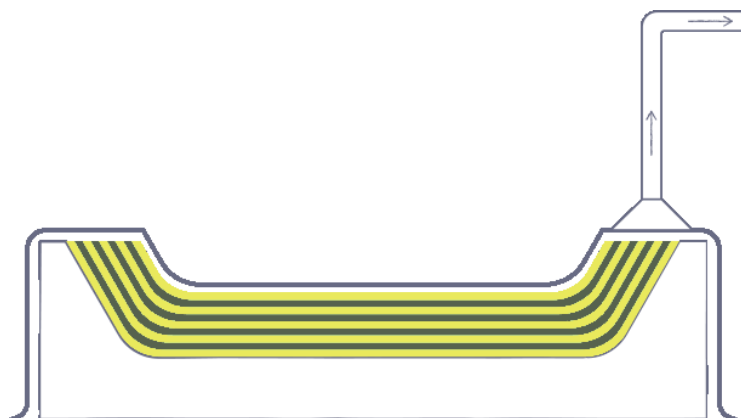


obr. 22 Výroba vstříkováním do matrice [27] (upraveno)

<sup>18</sup> V cizojazyčné literatuře označováno jako RTM metoda – resin transfer molding

### 2.3.7 Metoda vakuového vaku

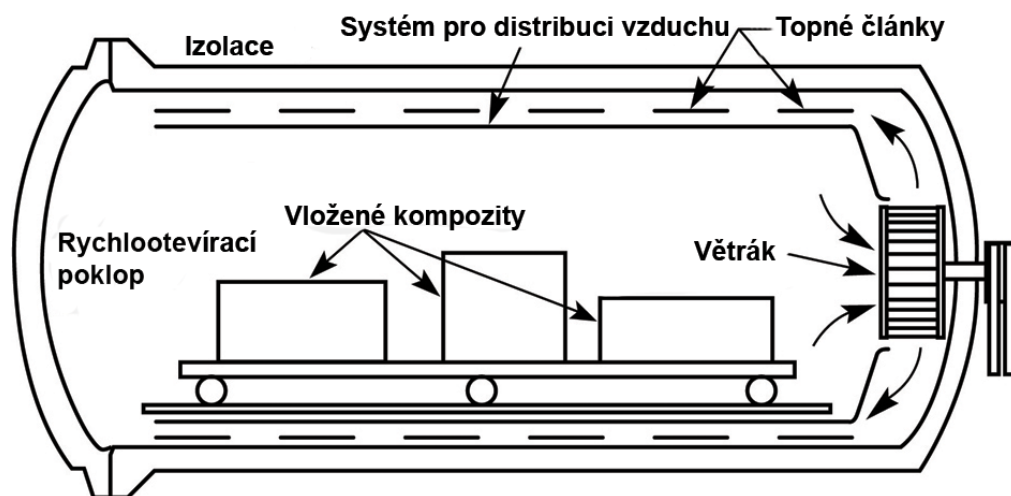
Při této metodě je na povrchu kompozitu uložen tenký film, jenž nepropouští vzduchu. Forma vyplněná výztuží a pojivem je poté vakuována, přičemž dochází k vytlačení přebytečných vzduchových bublin tlakem umístěné fólie a následně je výrobek vytvrzen. Výhodou této metody je minimální přítomnost vzduchových bublin ve finálním výrobku a vynikající využití při výrobě sendvičových konstrukcí. Nevýhodou metody je velké množství odpadu a náročnost celého procesu na čas. Vylepšením této metody je tzv. metoda tlakového vaku, při které je na vakuový vak umístěn vak tlakový, čímž je proces vytlačení efektivnější. Použití dalšího vaku však zároveň prodražuje výrobu. [10]



obr. 23 Metoda vakuového vaku [22] (upraveno)

### 2.3.8 Lisování v autoklávu

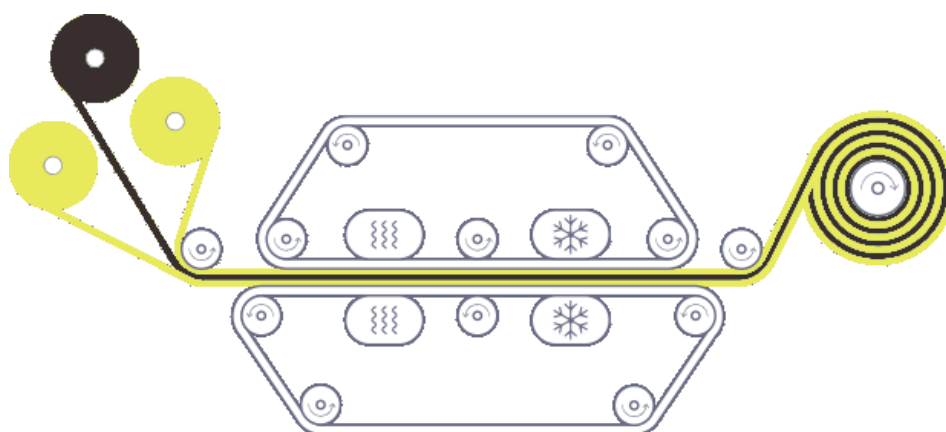
Při konstrukci leteckých dílů, částí kosmických raketoplánů či konstrukcí vyžadujících dokonalou přesnost se uplatňuje výroba kompozitu pomocí autoklávu. Polotovar tvořený tzv. prepregem, tedy směsí vláken nasycených pryskyřicí, je vložen do formy a umístěn do tlakové nádoby (autoklávu), kde je pod vysokým tlakem a teplotou mezi 120 °C až 200 °C vytvrzen. Výhodou této metody je dokonalé vytlačení vzduchových bublinek, stlačení jednotlivých vrstev, možnost podrobně celý proces řídit a kontrolovat a zároveň vytvářet kompozity velkých rozměrů. Nevýhodou je především vysoká pořizovací cena autoklávu. [28]



obr. 24 Metoda lisování v autoklávu [29] (upraveno)

### 2.3.9 Kontinuální laminace

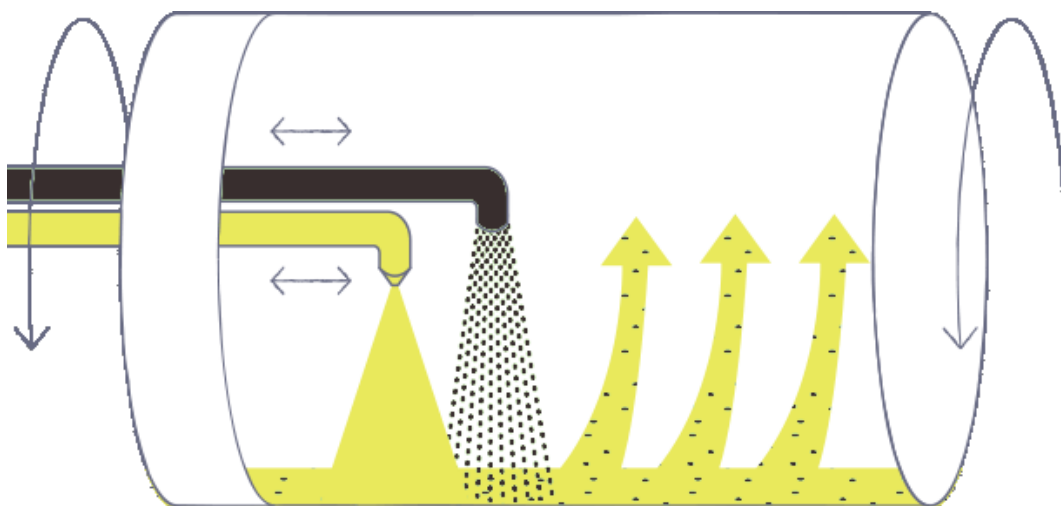
Metoda kontinuální laminace se uplatňuje především při výrobě vlnitých či průsvitných desek, panelů, kapotáže či např. silničních značek. Při této metodě je na tenkou ochrannou fólii zároveň aplikována vrstva pryskyřice, vláken a ochranných plniv. Celá směs je následně protažena skrze soustavu válců čímž dochází ke zkompletování a vytvrzení. Na závěr je kompozit nařezán na potřebnou šířku a délku. Výhodou je především zdánlivě „nekonečná“ délka finálního produktu s běžnou šířkou do tří metrů, minimální množství odpadu a oboustranně hladký povrch. Nevýhodou pak cena výrobní linky či omezená změna tvaru vyráběného dílu. [10] [22]



obr. 25 Výroba kontinuální laminací [22] (upraveno)

### 2.3.10 Odstředivé lití

Pro výrobu nádrží, zásobníků, komínů či trubek kruhového tvaru je často využívána metoda lití založená na odstředivé síle. Při této metodě je do vnitřku formy umístěna výztuž ve formě sekaných vláken a při otáčení kolem své osy je do formy vháněno pojivo, nejčastěji jde o polyesterovou pryskyřici. Jako plnivo se pak využívá uhličitánu vápenatého či křemičitého písku. Rotací vzniká uvnitř formy odstředivá síla a zároveň dochází k jejímu nahřívání, čímž je dosaženo vytvrzení pryskyřice. Finální povrch kompozitu poté tvoří vložená ochranná fólie či vytvrzená pryskyřice, např. vinylester, zaručující antikorozi ochranu finálního výrobku např. trubek splaškové kanalizace. Výhodou metody je především oboustranně hladký povrch, nízká náročnost a automatizace. Nevýhodou naopak vyšší cena forem, nízká produktivita a limitace velikosti forem z důvodu jejich obtížného otáčení. [10] [22]



obr. 26 Výroba odstředivým litím [22] (upraveno)



obr. 27 Využití kompozitních komínů v uhelných elektrárnách [30]



## 2.4 Recyklace kompozitu

Vzhledem ke stále narůstajícímu množství vyrobeného kompozitu je též nutné se zabývat jeho zpracováním, likvidací či recyklací na konci životnosti výrobku. V roce 2015 tak například kompozitní odpad s vyztuženými skleněnými vlákny, dosáhl hodnoty 304 tisíc tun, zároveň vzhledem k nařízení Evropské unie, která vyvíjí snahu o recyklovatelnost minimálně 70 % hmotnosti výrobku, dochází ke zvýšení tlaku na výrobce kompozitu. [31]. Dle zvolené metody lze kompozity zpracovat na mletou či sekanou drť obsahující zbytky vláken, pojiva a plniva (nejčastěji křída či vápenec), rozpustit použitou matici v roztoku acetonu či rozložit ji během pyrolýzy a získat tak zpět použitá vlákna, je ovšem nutné zajistit ochranu ovzduší před vzniklými polutanty. Drcenou směs lze dále využít například jako plnivo, za cenu snížení mechanických vlastností.

Nevýhodou při zpracování recyklátu je zhoršená kvalita povrchu nově vzniklého výrobku a nižší odolnost vůči zatékání, tudíž se recyklace týká především neexponovaných vnitřních prvků. V novém výrobku je pak možné využít až 20 % recyklovaného kompozitu při zachování stávajících mechanických vlastností. Dále je nutné počítat s nižší odolností vůči nárazům, poklesem tažnosti výrobku a odolnosti vůči působícím chemikáliím vlivem zkrácení vláken a zúžení jejich průměru při recyklačním procesu. [4]



obr. 28 Směs uhlíkových vláken o velikosti 6 až 12 mm [32]



obr. 29 Mletá směs uhlíkových vláken určená pro recyklaci [33]

## 3 Experimentální část

Cílem experimentální části je ověření fyzikálně-mechanických vlastností kompozitu vyztuženého vláknem, zjištěné výsledky pak jsou aplikovány v navazující praktické části při návrhu konkrétní konstrukce. Vzhledem k rozmachu kompozitních materiálů vzniklo velké množství zkušebních metod, které zahrnují statické testy v tlaku, tahu, ohybu či smyku, únavové zkoušky zahrnující vliv tzv. creepu a relaxace materiálu, testy hořlavosti či povětrnosti odolnosti.

Z důvodu nerovnoměrného využití a vývoje kompozitů ve světě tak nezávisle na sobě vzniká celá řada zkušebních norem, jež dále rozvíjejí jednotlivé zkušební metody, příkladem tak mohou být normy DIN<sup>19</sup>, ASTM<sup>20</sup>, ISO<sup>21</sup> či naše ČSN<sup>22</sup>. Dále jsou popsány požadavky na zkoušky kompozitů v tahu a při ohybu dle norem ČSN EN ISO 527-1 a ČSN EN ISO 14125. Pro analýzu chování kompozitních materiálů pak byla zvolena zkouška tělesa při čtyřbodovém ohybu se zahrnutím vlivu zvýšené teploty pro simulaci požárního scénáře. Chování kompozitu během zkoušky je ovlivněno především typem použitého vyztužného vlákna, jeho orientací, délkou, procentuálnímu zastoupení vlákna v kompozitu, typu matrice a jejímu stupni vytvrzení.

### 3.1 Zkouška v tahu

Pro účely zkoušení a stanovení tahových vlastností je možné využít českých norem převzatých z evropské normy EN ISO 527, přeložené normy tak tvoří jednu řadu zahrnující obecné principy zkoušení, metody pro zkoušení tvářených plastů, fólií, izotropních a ortotropních kompozitů či kompozitů jednosměrně vyztužených vláknem. Normy tak udávají podmínky mechanického zkoušení a dále rozvíjejí doporučené tvary zkušebního tělesa. Uvedené normy se používají ke zkoušení a vyhodnocování chování zkušebních těles při namáhání v tahu a pro následné stanovení meze pevnosti v tahu, modulu pružnosti v tahu a dalších tahových charakteristik ze závislosti napětí

---

<sup>19</sup> DIN – Deutsche Industrie-Norm, normy vydávané německým ústavem pro normalizaci

<sup>20</sup> ASTM – American Society for Testing and Materials, normy vydávané americkou společností pro testování a materiály

<sup>21</sup> ISO – International Standards Organization, normy vydávané Mezinárodní organizací pro normalizaci

<sup>22</sup> ČSN – České technické normy, normy vydávané Českým normalizačním institutem

v tahu/poměrné prodloužení za daných podmínek. Volba použité normy závisí na typu kompozitu, technice jeho výroby a použitých výztužných vláknech. Obecně lze tyto normy aplikovat na tuhé a polotuhé materiály z termoplastů pro vstřikování, lisování, vytlačování a odlévání, směsí plněných a vyztužených např. krátkými vlákny, tyčinkami či destičkami. Dále pak pro tuhé a polotuhé reaktoplasty pro lisování a odlévání včetně plněných a vyztužených směsí, s výjimkou směsí vyztužených textilními vlákny či termotropní<sup>23</sup> polymery na bázi tekutých krystalů. [34]

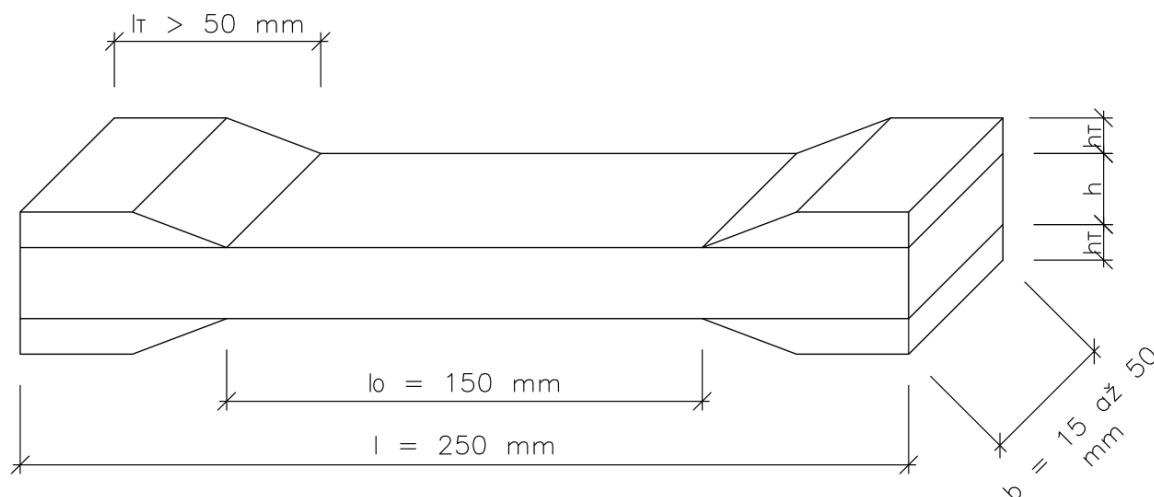
Pro zkoušky v tahu jsou doporučena tělesa prizmatického tvaru se zesílením v místě uchycení do čelistí zkušebního zařízení, to snižuje porušení povrchu otláčením působících čelistí. Pro zesílení je využíván materiál s podobným modulem pružnosti jako má zkušební těleso, se zkosením ve směru tělesa. Zkoušená tělesa nesmí být pokroucená či poškrábána, tento požadavek je kontrolován vizuálně či pomocí mikroskopu.

Zkušební zařízení musí být schopné udržovat definovanou zkušební rychlost dále specifikovanou v čl. 5.1.2 [34] či v navazujících normách dle zvoleného typu kompozitu. Čelisti zařízení nesmí umožnit proklouzávání upevněného tělesa či způsobit jeho předčasné promáčknutí. Pro stanovení poměrného prodloužení je používán průtahoměr, jenž musí být schopen stanovit změnu počáteční délky tělesa v průběhu experimentu s přesností na 1 %. Před zahájením zkoušky se změří šířka a tloušťka uprostřed každého tělesa. Případné vzorky, které svými rozměry nevyhovují, se ze zkoušení vyřadí. Následně se těleso upevní do čelistí tak aby bylo zabráněno jeho vyklouznutí či pohybu v průběhu zkoušky. Během zkoušky je těleso protahováno ve směru své hlavní podélné osy za konstantní předem definované rychlosti až do fáze porušení tělesa či dosažení zvolené deformace.

---

<sup>23</sup> Termotropní či kapalněkrystalické látky, jsou látky tvořící přechod mezi kapalnou a pevnou fází, takové látky si částečně zachovávají pravidelné molekulární uspořádání i v kapalném stavu.





obr. 30 Příklad zkušebního tělesa pro zkoušku v tahu

## 3.2 Zkouška za ohybu

Pro zkoušení vláknny vyztužených plastových kompozitů za ohybu byla převzata a přeložena evropská norma EN ISO 14125:1998. Zkouška popisuje a dále rozvíjí podmínky při zkoušení zkušební vzorku za tříbodového a čtyřbodového ohybu, definuje rozměry tělesa, rychlost zatěžování, počet zkušebních vzorků a vyjádření výsledků. Popsané zkušební metody jsou použitelné pro zkoušení termoplastů či reaktoplastů s vlákny delšími než 1 mm, při případném použití nevyztužených plastů či vláken kratších než 1 mm je vhodné použít normu ČSN EN ISO 178. Metoda je využitelná ke stanovení pevnosti kompozitu v ohybu, zjištění ohybového modulu či dalších parametrů vycházejících ze vztahu ohybového napětí a deformace za definovaných podmínek. Dále uvedené postupy a doporučení jsou převzaty z normy ČSN EN ISO 14 125.

### 3.2.1 Požadavky na zkušební tělesa a měřicí přístroj

Zkušební zařízení musí odpovídat ISO 5893, jeho konstrukce a ovládání musí být schopné udržovat zvolenou zkušební rychlost. Vzdálenost podpěr  $L$  má být nastavitelná, zatěžovací trny pak mají být uspořádány dle obr. 31. Poloměry trnů musí odpovídat hodnotám uvedeným v citované normě, v našem případě je tedy  $R_2$  rovno 5 mm s tolerancí  $\pm 0,2$  mm. Chyba snímače síly nesmí přesahovat  $\pm 1$  % a snímače průhybu nesmí přesahovat  $\pm 1$  % z měřené hodnoty v celém rozsahu, posuvné měřítko či použité

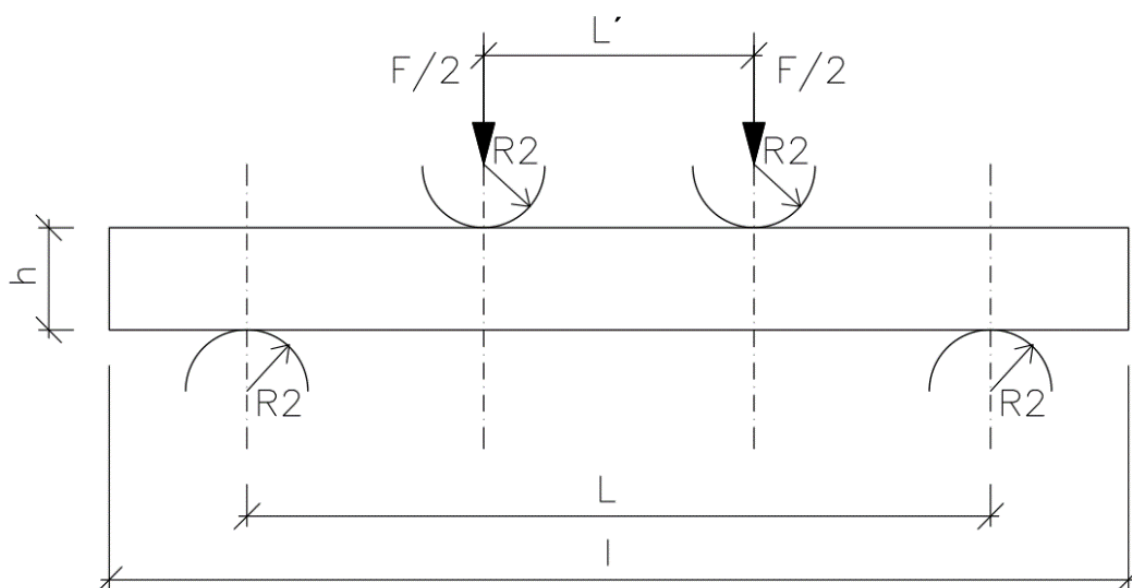
ekvivalentní měřidlo musí být schopné měřit nejméně s přesností 0,01 mm a musí umožnit měření šířky  $b$  a tloušťky  $h$  zkoušeného vzorku. [35]

Před zahájením zkoušky je nutné stanovit uprostřed každého tělesa šířku  $b$  a tloušťku  $h$  s přesností 1 %, tělesa mimo povolenou toleranci  $\pm 2$  % z průměrné hodnoty se vyloučí a nahradí jinými vzorky. Vzdálenost podpěr  $L$  je nutné nastavit s přesností 1 % dle vypočtené hodnoty. Vybrané těleso je symetricky umístěno na dvě podpěry a označeno na straně vystavené tahu, mezi působící trny je poté vhodné umístit roznášecí podložku např. z polypropylenu o tloušťce 0,2 mm která snižuje poškození povrchu v místě zatěžovaném zkušebními trny.

Rozměry tělesa musí odpovídat hodnotám dle čl. 6.1.3 [35] a případné rozdíly v rozměrech musí být zcela jasně uvedeny v protokolu o zkoušce. Jiná zkušební tělesa musí být ve stejném poměru jako v případě vhodně zvoleného tělesa a jejich rozměry se poté stanoví dle přílohy A [35] v závislosti na tloušťce tělesa. Zvolený průřez kompozitu musí být pravoúhlý bez zaoblení, jeho tloušťka pak ve střední třetině délky nesmí překročit o více než 2 % průměrnou hodnotu ve střední části. Osa zkoušeného tělesa musí odpovídat některému ze základních směrů, tedy buď rovnoběžně s vlákny (taktéž označován jako směr „1“ či podélný) či směr kolmý (označován jakožto směr „2“ či příčný).

Pokud by kompozitní materiál vykazoval v těchto dvou směrech velké rozdíly ve vlastnostech, je vhodné provést posouzení v obou směrech. Pro zajištění spolehlivosti je nutné provést zkoušku nejméně pěti zkušebními vzorky, v případě, že dojde k porušení tělesa mimo střední část v průběhu čtyřbodového ohybu, je nutné toto těleso vyřadit. [35]

Během provádění zkoušky je zvolené těleso umístěno ve zkušebním zařízení a ohýbáno při konstantní rychlosti přírůstku deformace do okamžiku jeho porušení či dokud nedojde k překročení hranice maximální povolené deformace tělesa, při zkoušení je pak automaticky zaznamenávána velikost působící síly a průhyb tělesa. [35]



obr. 31 Uspořádání při čtyřbodovém zatěžování ( $L = 3L'$ )

### 3.2.2 Příprava zkoušky

Pro testování těles byla zvolena zkouška při čtyřbodovém ohybu, její výhodou je především konstantní ohybový moment vznikající mezi zatěžovacími body a menší tlakové napětí na rozdíl od tříbodového ohybu, kde dochází ke zvýšenému kontaktnímu napětí od zatěžovacího trnu uprostřed rozpětí vzorku. [35]

V rámci experimentální části této diplomové práce jsem se zabýval zkoušením kompozitních těles a zjišťováním jejich ohybových vlastností při zahrnutí vlivu zvýšené teploty simulující požár. Tyto testy byly prováděny ve zkušební laboratoři katedry ocelových a dřevěných konstrukcí, Fakulty stavební v Praze v průběhu května a června 2018. Pro zkoušení kompozitních vzorků bylo použito zkušební zařízení MTS QTEST/100, vybavené zatěžovacím příčným rámem, obslužným dotykovým panelem a výpočetní stanicí s ovládacím a měřicím softwarem Testwork 4 (obr. 32 a obr. 34). Manipulace s rámem, jeho chování a rychlost, velikost zatěžovací síly či záznam dosažených výsledků je pak umožněn skrze výše zmíněný software.

Další součástí je zkušební přípravek ze svařovaných zatěžovacích trnů a pracovní ocelové desky, která vymezuje zkušební prostor a umožňuje podepření vzorku (obr. 35). Pro výrobu zatěžovacích trnů a neposuvných podpor, byly vyrobeny přípravky z ocelové kulatiny o průměru 10 mm. Kulatiny byly přivařeny ke styčným ocelovým deskám pomocí

koutového svaru, tak aby bylo zabráněno sklopení podpor a zároveň byl umožněn průhyb tělesa v průběhu jeho zatěžování. V průběhu zkoušení byl automaticky zaznamenáván vertikální posun příčnicku, zatěžovací síla a čas pro vyhodnocení maximálního ohybového napětí (pevnost v ohybu) v MPa a ohybového modulu v GPa.

Pro zkoušky prováděné v rámci této práce, byly zvoleny sady kompozitních těles odříznutých z pásnice protlačovaného U profilu s polyesterovou matricí, vzhledem k tomu jsou hrany některých profilů řezané či zaoblené (obr. 36). Podíl výztužných skleněných vláken v jednotlivých tělesech pak byl přibližně 70 %.

Do hrany jednotlivých vzorků v hloubce 10 až 12 mm byly za pomoci sloupové vrtačky vyvrtány otvory pro umístění termočlánku, který byl následně v průběhu zahřívání v píce (obr. 33 a obr. 37) a při zatěžování připojen k ručnímu digitálnímu měřiči teplot Voltcraft (tzv. pyrometru umožňujícím měření pomocí infračerveného paprsku či pomocí zapojeného termočlánku). Pro zabránění poklesu teploty v průběhu zatěžování a během transportu z pícky byla tělesa zabalena do nasouvacího pouzdra z minerální vaty, tak aby při zatěžování nebylo bráněno deformacím. Před zahájením experimentu byly stanoveny rozměry zkušebních vzorků pomocí digitálního posuvného měřítka viz. tab. 5.

Protože tělesa neodpovídala doporučeným rozměrům dle čl. 6.1.3 [35], vzdálenost podpor  $L$  byla stanovena dle přílohy A uvedené normy v závislosti na tloušťce tělesa a byla rovna 101,25 mm. Zatěžovací zkušební rychlost pak byla zvolena dle čl. 9.3 [35] jako:

$$v = \frac{\varepsilon' * L^2}{6h} = \frac{0,01 * 101,25^2}{6 * 4,5} \cong 3,8 \text{ mm/min} \quad R. 1$$

Pro účely testování byla tělesa rozdělena do dvou sad, tělesa sady č. 1 byla zahřívána na teplotu 110 až 130 °C, sada č. 2 byla zahřívána na teplotu 170 až 200 °C. Mimo tyto sady byla tělesa č. 1 až 9 nejprve zahrnuta do sady č. 3 a vyzkoušena při běžné teplotě, která byla v průběhu měření v rozmezí 26 až 30 °C.

V průběhu zkoušky byla automaticky zaznamenávána působící síla a posun příčného rámu a manuálně měřena teplota uvnitř kompozitního tělesa v intervalu 15 s, s pomocí ručního teploměru a termočlánku umístěného uvnitř těles.

tab. 5 Rozměry zkušebních vzorků

Číslo vzorku	Délka $l$ [mm]	Šířka $b$ [mm]	Tloušťka $h$ [mm]	Váha tělesa $m$ [g]	Hrany tělesa
1	172,0	25,00	4,5	38,0	Obě řezané
2	173,0	25,00	4,5	38,0	Jedna zaoblena
3	175,0	25,00	4,5	38,0	Obě řezané
4	173,5	25,29	4,81	38,0	Jedna zaoblena
5	182,5	25,29	4,83	39,0	Jedna zaoblena
6	180,5	25,27	4,77	39,0	Obě řezané
7	167,5	25,41	4,78	36,0	Jedna zaoblena
8	176,0	25,27	4,87	38,0	Obě řezané
9	170,0	25,43	4,77	37,0	Jedna zaoblena
10	177,0	25,40	4,76	38,0	Obě řezané
11	180,5	25,25	4,72	37,0	Jedna zaoblena
12	174,0	25,25	4,84	38,0	Jedna zaoblena
13	172,5	25,31	4,80	36,0	Jedna zaoblena
14	169,5	25,39	4,72	35,0	Jedna zaoblena
15	171,0	25,28	4,70	36,0	Jedna zaoblena
16	175,5	25,32	4,81	38,0	Jedna zaoblena
17	179,5	25,38	4,77	38,0	Obě řezané
18	179,0	25,25	4,67	37,0	Jedna zaoblena
<b>Průměrná objemová hmotnost [kg/m<sup>3</sup>]</b>				<b>1793,45</b>	



obr. 32 Zkušební zařízení MTS QTEST/100



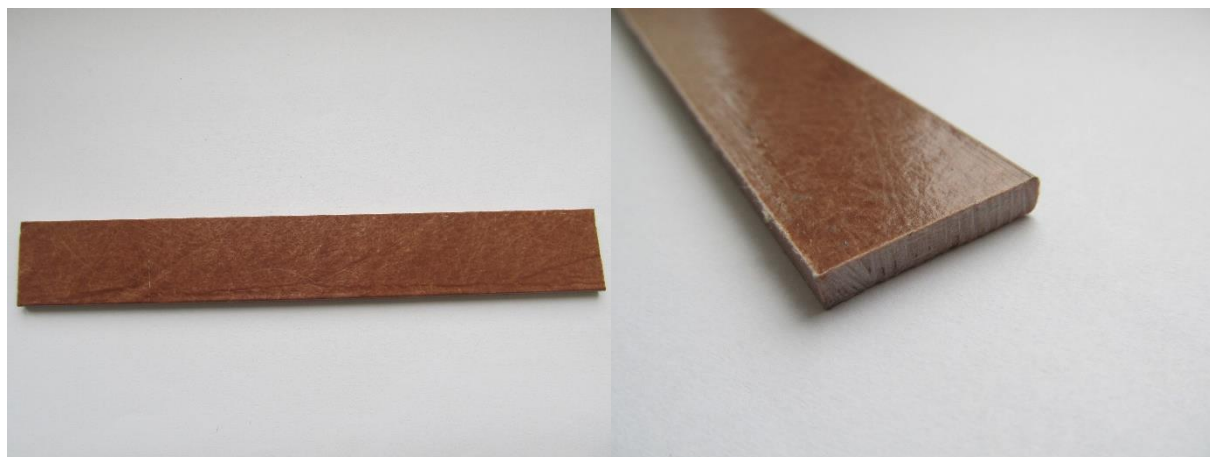
obr. 33 Pícka s topnými spirálami a ovládací panel s termostatem



*obr. 34 Výpočetní stanice pro kontrolu zařízení a záznam průběhu zkoušky*



*obr. 35 Zkušební ocelový přípravek*



*obr. 36 Vzorek zkušebního tělesa*





obr. 37 Termočlánek umístěný v kompozitu

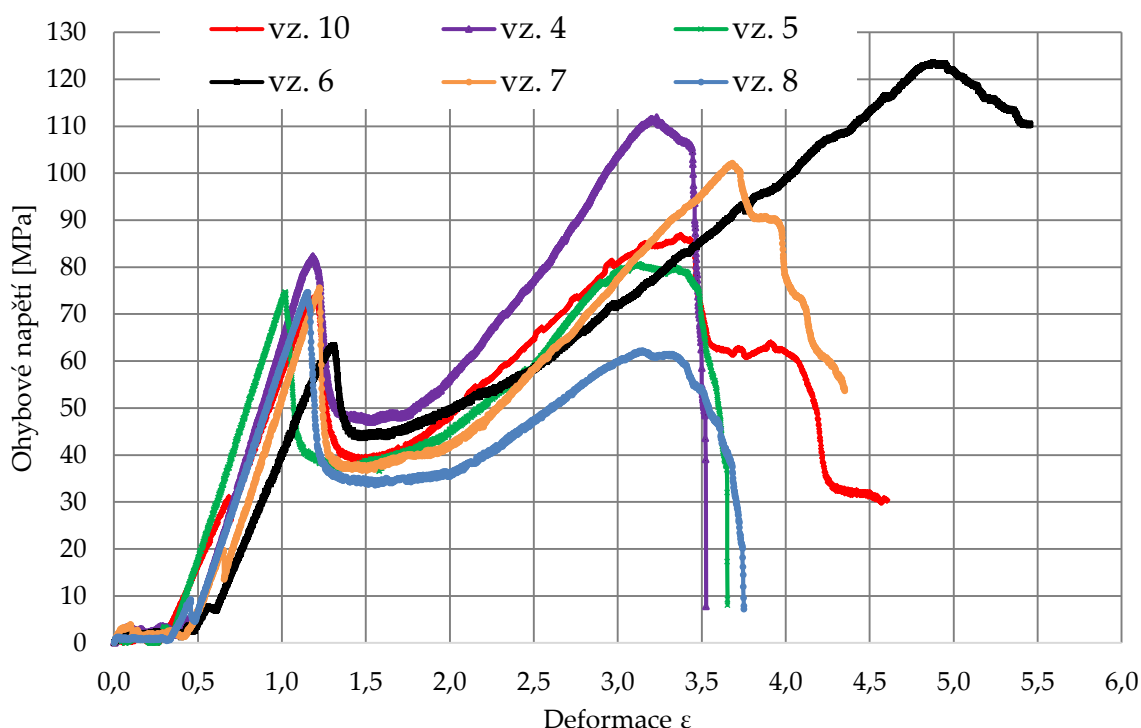
### 3.2.3 Měření pevnosti v ohybu

Pro stanovení ohybové pevnosti byly jednotlivé sady předeřřaty na zvolené teploty s kondicionováním po dobu 5 minut a následně zatěžovány až do doby porušení těles. Vyhodnocováno pak bylo mezní napětí při porušení  $\sigma_b$ , definované jako napětí, při kterém dochází k porušení zkušebního tělesa ohybem. A dále pak napětí na mezi pevnosti  $\sigma_m$ , definované jako horní mez napětí, při kterém dochází k lokálnímu poškození v kompozitu při nadměrném změknutí. V případě křehkých materiálů či měkkých materiálů jako je pryž pak mez pevnosti odpovídá mezi porušení. [34]

tab. 6 Sada 1 za ohybu

Sada 1 – zkoušena při teplotě 110-130 °C						
Číslo vzorku	Síla na mezi porušení $F_b$ [N]	Mezní napětí v průřezu $\sigma_b$ [MPa]	Teplota na mezi porušení $T_b$ [°C]	Síla na mezi pevnosti $F_m$ [N]	Napětí na mezi pevnosti $\sigma_m$ [MPa]	Teplota na mezi pevnosti $T_m$ [°C]
4	647,0	111,96	79,8	476,0	82,37	84,7
5	470,0	80,66	100,7	435,0	74,65	109,2
6	702,0	123,62	94,3	360,0	63,40	120,2
7	586,0	102,20	96,9	434,0	75,69	102,8
8	368,0	62,17	97,1	442,0	74,67	107,7
10	494,0	86,91	90,2	418,0	73,54	102
Průměr	544,5	94,59	93,2	427,5	74,05	104,4





graf. 2 Závislost napětí na deformaci pro sadu vzorků č.1

Vyhodnocení sady č. 1: Grafy závislosti napětí na přetvoření pro jednotlivá tělesa a průběh teploty v jednotlivých tělesech je součástí Přílohy 6.1. Pro výpočet ohybového napětí byly použity vztahy uvedené v normě [35], ohybové napětí na mezi porušení  $\sigma_b$  a mezi pevnosti  $\sigma_m$  při čtyřbodovém zatěžování se určí např. pro těleso č. 7 jako:

$$\sigma_m = \frac{FL}{bh^2} = \frac{434 * 101,25}{25,41 * 4,78^2} = 75,69 \text{ MPa} \quad R. 2$$

$$\sigma_b = \frac{FL}{bh^2} = \frac{586 * 101,25}{25,41 * 4,78^2} = 102,20 \text{ MPa}$$

kde  $\sigma$  je ohybové napětí

$L$  je vzdálenost podpěr v mm

$b$  je šířka tělesa v mm

$h$  je tloušťka tělesa v mm

$F$  je působící síla v N

Deformace krajního vlákna kompozitu je pak dána jako:

$$\varepsilon = 4,7 * \frac{sh}{L^2} \quad R. 3$$

kde  $\varepsilon$  je deformace

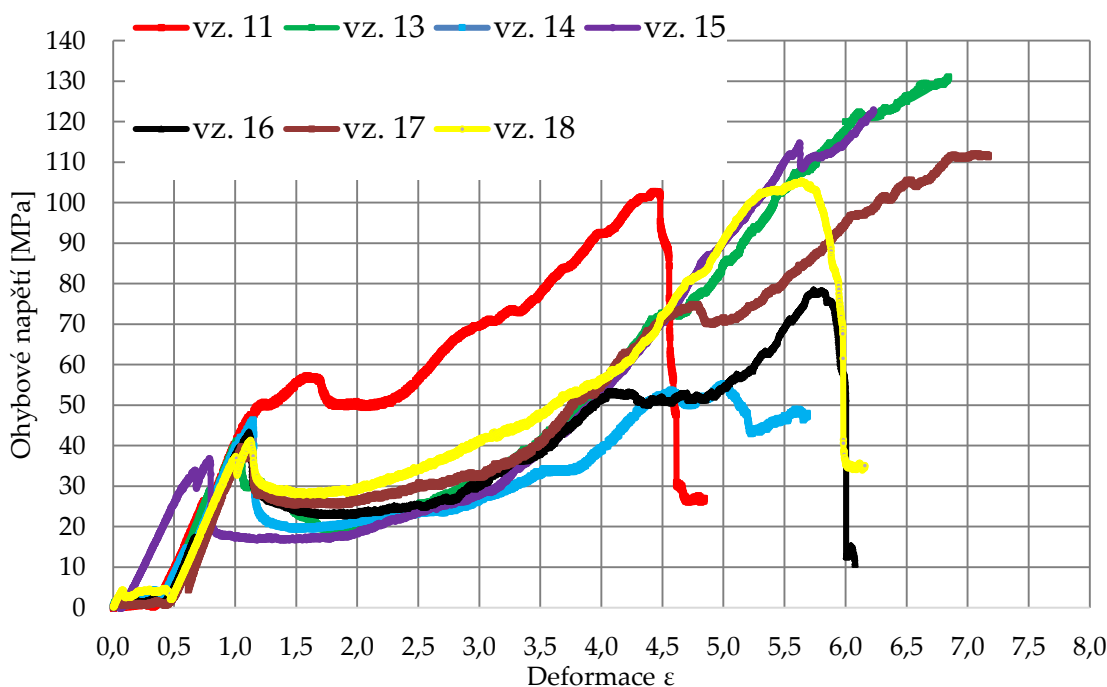
$L$  je vzdálenost podpěr v mm

s je průhyb uprostřed tělesa v mm  $h$  je tloušťka tělesa v mm

Průměrná ohybová pevnost vzorků v sadě č. 1 pak je 94,59 MPa při průměrné síle při porušení 544,5 N. K výraznému měknutí u zkušebních těles došlo při průměrné teplotě 104,4 °C a síle 427,5 N.

tab. 7 Sada 2 za ohybu

Sada 2 – zkoušena při teplotě 170-200 °C							
Číslo vzorku	$F_b$ [N]	$\sigma_b$ [MPa]	$T_b$ [°C]		$F_m$ [N]	$\sigma_m$ [MPa]	$T_y$ [°C]
11	571,0	102,78	104,3		318,0	57,24	132,0
13	415,0	72,06	137,2		237,0	41,15	181,2
14	309,0	55,31	124,4		300,0	53,70	179,5
15	633,0	114,77	117,8		203,0	36,81	171,0
16	114,0	78,47	114,1		251,0	43,38	170,2
17	427,0	74,87	127,5		227,0	39,80	172,0
18	573,0	105,36	112,3		225,0	41,37	166,3
Průměr	476,0	84,83	122,2		240,5	42,70	167,5

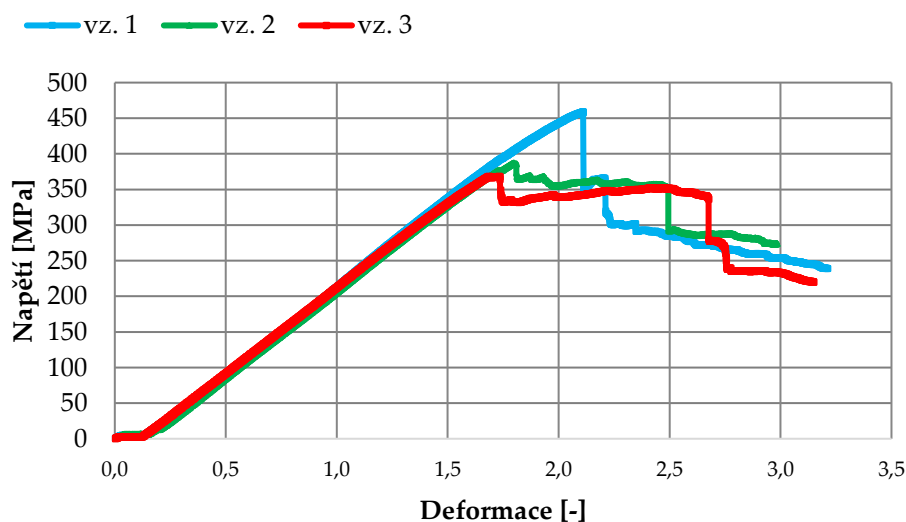


graf. 3 Závislost napětí na deformaci pro sadu vzorků č.2

Vyhodnocení sady č. 2: Grafy závislosti napětí na přetvoření pro jednotlivá tělesa a průběh teploty v jednotlivých tělesech je součástí Přílohy 6.2. Průměrná ohybová pevnost vzorků v sadě č. 2 je 84,83 MPa při průměrné síle při porušení 476,0 N. Ke vzniku tečení pak u zkoušených těles došlo při průměrné teplotě 167,5 °C a síle 240,5 N. U sady těchto vzorků bylo po zahřátí nad 170 °C pozorováno značné uvolňování pryskyřice a změknutí materiálu, které umožňovalo ohyb jednotlivých těles i bez použití zatěžovacího zařízení. U vzorku č.11 pak jsou patrné značné odchylky v pevnosti, při vyhodnocení jej proto neuvažuji, pouze ponechávám pro ilustraci.

tab. 8 Sada 3 za ohybu

Sada 3 – zkoušena při běžné teplotě 26 °C		
Číslo vzorku	$F_b$ [N]	$\sigma_b$ [MPa]
1	2294,0	458,80
2	1934,0	386,80
3	1842,0	368,40
Průměr	2023,3	404,67



graf. 4 Závislost napětí na deformaci pro sadu vzorků č.3

Vyhodnocení sady č. 3: Grafy závislosti napětí na přetvoření pro jednotlivá tělesa je součástí Přílohy 6.3, teplota těles pro tuto sadu nebyla zaznamenána. Průměrná ohybová pevnost vzorků v sadě č. 3 zkoušených při běžné teplotě je 404,67 MPa při průměrné síle

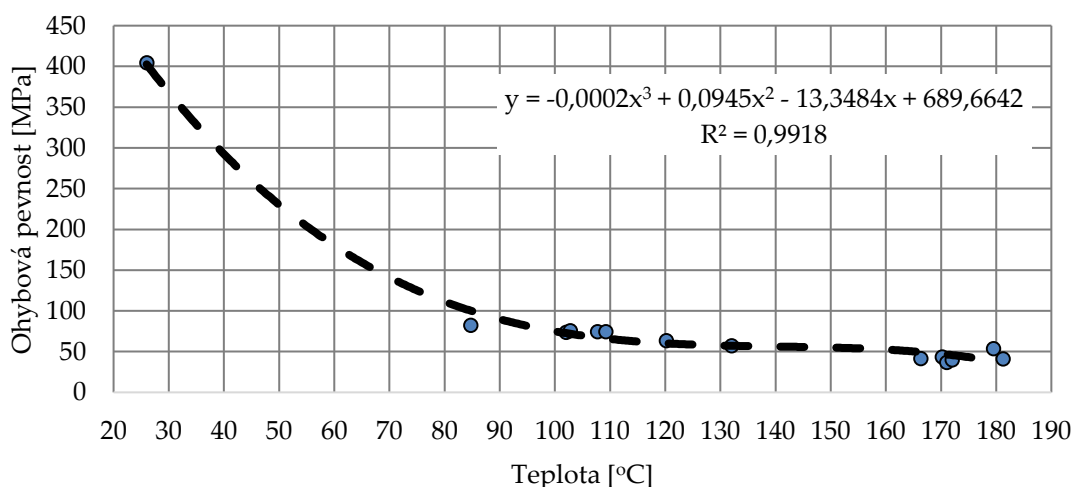
2023,3 N. U této sady nebylo pozorováno výrazné měknutí těles a mez pevnosti tak není z grafu příliš patrná, k jejich lokálnímu porušení tak skokově došlo při dosažení maximálního namáhání ve spodních tažených vláknech, doprovázené jejich hlasitým praskáním.

tab. 9 Porovnání sad za ohybu

Číslo sady	Průměrná síla při porušení $F_{max\theta}$ [N]	Průměrné mezní napětí v průřezu $\sigma_{max\theta}$ [MPa]
1	544,5	94,59
2	476,0	84,83
3	2023,3	404,67

Celkové vyhodnocení: K porušení vzorků ze sad č.1 a č.2 přehřátých na vyšší teploty, došlo v průměru při teplotě 107 °C, průměrné napětí při porušení pak bylo 90,0 MPa. Pro sadu č. 1 je průměrná pevnost přibližně 94,59 MPa, v případě sady č. 2 pak 84,83 MPa, došlo tak ke snížení pevnosti zahřátím o přibližně 9,0 %. Pro následný návrh konstrukce vystavené zvýšeným teplotám, je uvažováno s omezením napětí v kompozitu při dosažení hranice pevnosti, při jejím překročení došlo u jednotlivých zkušebních těles ke změknutí materiálu a značnému průhybu, z tohoto důvodu je použita idealizovaná křivka pružno-plastického chování závislosti ohybové pevnosti na teplotě tělesa, pro zabránění překročení mezního stavu použitelnosti konstrukce. Hodnota ohybového napětí v závislosti na teplotě je tak přibližně rovna:

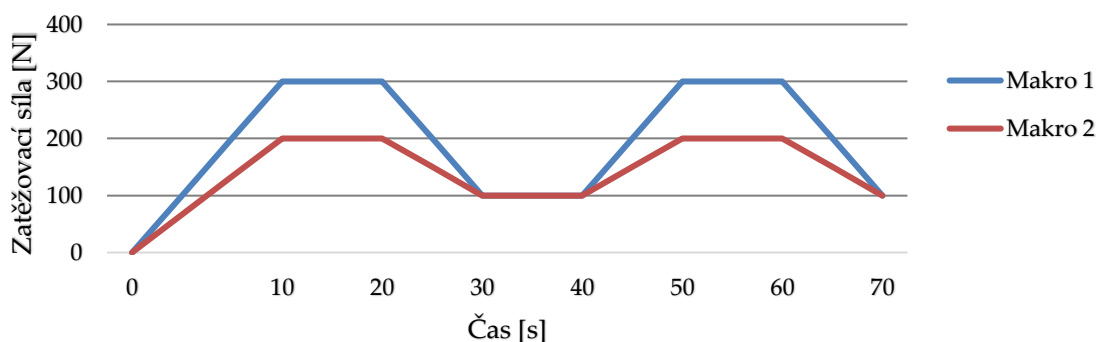
$$\sigma(\theta) = -0,0002 * \theta^3 + 0,0945 * \theta^2 - 13,3484 * \theta + 689,6642$$



graf. 5 Idealizovaný graf ohybové pevnosti v závislosti na teplotě

### 3.2.4 Měření modulu pružnosti

Pro stanovení modulu pružnosti, bylo v obslužném softwaru Testwork 4 definováno zkušební makro (Makro 1) jež stanovuje průběh a chování zkušebního zařízení a jeho dolní a horní hranici zatěžování. V průběhu zkoušení příčný rám zatěžuje zkušební vzorek při dolní hranici (100 N) po dobu 10 sekund a následně zvyšuje sílu až k horní hranici (300 N) kde opět vyčká 10 sekund viz graf. 6. V průběhu zkoušení vzorku č. 9, předehřátého na 170 °C, došlo k nevratným deformacím a ohybovému porušení tělesa, z tohoto důvodu byla horní hranice zatěžovací síly snížena na hodnotu 200 N (Makro 2). Pro zahrnutí vlivu zvýšených teplot byla jednotlivá tělesa plynule předehřáta v pícce na určené teploty s kondicionováním po dobu 5 minut a následně zatěžována ve zkušebním zařízení.

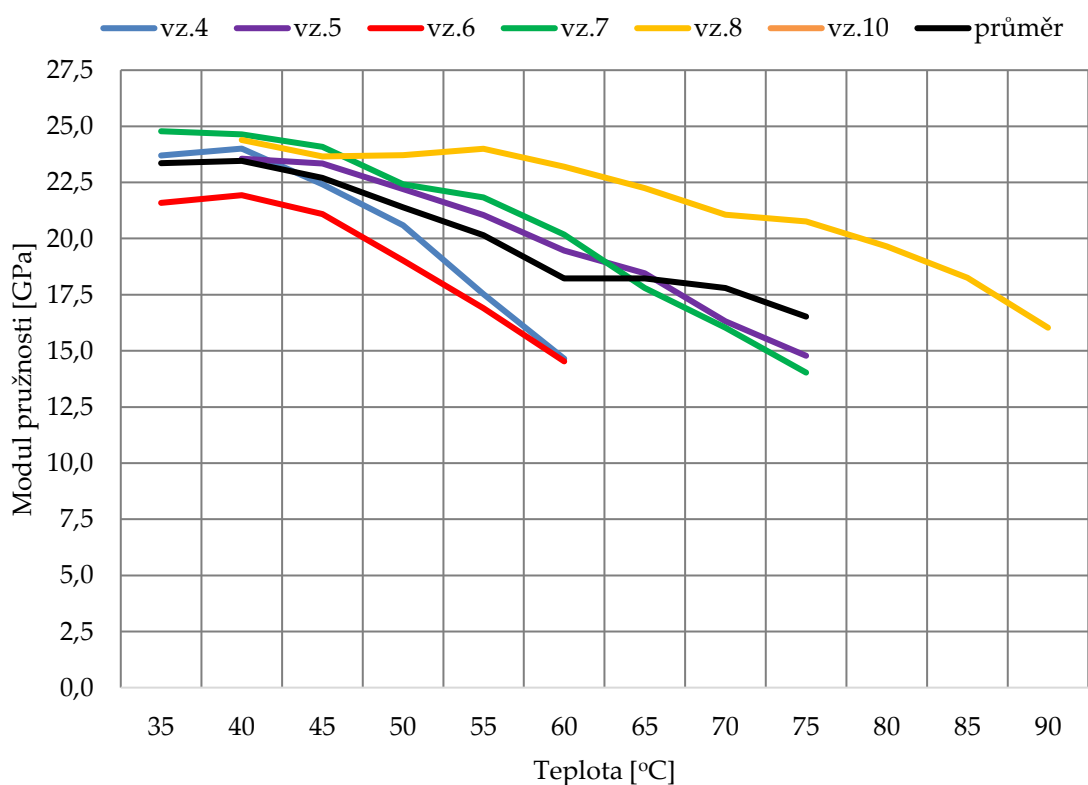


graf. 6 Princip průběhu zkušebního makra

tab. 10 Modul pružnosti sady 1

Sada 1 – zkoušena při teplotě 110-130 °C								
Číslo vzorku	4	5	6	7	8	10		
Předehřáto na teplotu $T_{temp}$ [°C]	110	130	130	130	110	130		
Teplota tělesa $T_i$ [°C]	Modul pružnosti $E_f$ [GPa]						Průměrné $E_{f\bar{}}$	Sm. odchylka $\sigma_{sm}$
90					16,03		16,03	
85					18,26		18,26	
80					19,65		19,65	
75		14,78		14,03	20,76		16,52	3,69

70		16,31		16,02	21,06		17,80	2,83
65		18,45		17,80	22,25	14,42	18,23	3,21
60	14,65	19,47	14,53	20,17	23,2	17,35	18,23	3,39
55	17,52	21,05	16,89	21,83	24,00	19,61	20,15	2,69
50	20,59	22,20	19,02	22,42	23,72	20,40	21,39	1,69
45	22,42	23,34	21,10	24,08	23,65	21,61	22,70	1,19
40	24,01	23,56	21,93	24,64	24,39	22,24	23,46	1,13
35	23,71		21,60	24,78			23,36	1,62



graf. 7 Graf modulu pružnosti sady 1

Vyhodnocení sady č. 1: Pro jednotlivá tělesa byl vypočten ohybový modul pružnosti dle čl. 10.2.2 [35]. Pro jeho určení bylo nejdříve nutno vypočítat průhyby  $s'$  a  $s''$  jako:

$$s' = \frac{\varepsilon' * L^2}{4,7 * h} \quad a \quad s'' = \frac{\varepsilon'' * L^2}{4,7 * h} \quad R. 4$$

kde  $\varepsilon'$  a  $\varepsilon''$  jsou ohybové deformace rovny 0,0005 a 0,0025

$L$  je rozpětí podpor v mm

$h$  je tloušťka tělesa v mm

Modul pružnosti je pak roven:

$$E_f = 0,21 * \frac{L^3}{bh^3} * \frac{\Delta F}{\Delta s} \quad R. 5$$

kde  $E_f$  modul pružnosti  $L$  je rozpětí podpor v mm

$b$  je šířka tělesa v mm  $h$  je tloušťka tělesa v mm

$\Delta F$  je rozdíl mezi silou při průhybu  $s'$  a  $s''$  v N

$\Delta s$  je rozdíl mezi průhybem  $s'$  a  $s''$

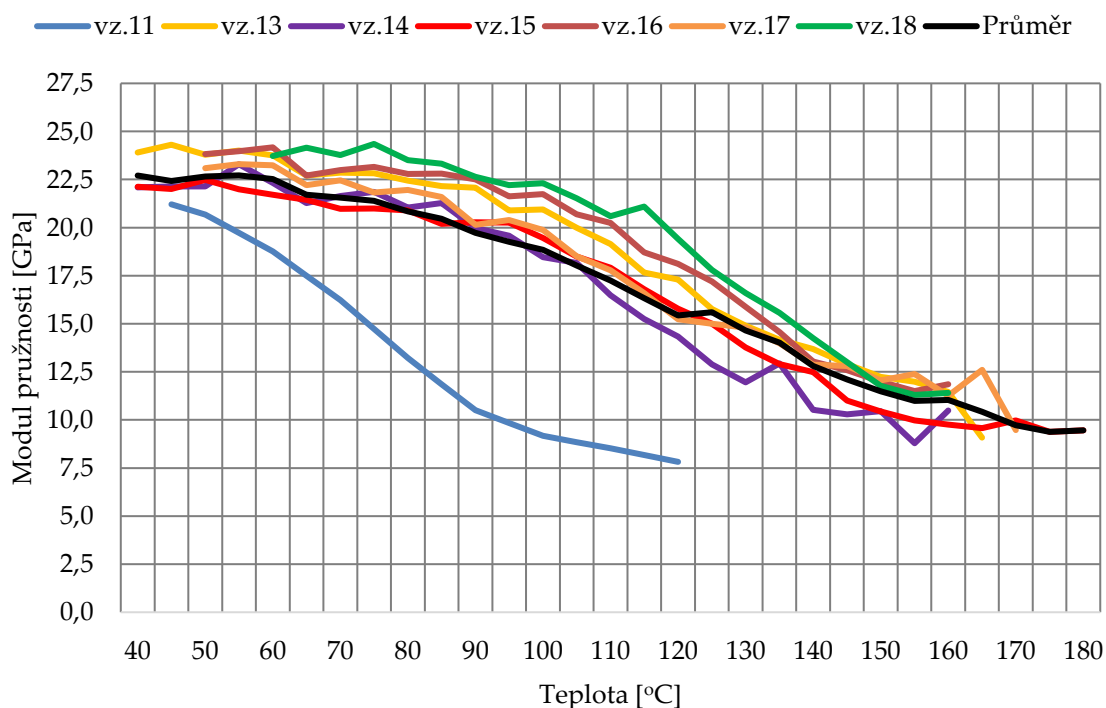
Pro jednotlivé sady pak byl vypočten aritmetický průměr a směrodatná odchylka, v případě celkového porovnání sad pak byl zvolen vážený průměr (tab. 13).

Pro zkušební tělesa sady č. 1, předeřáté na teplotu 110 až 130 °C, dochází k poklesu modulu pružnosti z 23,36 GPa při teplotě 35 °C, až na hodnotu 16,03 GPa při teplotě 90 °C, jedná se tak o více než 30% ztrátu.

tab. 11 Modul pružnosti sady 2

Sada 2 – zkoušena při teplotě 170-200 °C									
Číslo vzorku	11	13	14	15	16	17	18		
$T_{temp}$ [°C]	170	200	200	200	180	200	200		
$T_t$ [°C]	$E_f$ [GPa]							$E_{f\emptyset}$	$\sigma_{sm}$
180					9,46			9,46	
175					9,38			9,38	
170					9,98	9,47		9,73	0,36
165		9,08			9,58	12,60		10,42	1,90
160		11,46	10,49	11,86	9,75	11,26	11,40	11,04	0,77
155		11,98	8,79	11,5	9,98	12,39	11,30	10,99	1,35
150		12,24	10,45	11,98	10,43	12,05	11,77	11,49	0,83
145		12,91	10,30	12,58	11,00	12,8	13,00	12,10	1,15
140		13,69	10,52	13,03	12,49	12,86	14,25	12,81	1,28
135		14,17	12,94	14,56	12,90	13,98	15,57	14,02	1,01
130		14,89	11,95	15,88	13,77	14,80	16,60	14,65	1,64
125		15,76	12,88	17,19	15,00	15,00	17,80	15,61	1,76
120	7,82	17,30	14,34	18,11	15,79	15,23	19,41	15,43	3,78

115	8,18	17,66	15,25	18,72	16,80	16,6	21,09	16,33	4,04
110	8,53	19,14	16,49	20,25	17,91	17,78	20,60	17,24	4,10
105	8,85	20,00	18,16	20,7	18,50	18,51	21,52	18,03	4,24
100	9,17	20,94	18,47	21,73	19,47	19,88	22,30	18,85	4,47
95	9,84	20,90	19,58	21,63	20,26	20,39	22,21	19,26	4,25
90	10,50	22,08	19,98	22,51	20,28	20,15	22,64	19,73	4,23
85	11,86	22,16	21,28	22,8	20,20	21,6	23,33	20,46	3,93
80	13,22	22,44	21,04	22,79	20,90	21,96	23,51	20,84	3,48
75	14,73	22,82	21,86	23,16	21,00	21,83	24,35	21,39	3,13
70	16,24	22,85	21,64	23,00	20,97	22,45	23,77	21,56	2,52
65	17,50	22,70	21,28	22,70	21,44	22,21	24,15	21,71	2,09
60	18,76	23,76	22,33	24,17	21,72	23,25	23,73	22,53	1,88
55	19,72	24,00	23,29	23,98	22,00	23,30		22,72	1,64
50	20,68	23,79	22,14	23,82	22,48	23,09		22,67	1,19
45	21,21	24,31	22,14		22,02			22,42	1,33
40		23,91	22,08		22,13			22,71	1,04



graf. 8 Graf modulu pružnosti sady 2



Vyhodnocení sady č. 2: Pro zkušební tělesa sady č. 2, předeřáté na teplotu 170 až 200 °C, dochází k poklesu modulu pružnosti z 22,71 GPa při teplotě 40 °C až na hodnotu 9,46 GPa při teplotě 180 °C, jedná se tak bezmála o 60% pokles. V případě vzorků č. 9 a 12 došlo k ohybovému porušení během začátku zatížení a vzorky tak byly z dalšího zkoušení vyřazeny. U vzorku č.11 pak jsou z graf. 8 patrné značné odchylky v naměřeném modulu pružnosti, pro tuto odlišnost nemám konkrétní vysvětlení, může však jít např. o mikroskopické trhliny vzniklé již při odebírání vzorku, vzhledem k tomuto zjištění tak tento vzorek v dalším vyhodnocení neuvažuji. U testovaných vzorků dále byla v průběhu zahřívání pozorována materiálová degradace ve formě uvolňování použitého pojiva a tvorbě bílých skvrn či puchýřku na povrchu kompozitu.

tab. 12 Modul pružnosti sady 3

<i>Sada 3 – zkoušena při běžné teplotě [cca 26-30 °C]</i>											
Číslo vzorku	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
$T_t$ [°C]	$E_f$ [GPa]									$E_{f\emptyset}$	$\sigma_{sm}$
26	23,01	23,68	23,92	23,11	22,37	21,84	23,15	22,83	21,04	22,77	0,9

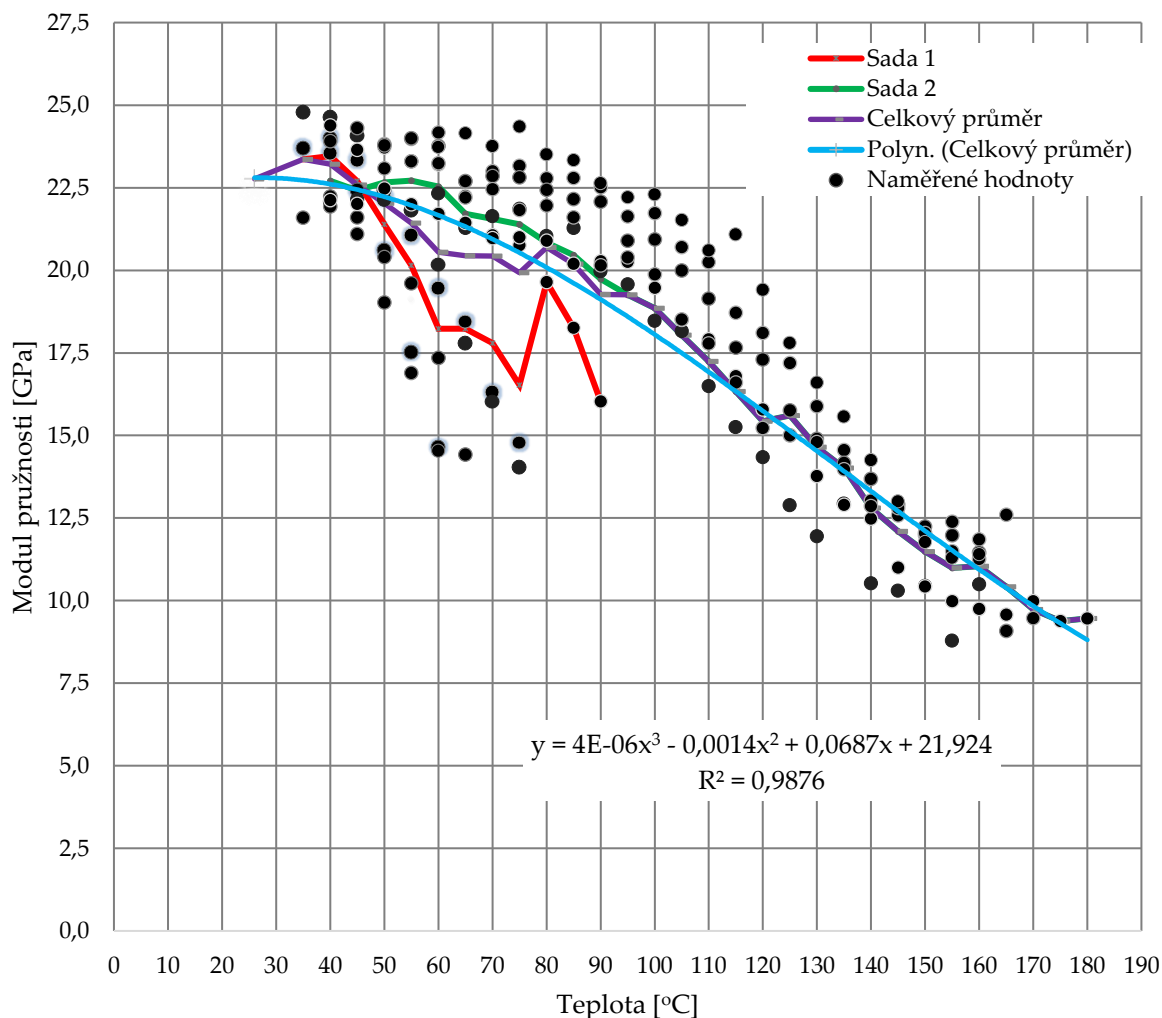
Vyhodnocení sady č. 3: Pro tělesa zkoušená při běžné teplotě vychází průměrný modul pružnosti 22,77 GPa.

tab. 13 Porovnání modulu pružnosti všech sad

Číslo sady	1	2	3		
$T_t$ [°C]	$E_f$ [GPa]			$E_{f\emptyset}$	$\sigma_{sm}$
26			22,77	22,77	
35	23,36			23,36	
40	23,46	22,71		23,21	0,53
45	22,70	22,42		22,59	0,20
50	21,39	22,67		22,03	0,90
55	20,15	22,72		21,43	1,81
60	18,23	22,53		20,54	3,04
65	18,23	21,71		20,45	2,46

---

70	17,80	21,56		20,43	2,66
75	16,52	21,39		19,93	3,44
80	19,65	20,84		20,69	0,84
85	18,26	20,46		20,19	1,56
90	16,03	19,73		19,27	2,62
95		19,26		19,26	
100		18,85		18,85	
105		18,03		18,03	
110		17,24		17,24	
115		16,33		16,33	
120		15,43		15,43	
125		15,61		15,61	
130		14,65		14,65	
135		14,02		14,02	
140		12,81		12,81	
145		12,10		12,10	
150		11,49		11,49	
155		10,99		10,99	
160		11,04		11,04	
165		10,42		10,42	
170		9,73		9,73	
175		9,38		9,38	
180		9,46		9,46	



graf. 9 Porovnání modulu pružnosti jednotlivých sad a průměr výsledků

Celkové vyhodnocení: Působením vyšších teplot dochází k poklesu modulu pružnosti kompozitních těles z hodnoty 22,77 GPa při běžné teplotě až na 9,46 GPa při 180 °C. Hodnota modulu pružnosti v závislosti na teplotě je tak přibližně rovna:

$$E_{(\theta)} = 0,000004 * \theta^3 - 0,001434 * \theta^2 + 0,068734 * \theta + 21,923818$$

Základním problémem tohoto postupu je především obrácená metoda zkoušení, tedy přehřívání a měření materiálových vlastností při klesající teplotě, to mohlo zkreslit naměřené výsledky dosažením nevratných změn v kompozitu při ohřevu a tím i snížení konečné pevnosti a modulu pružnosti. Vhodné by v tomto případě bylo zatěžovat vzorek při ohřevu v peci, tedy postupovat od nižších teplot k vyšším, to bohužel nebylo v době experimentu možné vzhledem k chybějící zkušební technice.

### 3.2.5 Fotodokumentace – typy porušení vzorků

Níže přiložené fotografie zobrazují příklady možných typů porušení pozorovaných při zkoušení, jedná se o:

- tahové porušení kompozitu (obr. 38 a obr. 39), kdy došlo nejdříve k porušení spodních tažených vláken a postupnému rozevírání trhliny směrem k neutrální ose s následnou deformací horních tlačných vláken.
- tahové porušení krajové vrstvy (obr. 40 a obr. 41), kdy došlo mimo poškození spodních vláken i k oddělení vnitřních vrstev vláken a pojiva, tedy delaminaci. Postupně tak při povrchu tělesa vznikala trhlina otevírající se podél kompozitu směrem k podporám (obr. 42).
- tlakové porušení horních tlačných vláken (obr. 43), pro zabránění tomuto typu porušení by bylo vhodné pod zatěžovací trn umístit roznášecí podložku z polypropylenu viz. kap. 3.2.1.



obr. 38 Tahové porušení vzorků č. 4, 7 a 10



*obr. 39 Tahové porušení vzorku č. 3*

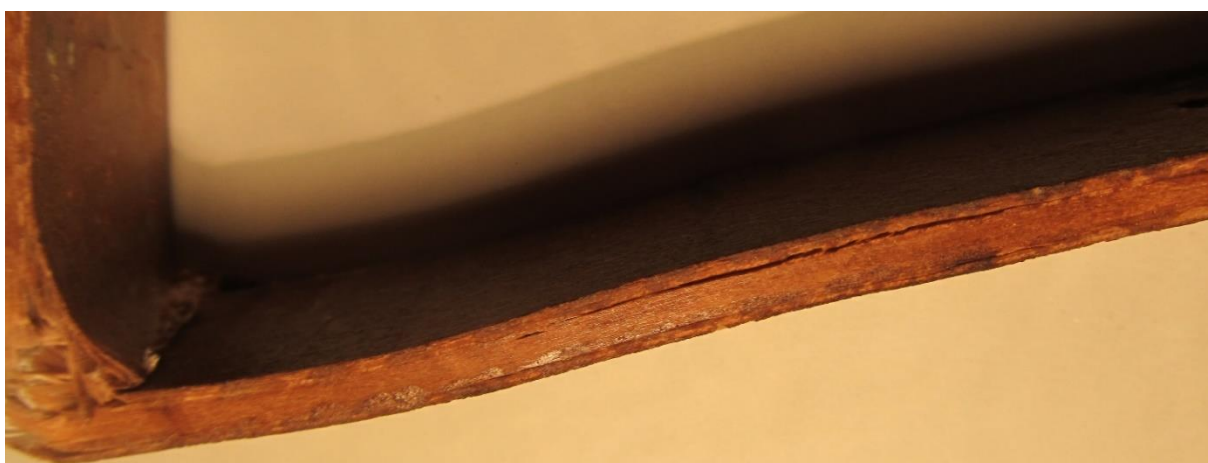


*obr. 40 Tahové porušení krajové vrstvy vzorku č. 11*



*obr. 41 Tahové porušení krajové vrstvy vzorku č. 16*





*obr. 42 Příklady delaminace kompozitu*



*obr. 43 Tlakové porušení vzorků č. 9, 12 a 15*

## 4 Praktická část

Záměrem praktické části této diplomové práce je využít zjištěných materiálových vlastností zkoušeného kompozitu při návrhu a posouzení konkrétní konstrukce. Z hlediska výhod plynoucích z vlastností kompozitního materiálu uvedených v kapitole 2 vyplývá, že kompozity nacházejí využití u konstrukcí vystavených agresivním chemickým látkám s požadavkem na vysokou životnost či nízkou hmotnost.

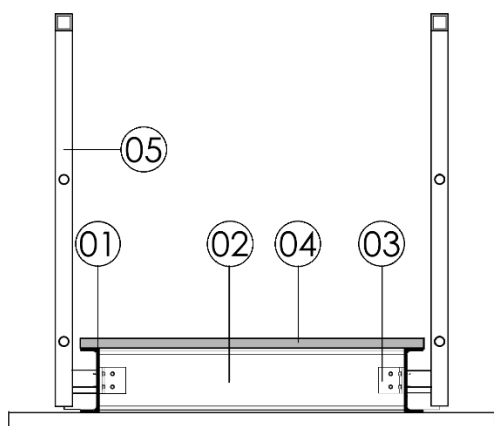
Z hlediska použití kompozitních lávek je pak jejich výhodou celková bezúdržbovost během jejího životního cyklu, což umožňuje jejich aplikaci i do méně či hůře přístupných míst jako jsou cyklostezky, lesy či polní cesty. Další výhodou je i fakt, že kompozit není druhotně využitelnou surovinou a nepodléhá tak útokům vandalů či „sběračů kovů“ jako v případě kovových konstrukcí.

V sortimentu českých producentů tak lze nejčastěji najít kompozitní výrobky jako jsou pochůzná rošty, poklopy, zábradlí, žebříky, nádrže či šachty zcela či částečně nahrazující ocelovou konstrukci. To je umožněno i volbou tvaru a rozměru kompozitu, který často vychází z běžně vyráběných válcovaných profilů tvaru **I**, **H**, **U** či úhelníků.

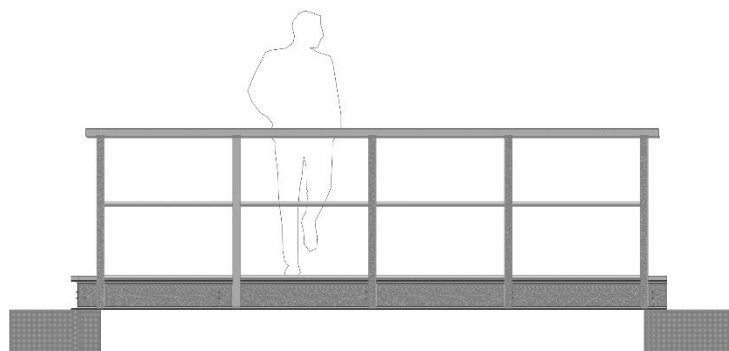
Navrhovanou konstrukcí v této práci je kompozitní lávka z katalogu firmy Prefa Kompozity a.s, zabývající se výrobou tažených kompozitů metodou pultruze a litých kompozitních roštů. Lávka je sestavena ze standartních kompozitních profilů nacházejících se v katalogu výrobce a slouží pro pohyb osob na pěší zóně. Rozpětí lávky je 4 metry a šířka pak 1 m, nosnou konstrukci tvoří běžně vyráběné kompozitní profily:

- (01) - hlavní nosný U profil 300 x 90/15 délky 4,0 m
- (02) - příčník z I profilu 200 x 100/10 délky 1,0 m
- (03) - spojovací ocelový L profil 80 x 80/8 s ocelovými nerezovými šrouby M10
- (04) - litý pochozí litý rošt s oky 30 x 30 mm a výškou 30 mm, upevněn shora na pásnici hlavního profilu a příčníků pomocí ocelového šroubu a spony.
- (05) - z boku kotvené kompozitní zábradlí výšky 1,0 m





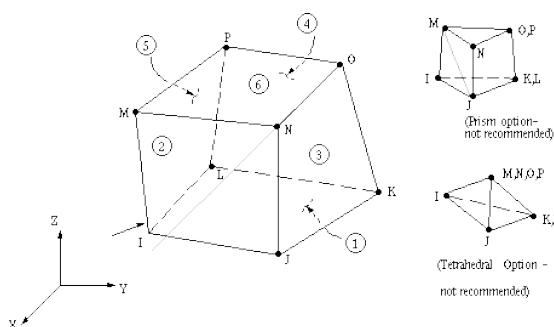
obr. 44 Řez navrhovanou konstrukcí



obr. 45 Pohled na navrhovanou konstrukci

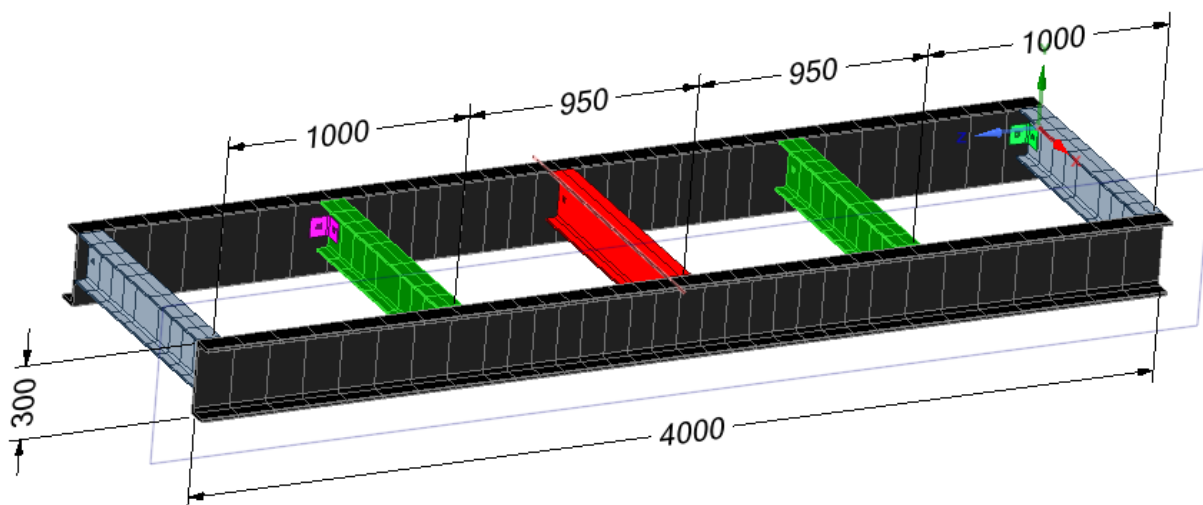
Pro modelování a výpočet konstrukce dle teorie I.řádu je použit program Ansys v. 19.2, konkrétně pak jeho platforma Ansys Workbench, která tvoří simulační strukturu, jež umožňuje definovat jednotlivé materiály, modelovat použitou konstrukci, definovat okrajové podmínky a zatížení. Program umožňuje zahrnout strukturální a termodynamickou analýzu v ustáleném či neustáleném stavu, umožňuje definovat elektrostatické či elektromagnetické pole, akustickou analýzu či proudění. Díky vzájemnému propojení pak umožňuje provádět zadané analýzy jednotlivě či společně. Multifunkčnost tohoto simulačního nástroje tak umožňuje řešit širokou škálu úloh od jednoduchých prvků po složité konstrukce s nelineárním chováním.

Pro výpočet využívá software Ansys metodu konečných prvků (FEM) a je tak využíván v široké řadě oborů jako je stavebnictví, strojírenství, doprava, energetika či mikroelektronika. Model konstrukce byl vytvořen v integrovaném 3D geometrickém modeláři ANSYS SpaceClaim v kartézské soustavě souřadnic. Pro modelování konkrétních prvků lávky pak byl použit knihovní prvek Solid185 určený pro výpočet třídímní analýz metodou I.řádu, prvek je definován osmi uzly a umožňuje 3 stupně volnosti v každém z uzlů viz. obr. 46.



obr. 46 Knihovní prvek Solid 185 [36]

Pro výpočet byla konstrukce zjednodušena z pohledu množství modelovaných prvků, neboť nebyl modelován pochozí kompozitní rošt, boční zábradlí či ocelové šrouby, vliv jejich zatížení či definování spojů je následně zahrnut v modulu Ansys Mechanic. Výsledná posuzovaná konstrukce se tak skládá z dvojice hlavních podélných nosných U profilů délky 4,0 m, prostě uložených na svých koncích a pětice I profilů délky 1,0 m. Vzájemné připojení příčníků k hlavním nosníkům je pak modelováno pomocí ocelových úhelníků.



obr. 47 Schéma modelované konstrukce lávky

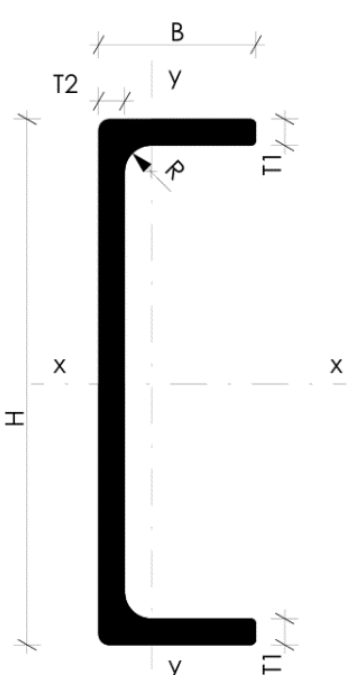
## 4.1 Průřezové a materiálové charakteristiky

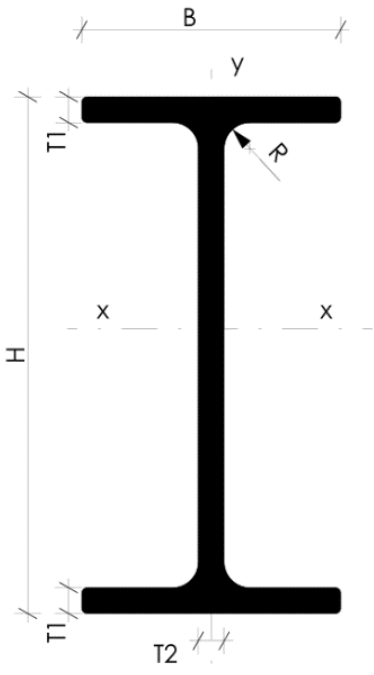
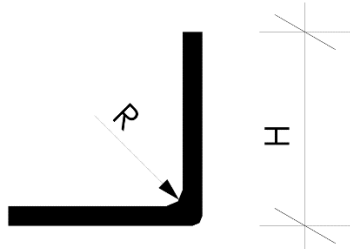
Pro provedení strukturální a termální analýzy je nutné dále definovat mechanické a tepelné vlastnosti jednotlivých použitých materiálů a průřezové charakteristiky modelovaných kompozitních a ocelových profilů.

### 4.1.1 Průřezové charakteristiky

Rozměry jednotlivých profilů byly zvoleny a vymodelovány dle katalogu výrobce společně s jejich průřezovými charakteristikami.

tab. 14 Průřezové charakteristiky použitých profilů

	Řez profilem	Výška H [mm]	300
		Šířka B [mm]	90
		Tloušťka stojiny T2 [mm]	15
		Poloměr náběhu R [mm]	15
		Tloušťka pásnice T1 [mm]	15
		Plocha A [mm <sup>2</sup> ]	6850
		Moment setrvačnosti I <sub>yy</sub> [10 <sup>6</sup> mm <sup>4</sup> ]	4,18
		Moment setrvačnosti I <sub>xx</sub> [10 <sup>6</sup> mm <sup>4</sup> ]	81,20
		Průřezový modul W <sub>xx</sub> [10 <sup>3</sup> mm <sup>3</sup> ]	541,0
		Průřezový modul W <sub>yy</sub> [10 <sup>3</sup> mm <sup>3</sup> ]	61,9
	Řez profilem	Výška H [mm]	200
		Šířka B [mm]	100
		Tloušťka stojiny T2 [mm]	100
		Poloměr náběhu R [mm]	10
		Tloušťka pásnice T1 [mm]	10
		Plocha A [mm <sup>2</sup> ]	3890
		Moment setrvačnosti I <sub>yy</sub> [10 <sup>6</sup> mm <sup>4</sup> ]	1,69

	Moment setrvačnosti $I_{xx}$ [ $10^6 \text{ mm}^4$ ]	23,6
	Průřezový modul $W_{xx}$ [ $10^3 \text{ mm}^3$ ]	33,7
	Průřezový modul $W_{yy}$ [ $10^3 \text{ mm}^3$ ]	236
Řez profilem 	Výška H [mm]	80
	Tloušťka [mm]	4
	Poloměr náběhu R [mm]	10
	Plocha A [ $\text{mm}^2$ ]	1230

## 4.2 Materiálové charakteristiky

Pro zadání materiálových vlastností je využit integrovaný modul Engineering data, umožňující vybrat materiál z připojené knihovny programu Ansys či definovat vlastní materiál. Pro tuto analýzu byly definovány dva materiály: konstrukční ocel a kompozit, změna vlastností obou materiálu na teplotě je definována bilineárním tvrzením<sup>24</sup> pomocí izotropní křivky, zobrazující závislosti mezi napětím a namáháním.

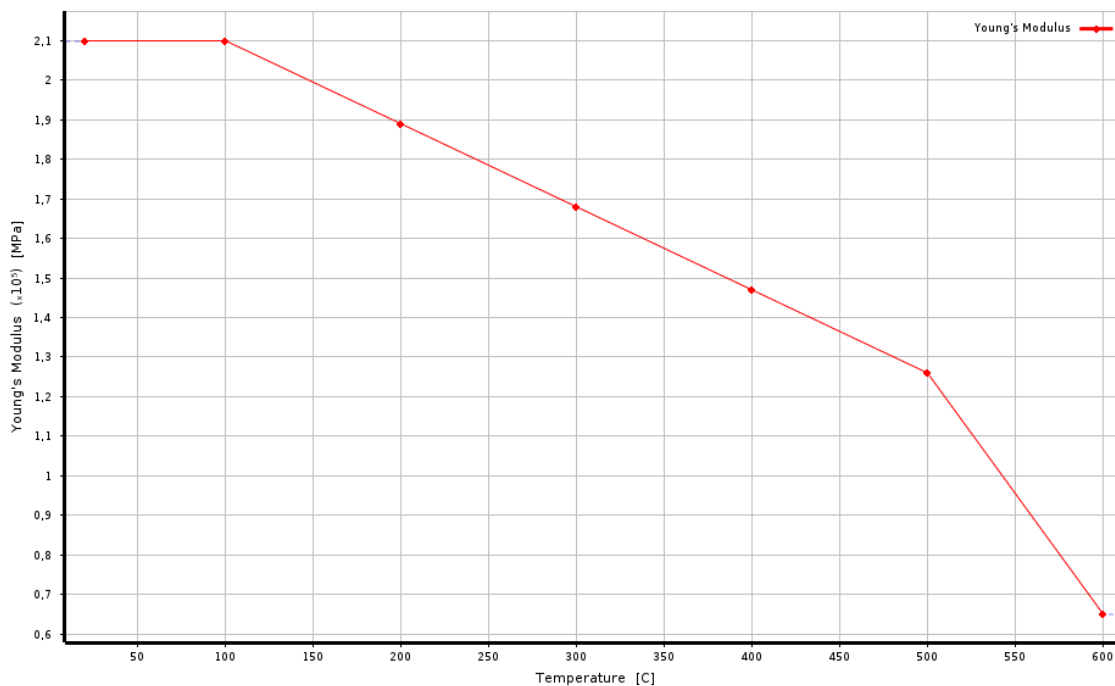
<sup>24</sup> Bilinear isotropic hardening (BISO)

## 4.2.1 Ocel

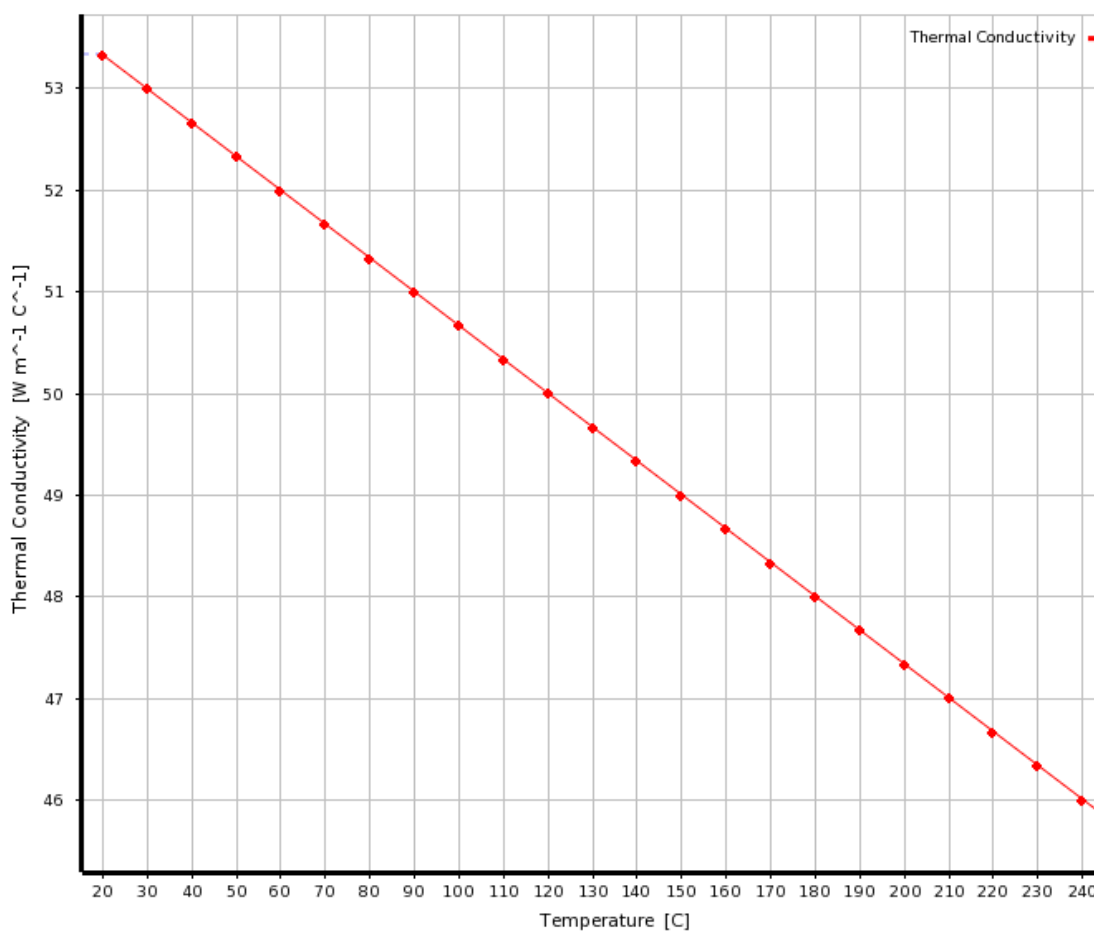
Z požárního hlediska lze ocel zařadit do třídy reakce na oheň A1 – nehořlavá, je ovšem nutné vzít v úvahu, že ocelové konstrukce jsou na vysoké teploty velmi citlivé. Příčinou nízké odolnosti je především vysoká vodivost oceli a tím i její rychlé prohřívání, to vede k postupné redukci meze kluzu a modulu pružnosti a nutnosti tak chránit ocelovou konstrukci protipožárními nástřiky, nátěry či obetonováním. Pro zohlednění degradace oceli ve výpočtu v závislosti na teplotě  $\theta$  se dále užívají součinitele, kterými se jednotlivé vlastnosti redukuje, pro další návrh a posouzení je pak použita konstrukční ocel S235.

tab. 15 Materiálové charakteristiky oceli

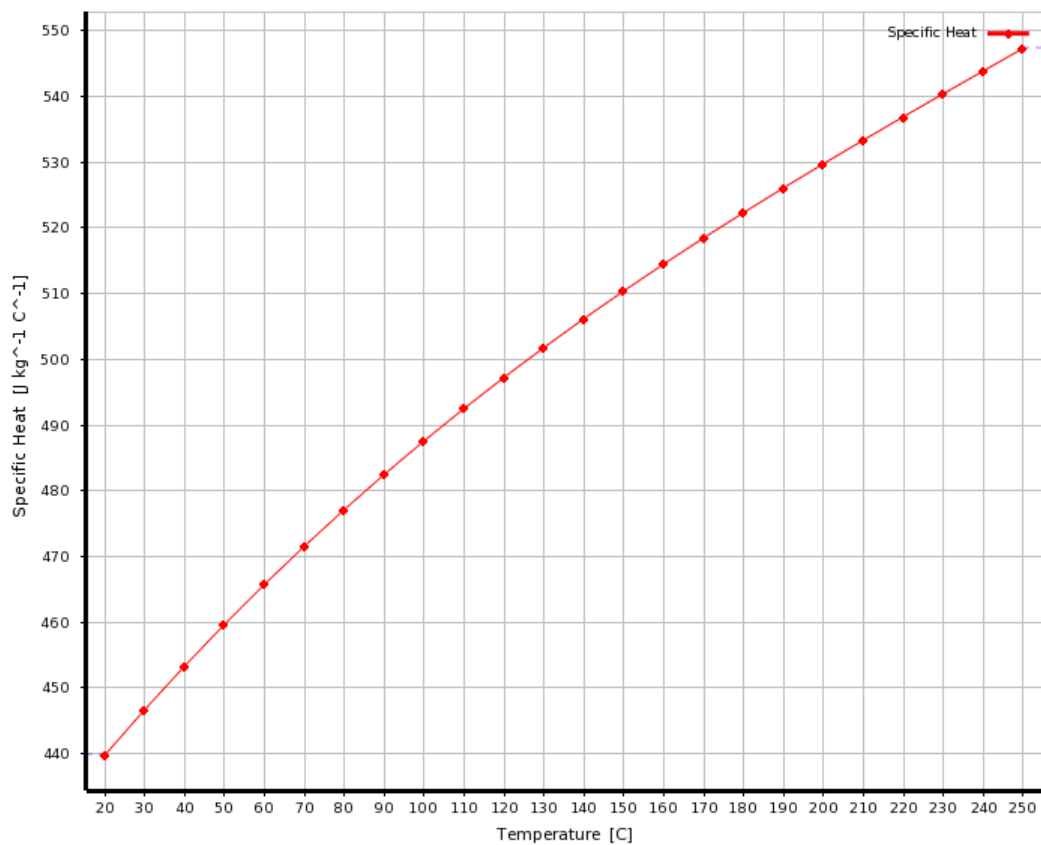
Hustota $\rho$ [ $kg/m^3$ ]	7850
Tepelná roztažnost [ $K^{-1}$ ]	$0,4 * 10^8 * \theta_t^2 + 1,2 * 10^{-5} * \theta_t - 2,416 * 10^{-4}$ [37]
Modul pružnosti $E$ [GPa]	Redukován součinitelem $k_{E,\theta}$ [37]
Mez kluzu $f_y$ [MPa]	Redukována součinitelem $k_{y,\theta}$ [37]; pro $20^\circ C = 235 MPa$
Pevnost v tahu $f_u$ [MPa]	pro $20^\circ C = 360 MPa$
Tepelná vodivost $\lambda$ [ $W/m K$ ]	$54 - 3,33 * 10^{-2} * \theta_t^2$ [37]
Měrná tepelná kapacita $c_a$ [ $J/kg K$ ]	$425 + 7,73 * 10^{-1} * \theta_t - 1,69 * 10^{-3} * \theta_t^2 + 2,22 * 10^{-6} * \theta_t^3$ [37] pro $20^\circ C \leq \theta_t \leq 600^\circ C$



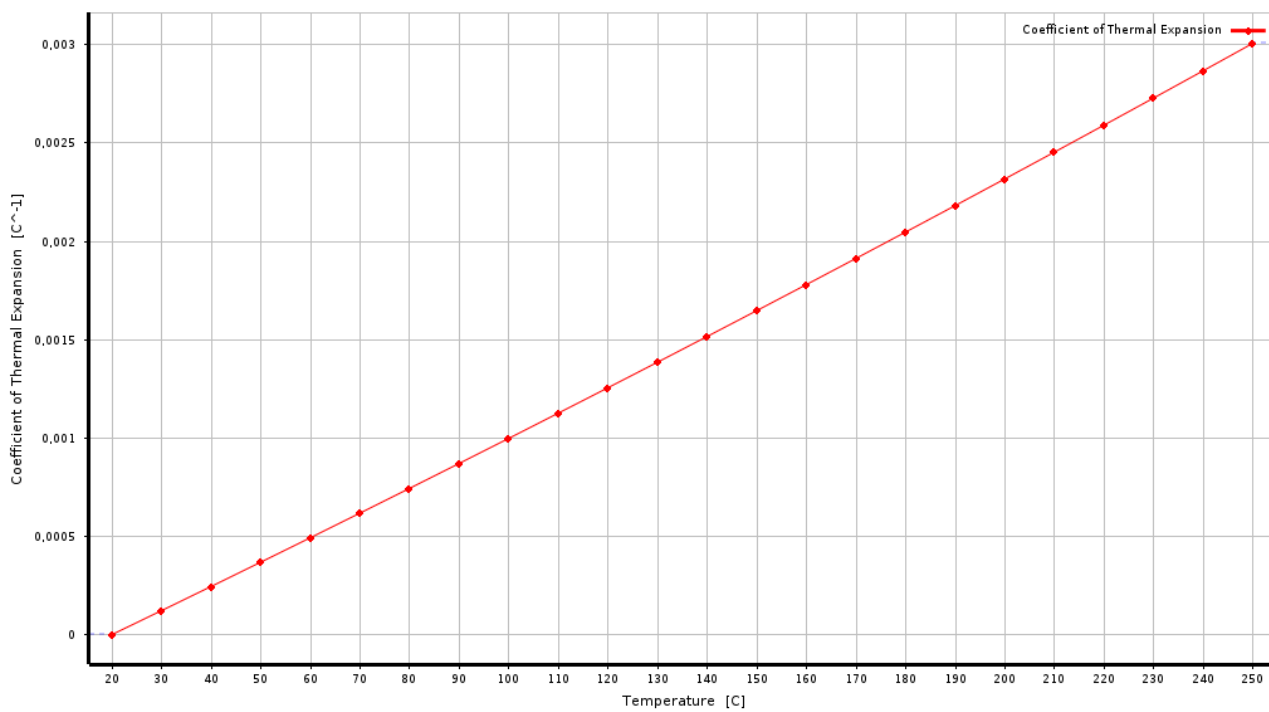
graf. 10 Modul pružnosti oceli



graf. 11 Tepelná vodivost oceli



graf. 12 Měrná tepelná kapacita oceli



graf. 13 Tepelná roztažnost oceli

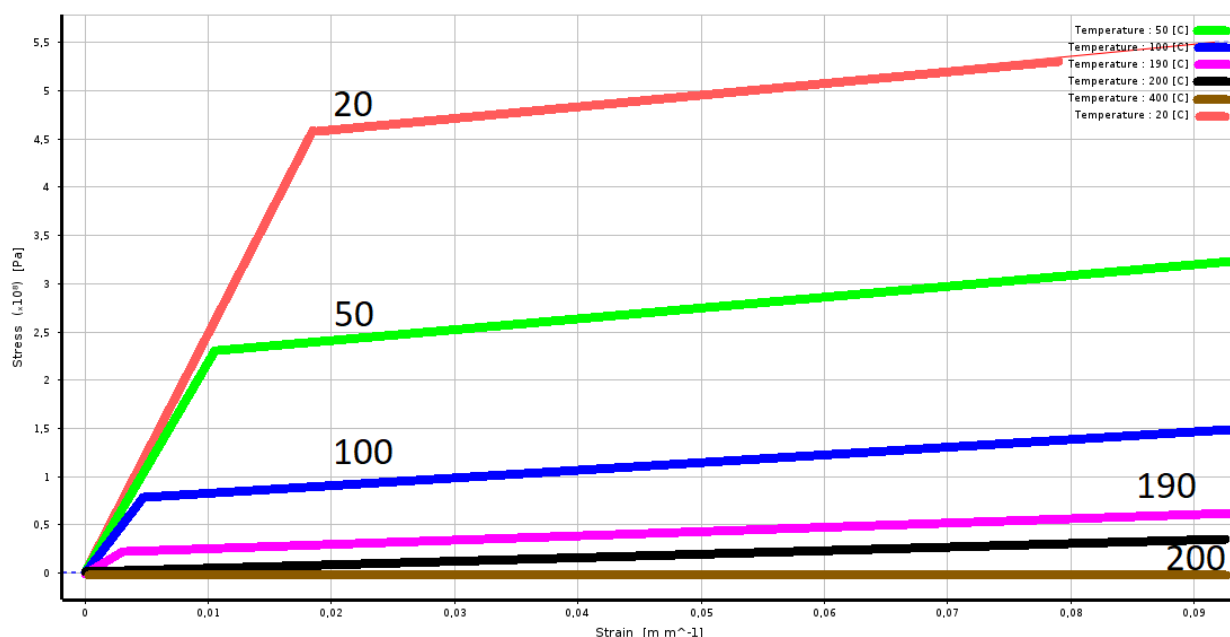


## 4.2.2 Kompozit

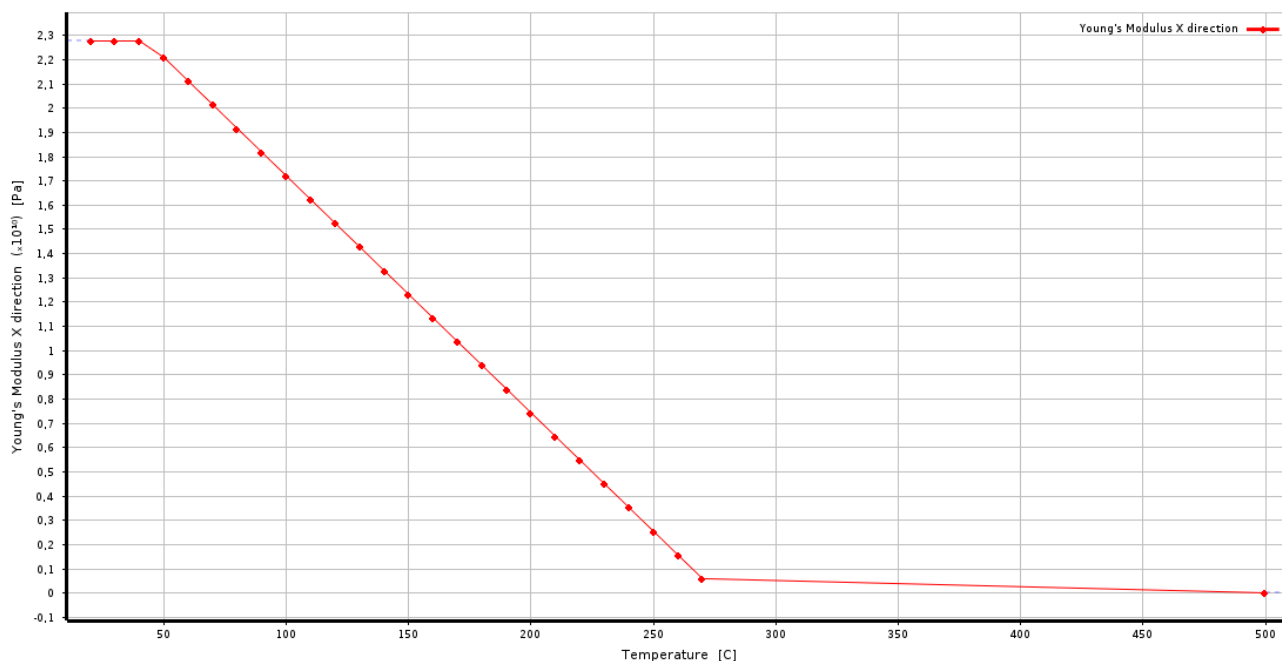
Pro definování materiálových vlastností použitého kompozitu byly použity hodnoty naměřené v průběhu zkoušek za ohybu a vlastnosti poskytnuté výrobcem kompozitu. V případě pevnosti v ohybu je uvažován idealizovaný diagram s pružno-plastickým chováním pro zabránění překročení mezního stavu použitelnosti konstrukce.

tab. 16 Materiálové charakteristiky kompozitu

Hustota $\rho$ [ $kg/m^3$ ] viz. tab. 5	1793,45
Tepelná roztažnost [ $K^{-1}$ ] převzato od výrobce [38]	směr X = $6 \cdot 10^{-6}$ směr Y = $3 \cdot 10^{-5}$ směr Z = $6 \cdot 10^{-6}$
Modul pružnosti E [GPa] viz. kap. 3.2.4	$0,000004 \cdot \theta^3 - 0,001434 \cdot \theta^2 + 0,068734 \cdot \theta + 21,923818$
Pevnost v ohybu $\sigma$ [MPa] viz. kap. 3.2.3	$-0,0002 \cdot \theta^3 + 0,0945 \cdot \theta^2 - 13,3484 \cdot \theta + 689,6642$
Modul pružnosti ve smyku G [GPa]	převzato od výrobce [38], pro $20^\circ C = 2950$ MPa
Tepelná vodivost $\lambda$ [W/m K]	0,191
Měrná tepelná kapacita $c_a$ [J/kg K]	1170



graf. 14 Pracovní diagram kompozitu v závislosti na teplotě



graf. 15 Modul pružnosti E kompozitu

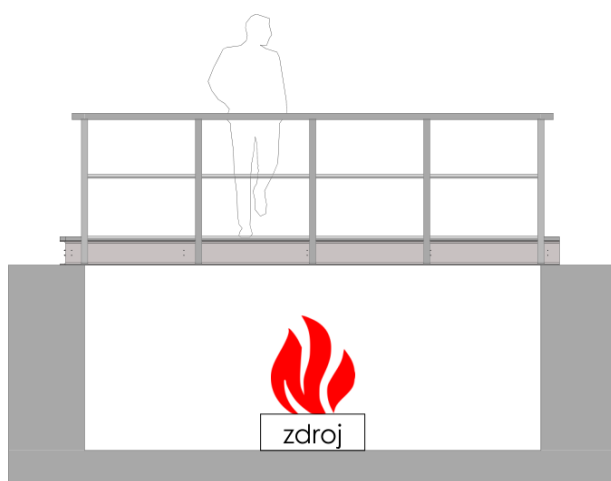
### 4.3 Tepelné zatížení lokálním požárem

Pro popis chování lávky za vyšších teplot a posouzení její únosnosti je dále nutno definovat požární scénář, který stanovuje pro zvolenou konstrukci tepelné namáhání ať už z jednoho či více zdrojů hoření. Dále pak rozvíjí časový průběh modelovaného požáru, jeho fáze (vznícení, rozvoj, plně rozvinutý požár a dohořívání) a definuje okolní prostředí, cílem tak je vystihnout možnou příčinu vzniku požáru pro danou situaci a konstrukci. Požárních scénářů tak může být definováno několik v závislosti na zvolených kritériích a prioritách např. kritérium únosnosti konstrukce, priorita lokalizace požáru či priorita bezpečné evakuace osob. Z hlediska využití lávky jako obslužné či pouze pro pěší bylo jako příčina požáru zvoleno vznícení odloženého předmětu pod tělesem lávky, scénář tak má simulovat úmyslné či neúmyslné zapálení černé skládky či věci člověka bez domova přebývajících pod konstrukcí.

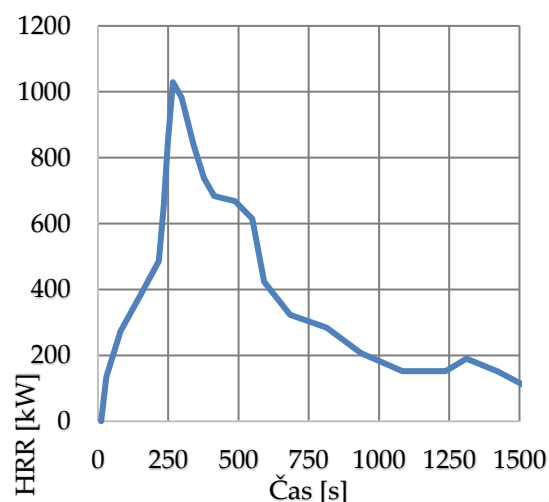
#### 4.3.1 Výpočet tepelného toku

Vzníceným předmětem je pohovka umístěná pod konstrukcí lávky v ose příčného kompozitního I profilu. Graf rychlosti uvolňování teploty v čase a popis konstrukce pohovky byl převzat z katalogu rychlosti uvolňování tepla publikovaného v knize *Modelování dynamiky požáru v budovách* [39]. Pohovka je tvořena dubovým rámem

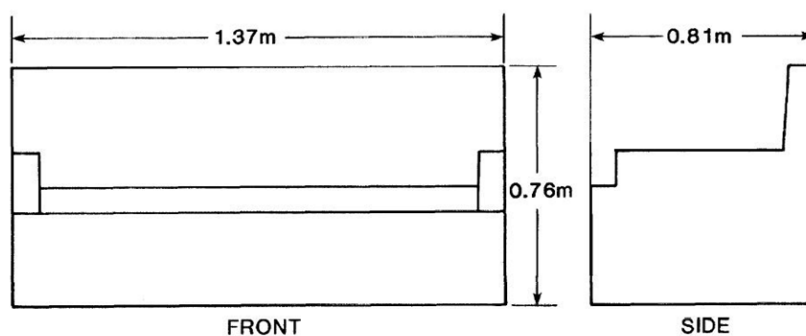
s vnějšími koncovými opěrkami z dřevotřísky tloušťky 9,5 mm, opěrky jsou polstrovány vycpávkovým materiálem tvořeným polyuretanovou pěnou a potahem z umělé tkaniny, sedačky a zadní opěrák také z polyuretanové pěny s bavlněným potahem. Rozměry pohovky jsou 1,37 x 0,81 x 0,76 m, váha pak 54,60 kg. K iniciaci požáru a zahoření pohovky došlo pomocí odpadkového koše umístěného při jejím boku.



obr. 48 Schéma umístění lokálního požáru



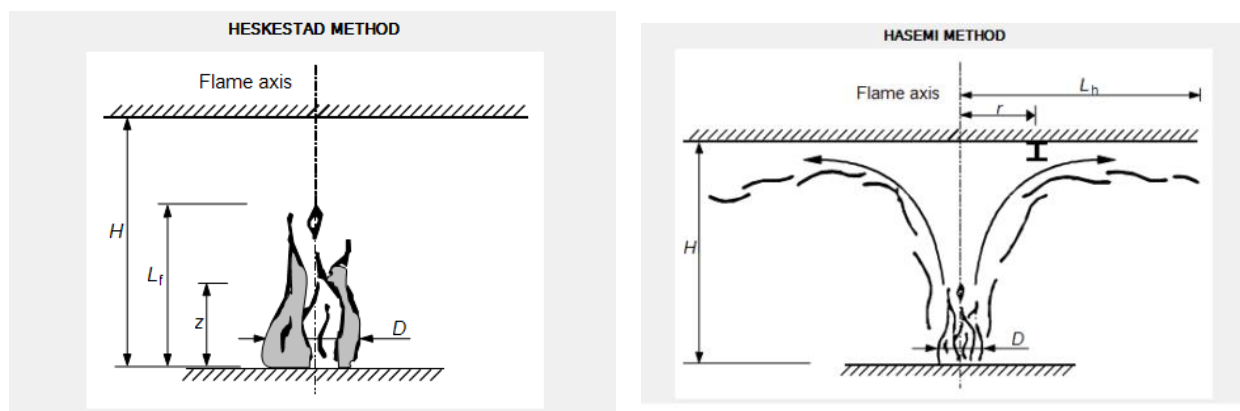
graf. 16 Graf rychlosti uvolňování tepla hořící pohovky [39]



obr. 49 Rozměry pohovky [39]

Ze získaných dat lze stanovit maximální hodnotu uvolněného tepla rovnou 1,029 MW v čase 267,3 s. Pro výpočet tepelného toku dopadajícího na povrch nosných kompozitních profilů lávky byly pomocí tabulkového procesoru Microsoft Excel vypočteny parametry lokálního požáru. Dle rozvoje požáru a šíření plamene je nutné ve výpočtu obecně rozeznávat tyto dvě situace:

- Plameny nezasahují stropní konstrukci ( $L_f < H$ , délka plamene je menší než výška stropu od zdroje hoření)
- Plameny zasahují stropní konstrukci ( $L_f \geq H$ , délka plamene je větší či rovna než výška stropu od zdroje hoření), vzhledem ke konstrukci lávky a využití perforovaných profilů není tato situace uvažována.



a) Plameny nezasahují strop

b) Plameny zasahují strop

obr. 50 Modely lokálního požáru [40]

Postup výpočtu dále rozvádí norma ČSN EN 1991-1-2, vstupními údaji jsou délka plamene  $L_f$ , vypočítaná jako:

$$L_f(t) = -1,02 * D + 0,0148 * Q^{2/5} \text{ [m]} \quad R. 6$$

kde  $D$  je průměr ohně v m,

$Q$  je rychlost uvolňování tepla ve W,

pro účely výpočtu se skutečný rozměr hořící plochy přepočítává na oheň kruhového půdorysu jako:

$$D = \sqrt{\frac{\text{plocha požáru}}{\pi} * 4} = \sqrt{\frac{1,37 * 0,81}{\pi} * 4} \cong 1,20 \text{ [m]} \quad R. 7$$

Při použití hodnot  $Q$  z graf. 16 je průběh výšky plamene v závislosti na čase znázorněn na graf. 17. Světla výška od podlahy k pásnicím nosného profilu je v tomto případě 3,5 m, z grafu je tak vidět že během požáru plameny nedosahují výšky stropu (výšky pásnic). V případě, že plameny nedosahují stropu, vypočte se teplota  $\theta_z$  ve zvolené výšce jako:

$$\theta_z = 20 + 0,25 * Q_c^{\frac{2}{3}} * (z - z_o)^{-\frac{5}{3}} \leq 900 [^{\circ}C] \quad R. 8$$

kde  $Q_c$  je rychlost uvolňování tepla sdílená konvekci, lze uvažovat  $Q_c = 0,8 * Q$

$z$  je výška lávky nad terénem v m

$z_o$  je virtuální počátek osy plamene určený jako:

$$z_o = -1,02 * D + 0,00524 * Q^{\frac{2}{5}} [m] \quad R. 9$$

Tepelný tok v úrovni pásnice mimo vrstvu kouře je pak dán vzorcem: [41]

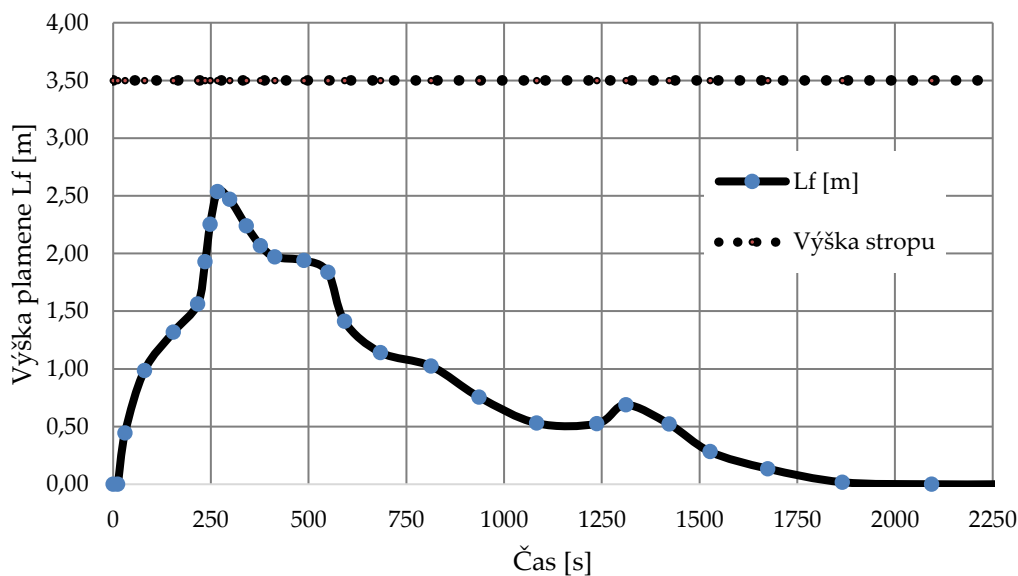
$$h_{inside\ flame} = \sigma * \varepsilon * [(\theta(z_j) + 273)^4 - 293^4] + \alpha_c * (\theta(z_j) - 20) [W/m^2] \quad R. 10$$

kde  $\alpha_c$  je součinitel přestupu tepla prouděním, uvažována hodnota  $35\ W\ m^{-2}\ K^{-1}$

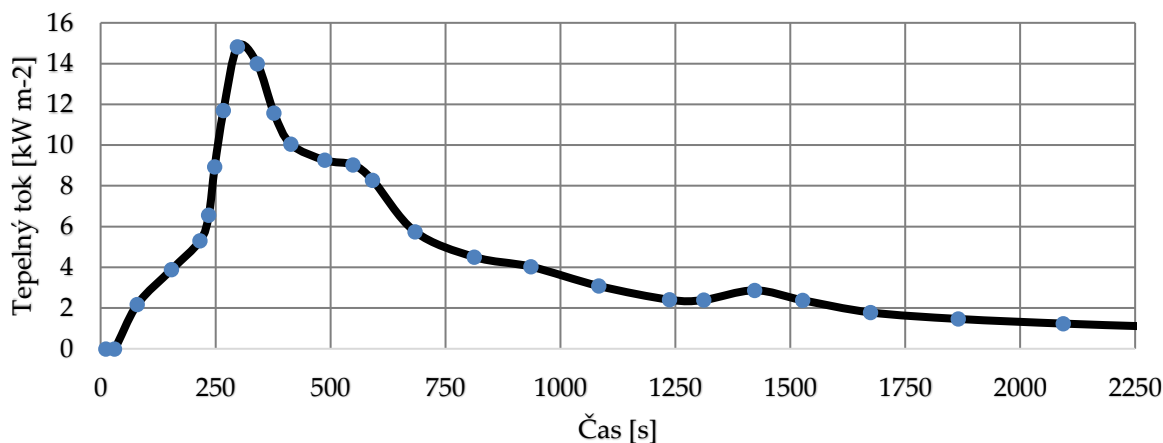
$\theta$  je teplota sloupu ve výšce  $z_j$

$\varepsilon$  je emisivita povrchu rovna 0,8 (převzato od výrobce [37])

$\sigma$  Stefan-Boltzmannova konstanta rovna  $5,67 \times 10^{-8}\ W\ m^{-2}\ K^{-4}$



graf. 17 Graf výšky plamene během lokálního požáru

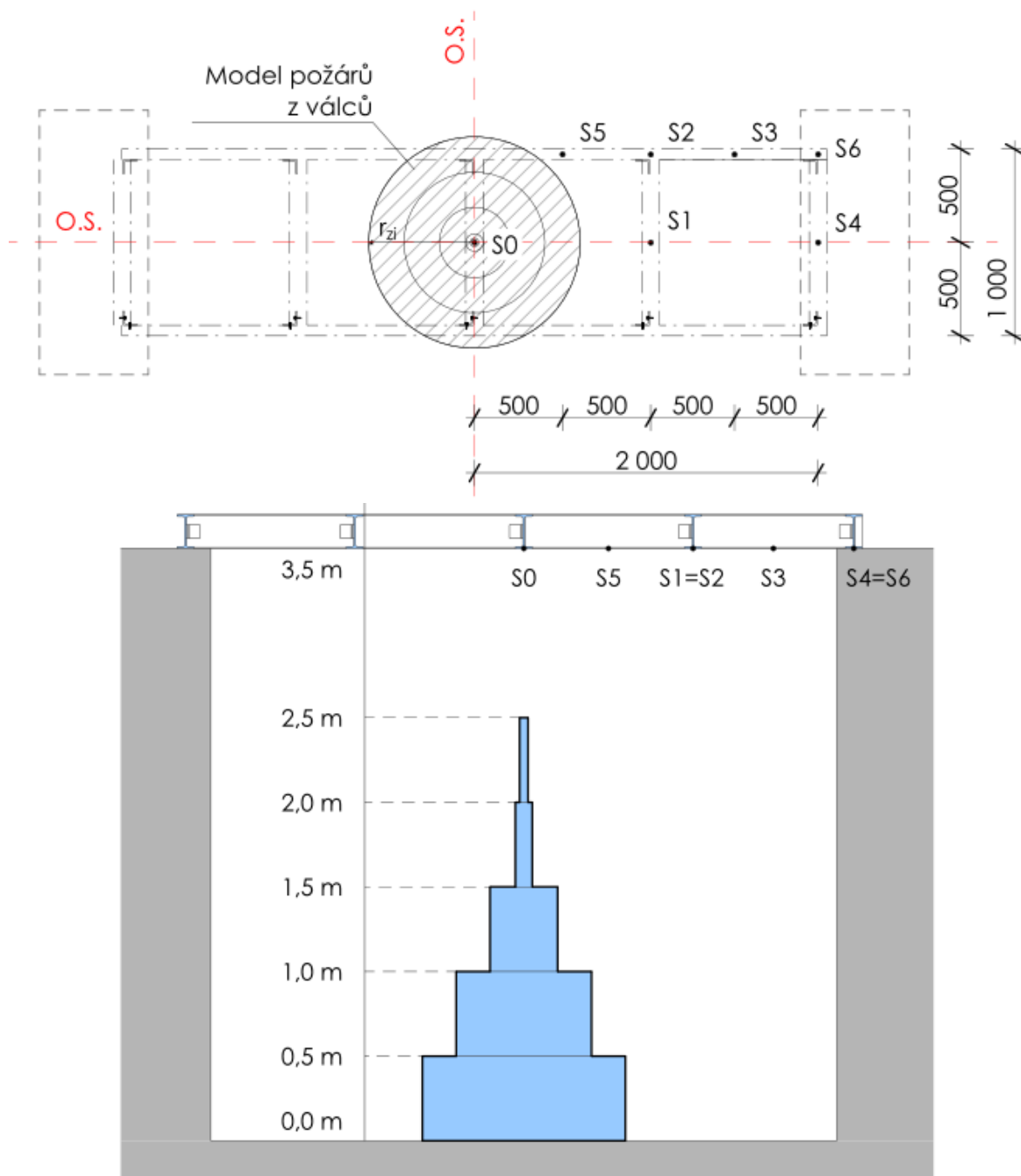


graf. 18 Graf tepelného toku dopadajícího na pásnici I profilu v bodě S0

Následně byl stanoven tepelný tok dopadající na sledovaný bod S0 viz graf. 18, ten je umístěný na spodní pásnici středového I profilu, ve výšce 3,5 m nad zdrojem hoření. Díky průměru hořícího ohně, jež je roven 1,2 m, se nachází celý I profil nad plochou požáru, tepelný tok tak je konzervativně uvažován shodný po celé délce profilu.

Pro výpočet dalších bodů umístěných na sousedních U a I profilech, byla převzata metoda evropského výzkumného projektu LOCAFI, dále rozvedena v publikaci *Návrh sloupu vystaveného lokálnímu požáru* [41]. V rámci této metody je geometrie sálajícího plamene modelována jako soubor válců s proměnným průměrem. V rámci výpočtu se pak počítá se sáláním jednotlivých válců a jejich prstenců na námi zvolený bod s ohledem na jejich vzájemnou orientaci a plochu, výsledný tepelný tok na vybraný bod je pak součtem tepelných toků z jednotlivých válců (částí plamene).

Metoda se tak dá aplikovat při výpočtu jak těles umístěných v ohni či kouřové zóně, ale především mimo zónu plamene. Pro výpočet tepelného toku dopadajícího na kompozitní profily byl vytvořen zjednodušený model ohně z válců konstantní výšky 0,5 m a proměnného poloměru závislého na výšce plamene. Zkoumanými plochami pak byly body S1 až S6 umístěné na spodních pásnicích (viz. obr. 51) ve výšce 3,5 m nad podlahou.



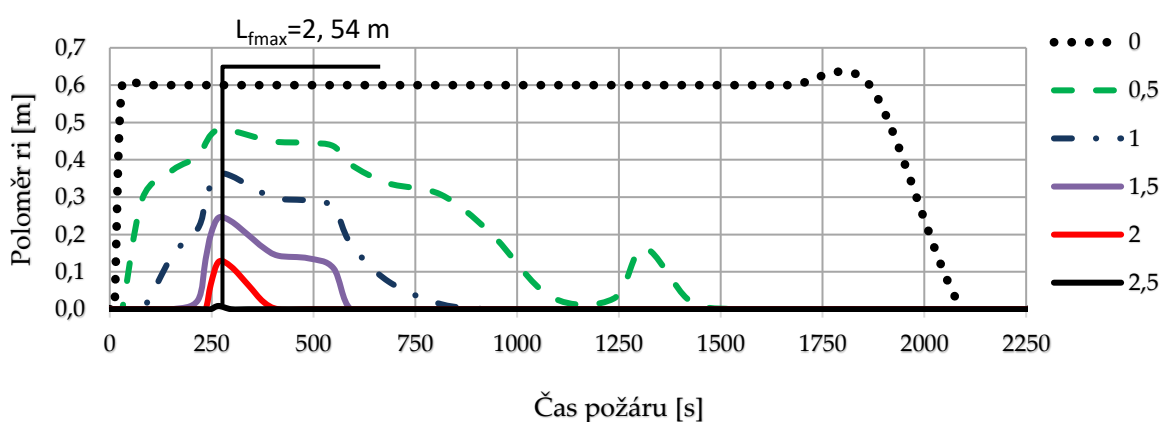
obr. 51 Schéma zjednodušeného modelu požáru a pozice měřených bodů

Jelikož je hořlavý předmět nekruhového charakteru, byl jeho tvar opět aproximován jako kruh s průměrem spočteným dle rovnice R. 7. Výška plamene pak odpovídá graf. 17 a rovnici R. 6. Pro přesnější popis tělesa požáru by bylo nutno modelovat jej spíše jako kužel se zahrnutím vlivu turbulentního proudění na povrchu a příčným prouděním vzduchu strhávajícím plameny.

Poloměr válce  $r_i$  který představuje část plamene ve výšce  $z_i$  lze spočítat z rovnice:

$$r_i = 0,5 * D * \left(1 - \frac{z_i}{L_f}\right) = [m] \quad R. 11$$

V tomto případě tak byly vypočteny průměry válců ve výšce 0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 a 2,5 m nad zemí, které se mění v závislosti na čase a celkové výšce plamenů. Z grafu graf. 19 lze vyčíst idealizované chování požáru, ten tak má v průběhu hoření největší objem soustředěný ve výšce do 1,5 m, nad tuto hranici jsou válce do maximálního průměru 0,2 m pouze po krátký čas hoření.



graf. 19 Poloměry jednotlivých válců ve zvolených výškách v průběhu hoření

Pro následný popis sálání plamene a povrchové teploty jednotlivých válců jsou využity rovnice R. 8 a R. 9. Teplota zvoleného válce se přitom považuje ve zvolené výšce v daném čase za konstantní po jeho obvodu. Pro výpočet tepelného toku dopadajícího na zvolené body umístěné na spodních pásnicích konstrukce je nutné stanovit polohový součinitel. Ten určuje podíl sálavého tepla vyzařovaného z modelu tělesa plamene (sálající plocha) na zvolený bod na konstrukci (dopadající plocha), výsledná hodnota součinitele je pak závislá na vzdálenosti bodů, jejich velikosti a vzájemné orientaci. Dále uvedené vztahy jsou převzaty z výše uvedené monografie [41]:

$$\Phi_{\text{válec}_{z_i} \rightarrow \text{bod}} = \frac{S}{B} - \frac{S}{2B\pi} * \{L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5\} = [-] \quad R. 12$$

kde

$$L_1 = \cos^{-1}\left(\frac{Y^2 - B + 1}{A - 1}\right) \quad L_2 = \cos^{-1}\left(\frac{C - B + 1}{C + B - 1}\right)$$



$$L_3 = -Y * \left[ \frac{A + 1}{\sqrt{(C + B - 1)^2 + 4C}} * \cos^{-1} \left( \frac{Y^2 - B + 1}{\sqrt{B} * (A - 1)} \right) \right]$$

$$L_4 = -\sqrt{C} * \frac{C + B + 1}{\sqrt{(C + B - 1)^2 + 4C}} * \cos^{-1} \left( \frac{C - B + 1}{\sqrt{B} * (C + B - 1)} \right)$$

$$L_5 = H * \cos^{-1} \left( \frac{1}{\sqrt{B}} \right)$$

a dále

$$S = \frac{s}{r} \quad Y = \frac{y}{r}$$

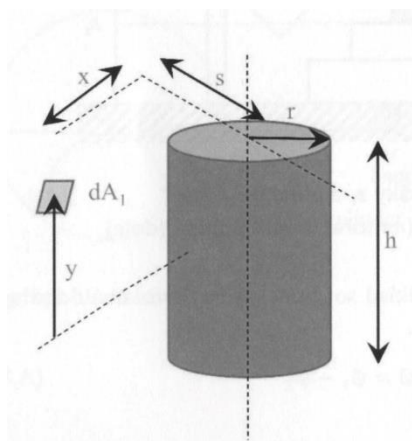
$$X = \frac{x}{r}$$

$$H = \frac{h}{r}$$

$$A = X^2 + Y^2 + S^2$$

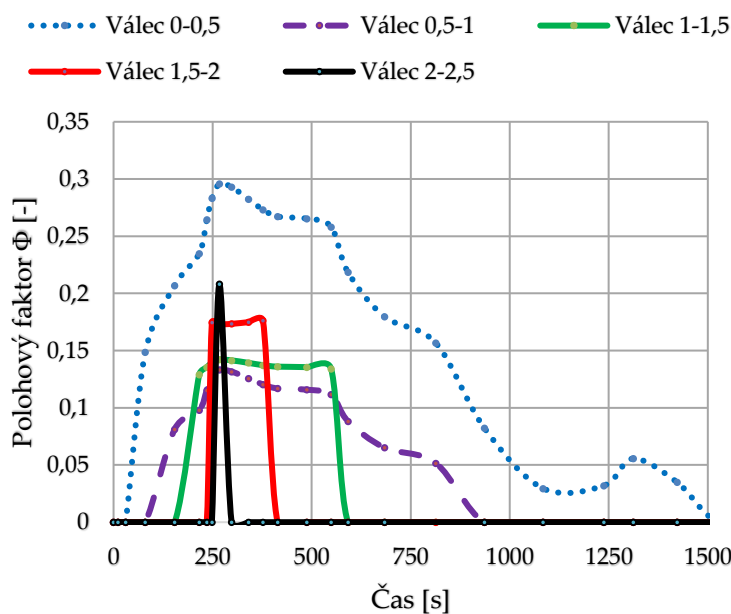
$$B = S^2 + X^2$$

$$C = (H - Y)^2$$



obr. 52 Geometrické veličiny pro výpočet polohového součinitele

[41]



graf. 20 Změna faktoru pro bod S1 a jednotlivé válce během požáru

Výsledný tepelný tok přijatý zvolenou plochou se středem v bodě S<sub>i</sub> se poté vypočte dle rovnice

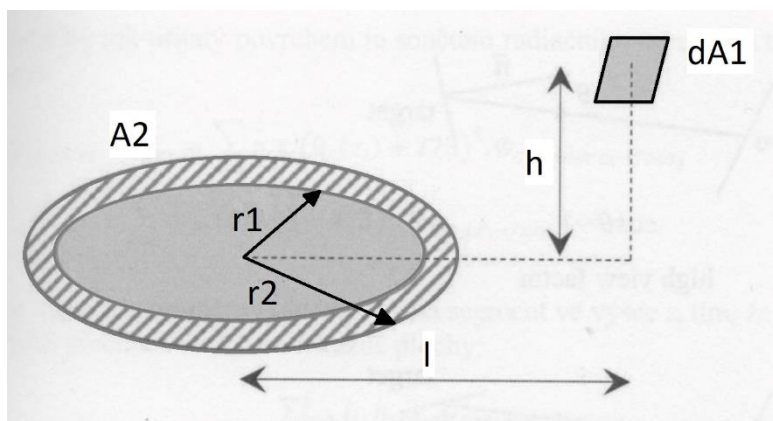
$$h_{v\acute{a}lec_{zi} \rightarrow bod} = \sigma * \varepsilon * (\theta_{f_{zi}} + 273)^4 * \Phi_{v\acute{a}lec_{zi} \rightarrow bod} \quad [W/m^2] \quad R. 13$$

Součástí geometrie plamene je mimo soustavy válců i plocha mezikruží umístěná na podstavě válce. Prstencová plocha mezi dvěma válci je tak považována za radiální plochu

a je nutné ji při výpočtu sálavého toku brát v úvahu. Její přínos k toku je pak brán v potaz, pokud je zvolení plocha v přímé viditelnosti se sálajícím prstencem. Polohový faktor mezi zvoleným mezikružím a bodem je dán vztahem dle [41] jako:

$$\Phi_{\text{mezikruží}_{zi} \rightarrow \text{bod}} = \frac{H}{2} * \left( \frac{H^2 + R_2^2 + 1}{\sqrt{(H^2 + R_2^2 + 1)^2 - 4R_2^2}} - \frac{H^2 + R_1^2 + 1}{\sqrt{(H^2 + R_1^2 + 1)^2 - 4R_1^2}} \right) [-] \quad R. 14$$

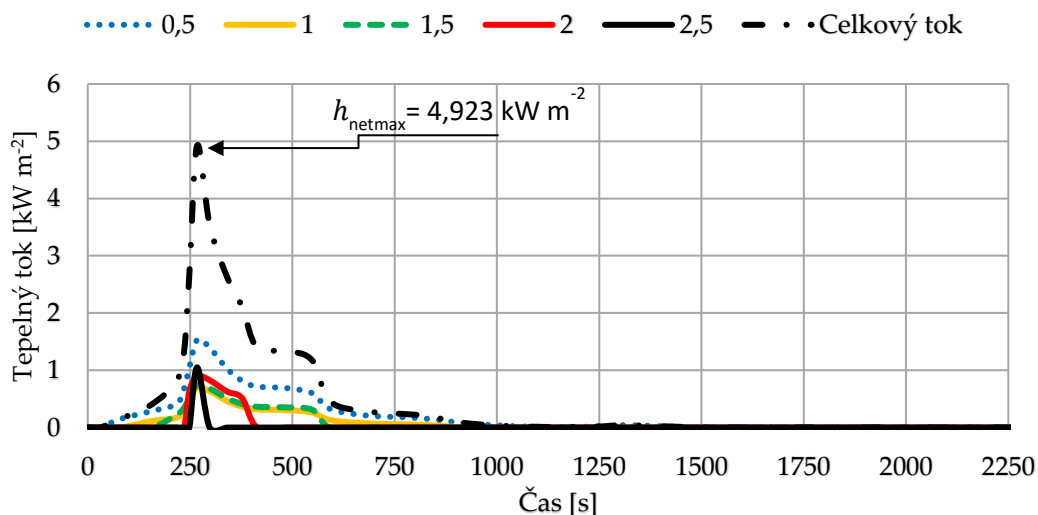
$$H = \frac{h}{l} \qquad R_1 = \frac{r_1}{l} \qquad R_2 = \frac{r_2}{l}$$



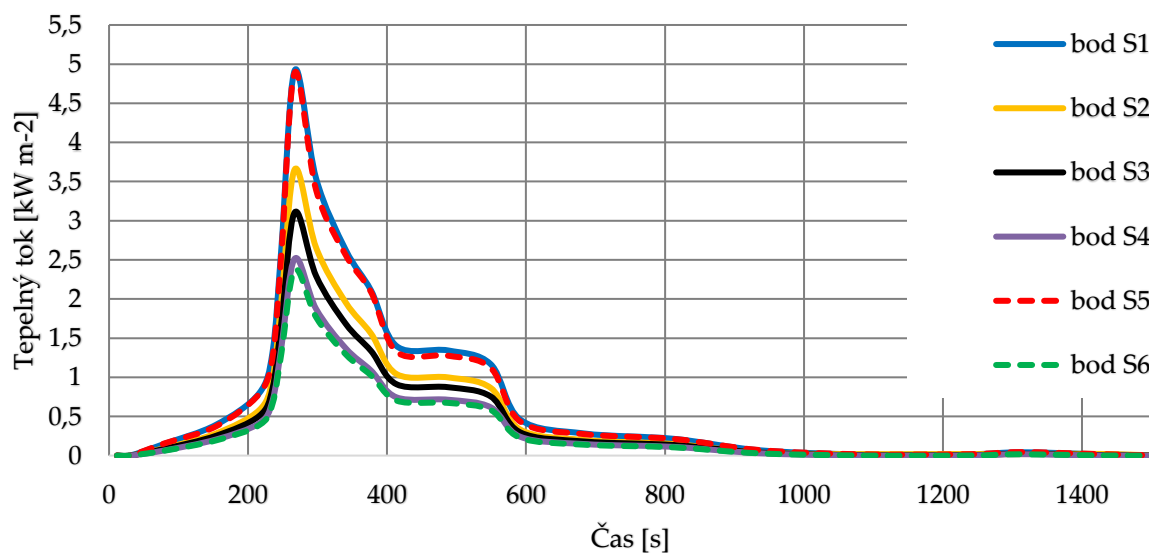
obr. 53 Geometrické veličiny pro výpočet polohového součinitele mezikruží [41]

Výsledný radiační tok dopadající na zvolenou plochu se středem v bodě  $S_i$  je pak dán součtem toků všech vyzařovaných válců a jejich mezikruží (rovnice R. 15). Vzhledem k malým rozměrům navržených nosných profilů a jejich tloušťce je tepelný tok dopadající na stojinu profilů uvažován konzervativně shodný s tepelným tokem dopadajícím na spodní pásnici, zároveň se nepředpokládá vzhledem k aplikaci kompozitních pochozích pororošťů s akumulací teplého kouře pod stropem a tím i vzniku kouřové vrstvy, lávka je tak ale zároveň zahřívána horkými plyny procházející skrze konstrukci pomocí konvekce. Dochází tak k nezanedbatelnému přenosu tepelného toku, zároveň poletující saze ovlivňují výslednou emisivitu požáru (konzervativně uvažovanou hodnotou 1,0), ohřívání konstrukce procházejícími plyny předpokládám nad celým průmětem válce požáru, mimo válec předpokládám teplotu 20 °C, teplotu horkých plynů pak počítám dle R. 8.

$$\begin{aligned}
 h_{\text{plamen} \rightarrow \text{bod}} &= \sum_i h_{\text{válec}_{zi} \rightarrow \text{bod}} + \sum_i h_{\text{mezikruží}_{zi} \rightarrow \text{bod}} \\
 &= \sum_i \sigma * \varepsilon * (\theta_{f_{zi}} + 273)^4 * \Phi_{\text{válec}_{zi} \rightarrow \text{bod}} \\
 &+ \sum_i \sigma * \varepsilon * (\theta_{f_{zi}} + 273)^4 * \Phi_{\text{mezikruží}_{zi} \rightarrow \text{bod}} \quad [W/m^2]
 \end{aligned}
 \tag{R. 15}$$

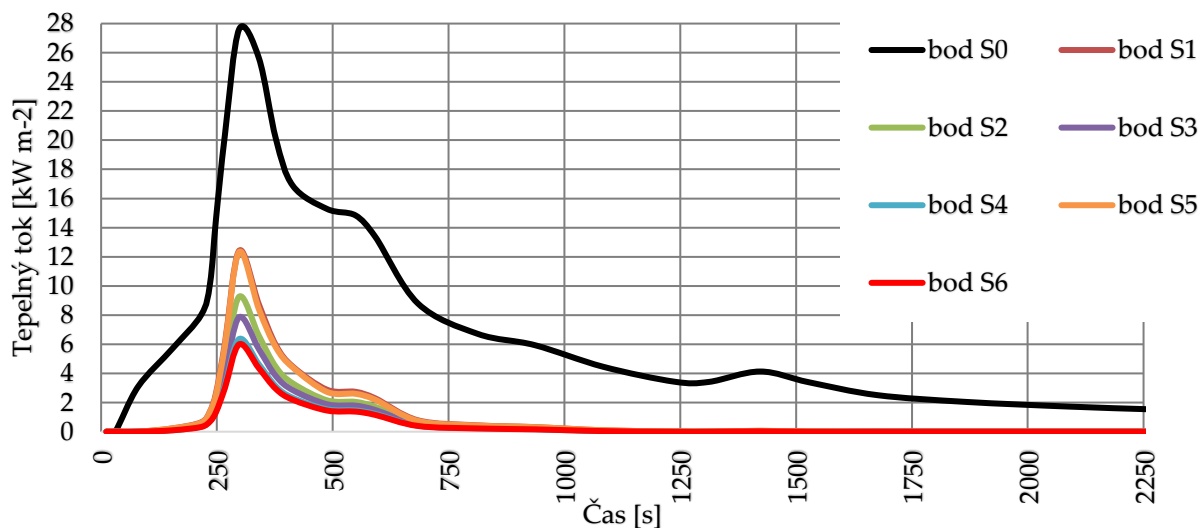


graf. 21 Tepelný tok na bod S1 z jednotlivých válců s prstenci

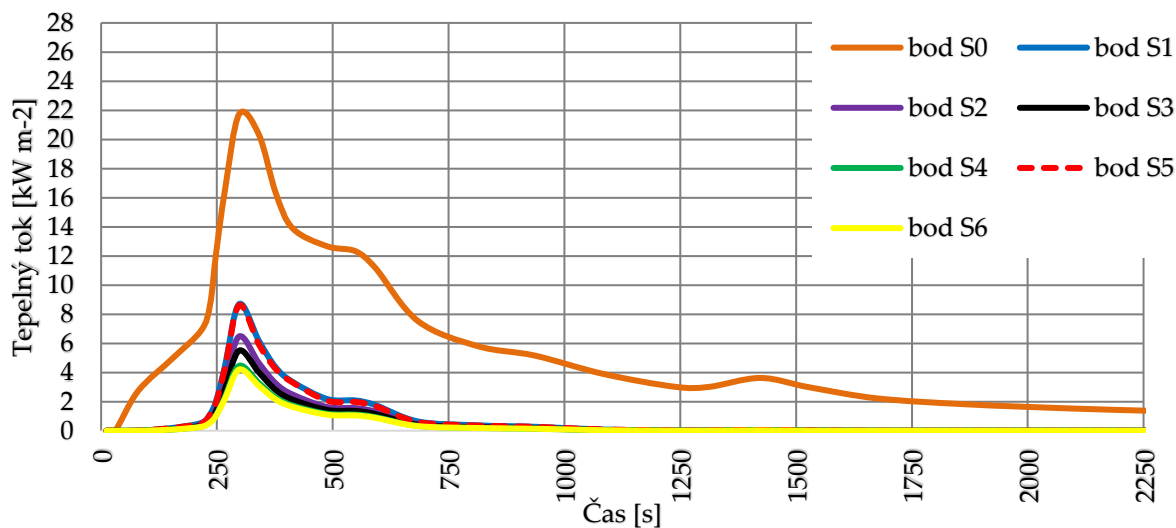


graf. 22 Tepelný tok dopadající na jednotlivé body S1 až S6

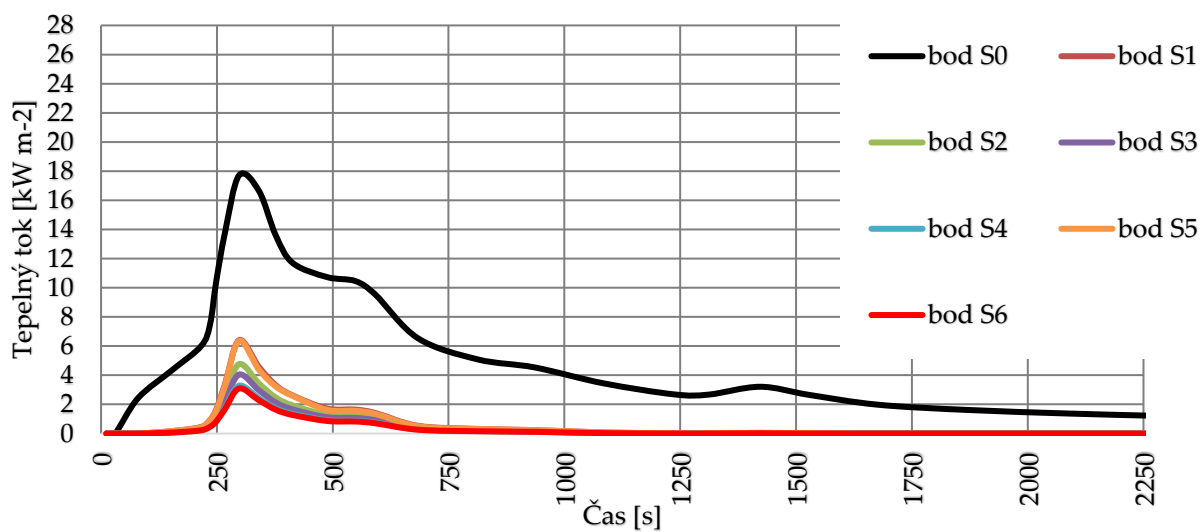
Pro další posouzení a porovnání odolnosti byly navrženy varianty kompozitní lávky s konstrukční výškou 2,75; 3,0 a 3,25 metrů nad zemí. Pro tyto varianty byly stejně jako pro variantu 3,5 m vypočteny tepelné toky na jednotlivé body v závislosti na čase. Následně byly všechny čtyři varianty posouzeny v programu Ansys.



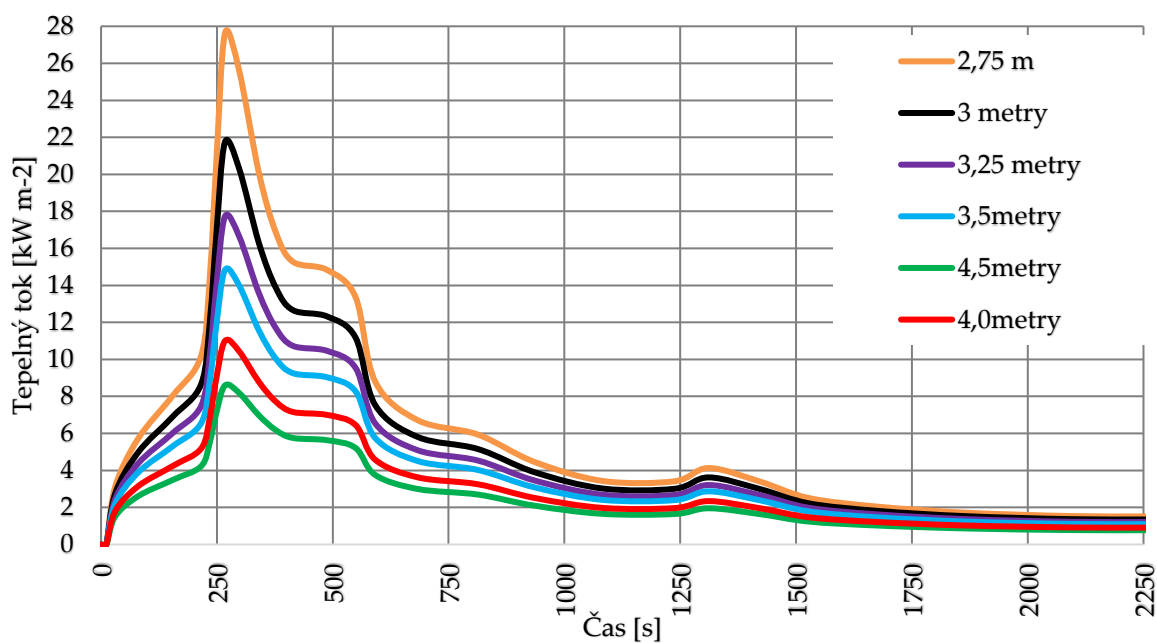
graf. 23 Tepelný tok pro výšku 2,75 m



graf. 24 Tepelný tok pro výšku 3,0 m



graf. 25 Tepelný tok pro výšku 3,25 m



graf. 26 Pokles tepelného toku na bod S0 v závislosti na konstrukční výšce

#### 4.4 Posouzení kompozitní lávky

Při posuzování či dimenzování kompozitních profilů se ve valné většině provádí kontrola konstrukce na přípustné deformace, tedy průhyb. Je však nutné kontrolovat

působící ohybové a smykové napětí, v případě delších prvků převládá především ohybové napětí, v případě kratších smykové.

Pro prvky namáhané ohybem tak sledujeme tři kritéria:

- Napětí od působícího zatížení
- Průhyb
- Odolnost nosníku vůči kroucení a bočním deformacím

V případě anizotropního materiálu, jakým je kompozit se skleněnými vlákny, je důležité uvažovat směr působícího namáhání, ten dále předurčuje rozdílný modul pružnosti v podélném a příčném směru. Pro dílce namáhané jednosměrným napětím (např. ohyb štíhlého nosníku) pak lze použít metody platné pro izotropní materiály, je ovšem nutné použít správný modul pružnosti vzhledem ke směru namáhání.

Stálé zatížení kompozitní lávky se skládá z vlastní tíhy jednotlivých tažených profilů, instalovaných pochozích roštů a kotveného zábradlí. Proměnné zatížení je pak dáno užitnou kategorií lávky. Pro posouzení konstrukce při běžné teplotě i při požáru je uvažováno s vlastní tíhou profilů, zahrnutou do výpočtu programem Ansys, a dále pak spojitým zatížením zahrnujícím vliv stálého a proměnného zatížení s dílčími součiniteli spolehlivosti  $\gamma_G$  a  $\gamma_Q$  dle ČSN EN 1991-1-1 [42].

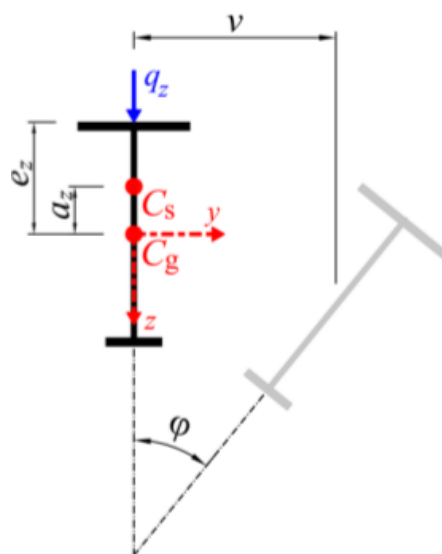
Jelikož je nosník příčně stabilizován pouze v podporách, je dále nutné stanovit momentovou únosnost nosníku se zahrnutím vlivu ztráty příčné a torzní stability průřezu a vybočení tlačené pásnice<sup>25</sup>, který je zvláště důležitý pro otevřené či tenkostěnné průřezy. Při zatížení se tlačená pásnice snaží vybočit ze své výchozí pozice, zatímco tažená drží průřez v ohybové rovině, zároveň zatížení mimo pásnice způsobuje kroucení kolem podélné osy profilu, kterému je bráněno tuhostí profilu v kroucení. U štíhlých prvků namáhaných ohybovým momentem tak nemusí dojít k dosažení mezní únosnosti vlivem překročení ohybové únosnosti, ale ztrátou příčné a torzní stability, tedy k přetvoření prutu z roviny ohybu při dosažení kritického momentu  $M_{cr}$ .

---

<sup>25</sup> V cizojazyčné literatuře nazýván Lateral–Torsional (LTB)

Po překročení kritického momentu tak dochází k bifurkaci rovnováhy nosníku. Při návrhu nosníku je tak dále nutno kontrolovat štíhlost profilu závislou na tloušťce pásnic, délce nosníku, typu zatížení a jeho umístění a na typu podepření nosníku.

Výslednou prostorovou deformaci tak lze rozdělit na složku příčného posunutí průřezu  $v$  a na natočení průřezu  $\varphi$ , příkladem tak je např. deformace průřezu s jednoosou symetrií (obr. 54).



obr. 54 Příklad prostorové deformace symetrického profilu [43]

kde  $q_z$  je svislé zatížení

$C_g$  je těžiště průřezu

$C_s$  je střed smyku

$a_z$  vzdálenost mezi středy

$e_z$  vzdálenost mezi těžištěm a místem působení zatížení

Vzhledem k chybějící metodice posuzování kompozitních profilů při klopení jsou vztahy pro výpočet kritického momentu odvozeny z normy [44] používané při návrhu ocelových konstrukcí.

Klopení zatížených prutů z izotropního materiálu je předmětem výzkumu již od počátku 20. století, příkladem tak jsou výzkumy *Timošenka a Gera* [45] rozvíjející klopení I nosníku, či *Vlasova* [46], jejich výzkumy tak poskytují vzorce zahrnující vliv rozdílného zatížení nosníku či jeho podepření. Výzkum a analýzu příčné a torzní stability FRP kompozitů pak lze najít v zahraničních pracích např. (*Nguyen, Chan, Mottram* [47]), či (*Ascione, Giordano, Spadea* [48]) které poskytují vědecké poznatky při klopení symetrických I a U profilů.

Pro profily symetrické pro alespoň jednu z os je kritický moment  $M_{cr}$  dán obecným vztahem dle ČSN EN 1993-1-1 [44] jako:

$$M_{cr} = \mu_{cr} * \frac{\pi \sqrt{EI_z * GI_t}}{L} \quad R. 16$$

Kde bezrozměrný kritický moment  $\mu_{cr}$  (R. 17), parametr kroucení  $\kappa_{wt}$  (R. 18), parametr působíště zatížení vzhledem ke středu smyku  $\zeta_g$  (R. 19) a parametr nesymetrie průřezu  $\zeta_j$  (R. 20) jsou pak dány vztahy viz. níže, společně s koeficienty C1, C2 a C3 pak zahrnují vliv uložení konců, délku nosníku, vzpěrnou délku a souřadnice působíště zatížení vzhledem k těžišti průřezu.

$$\mu_{cr} = \frac{C1}{k_z} * \left[ \sqrt{1 + \kappa_{wt}^2 + (C2 * \zeta_g - C3 * \zeta_j)^2} - (C2 * \zeta_g - C3 * \zeta_j) \right] \quad R. 17$$

$$\kappa_{wt} = \frac{\pi}{k_w * L} * \sqrt{\frac{EI_w}{GI_t}} \quad R. 18$$

$$\zeta_g = \frac{\pi * z_g}{k_z * L} * \sqrt{\frac{EI_z}{GI_t}} \quad R. 19$$

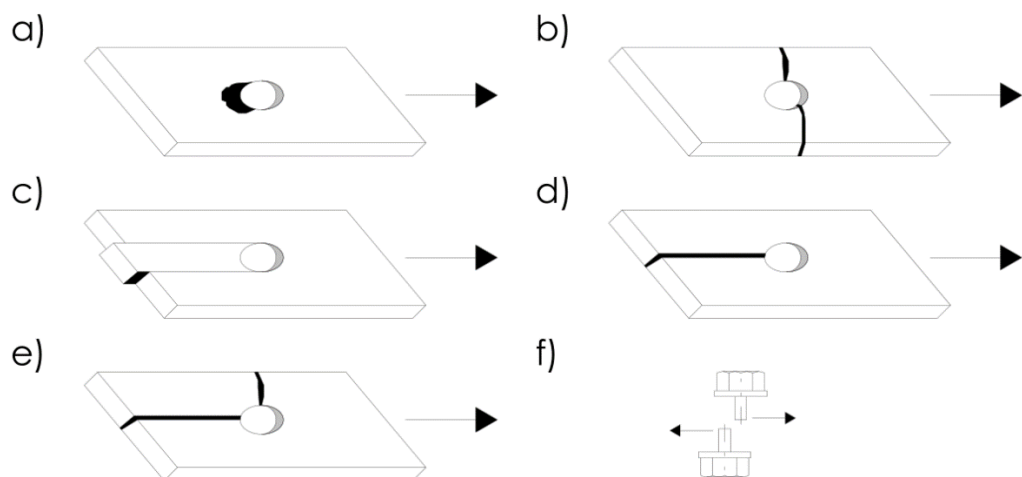
$$\zeta_j = \frac{\pi * z_j}{k_z * L} * \sqrt{\frac{EI_z}{GI_t}} \quad R. 20$$

Pro celkové posouzení pochozí lávky by bylo dále nutné posoudit pevnost a chování šroubovaných spojů I a U profilu, ty jsou vzájemně spojeny ocelovým L – úhelníkem a nerezovými šrouby. Vzhledem k chybějícím materiálovým vlastnostem zkoušeného kompozitu, především z hlediska pevnosti v otláčení, však toto posouzení není provedeno, dále tak pouze uvádím teoretické poznatky pro posouzení spojů a jejich možné porušení.

Při navrhování šroubových spojů je nutno zaručit, že šrouby a kompozitní profily přenesou působící lokální napětí a zároveň bude zaručen bezpečný přenos namáhání z oblasti okolo šroubu do zbytku konstrukce, možné typy porušení spojů jsou dále zobrazeny na obr. 55. Při namáhání styčnicku v rovině spoje je nutno posoudit únosnost v otláčení, vytržení, porušení kompozitu v tahu a únosnost spojovacího prvku ve stříhu,



pro namáhání mimo rovinu spoje je pak nutno vypočítat únosnost v protlačení a porušení šroubů v tahu, při návrhu ocelových šroubů se pak postupuje dle ČSN EN 1993-1-1, ČSN EN 1993-1-4 a ČSN EN 1993-1-8. Při namáhání přitom předpokládáme kombinaci výše uvedených způsobů porušení.



a) *Porušení otlačením*

b) *Porušení v tahu*

c) *Porušení vytržením*

d) *Porušení rozštěpením*

e) *Porušení kombinací tahu a rozštěpením*

f) *Porušení spojovacího prvku*

obr. 55 *Typy porušení kompozitních šroubovaných spojů*

Při posuzování únosnosti v tahu, otlačení a ve vytržení profilů vyrobených metodou pultruze, dále rozlišujeme směr působení návrhové síly  $V_{sd}$ , na sílu působící v ose profilu a kolmo k ose. Níže uvedené vzorce jsou převzaty z publikace *Ryjáček a kol.* [18].

Únosnost v tahu při působícím zatížení  $V_{sd}$  v úhlu  $0^\circ$  až  $5^\circ$  platí že:

$$V_{sd} \leq \frac{1}{k_{tc}} * f_{Lt,Rd} * (w - n * d) * t \quad R. 21$$

pro úhel působícího zatížení mezi  $5^\circ$  až  $90^\circ$  pak platí:

$$V_{sd} \leq \frac{1}{k_{tc}} * f_{Tt,Rd} * (w - n * d) * t \quad R. 22$$

kde  $k_{tc}$  je součinitel koncentrace napětí

$w$  je šířka prvku

$n$  je počet šroubů

$t$  je tloušťka prvku

$f_{Lt,Rd}$  a  $f_{Tt,Rd}$  je pevnost kompozitu v tahu ve směru osy prvku / kolmo k ose  
 $d$  je průměr použitého šroubu

Pro únosnost v otláčení platí že, pro zatížení  $V_{sd}$  v úhlu  $0^\circ$  až  $5^\circ$  je únosnost rovna:

$$V_{sd,d} \leq \frac{1}{k_{cc}} * f_{L,br,Rd} * d_b * t \quad R. 23$$

pro úhel působícího zatížení mezi  $5^\circ$  až  $90^\circ$  pak platí:

$$V_{sd,d} \leq \frac{1}{k_{cc}} * f_{T,br,Rd} * d_b * t \quad R. 24$$

kde  $V_{sd,d}$  je zatížení přenášené jedním šroubem  $t$  je tloušťka prvku  
 $k_{cc}$  je součinitel tlakové koncentrace  $d_b$  je průměr otvoru šroubu  
 $f_{L,br,Rd}$  a  $f_{T,br,Rd}$  je pevnost kompozitu v otláčení ve směru osy prvku / kolmo k ose

Únosnost ve vytržení je dána jako:

$$V_{sb,d} \leq f_{V,Rd} * (2e - d) * t \quad R. 25$$

kde  $f_{V,Rd}$  je únosnost FRP kompozitu ve smyku  
 $V_{sb,d}$  je síla přenášená šroubem  $e$  je osová vzdálenost šroubu od okraje  
 $d$  je průměr použitého šroubu  $t$  je tloušťka prvku

Pro stanovení odolnosti šroubu vůči protlačení je nutné vypočítat únosnost navrženého spoje ve vytržení kolmo na jeho rovinu, ta je dána jako:

$$N_{sb,d} \leq R_{Nb,d} = f_{V,Rd} * \pi * d_r * t \quad R. 26$$

kde  $N_{sb,d}$  je tahová síla ve šroubu  $d_r$  je průměr podložky šroubu  
 $f_{V,Rd}$  je únosnost FRP kompozitu ve smyku  $t$  je tloušťka prvku

#### 4.4.1 Posouzení za pokojové teploty

Při výpočtu únosnosti nosníku za běžné teploty, je posouzeno mezní napětí v průřezu nosníku, průhyb a momentová únosnost s uvažováním ztráty příčné a torzní stability. Dále popsané vzorce a postupy jsou převzaty z brožury pro navrhování kompozitních profilů zpracované firmou Prefa Kompozity a.s [38] a z normy ČSN EN 1993-1-1 [44]

Zatížení působící na hlavní nosník je rovno:

- a) Vlastní tíha hlavního nosníku je dána jako:

$$\begin{aligned} g_{k,váha} &= \text{objemová hmotnost kompozitu} * \text{plocha } U \text{ profilu} \\ &= 17,9345 \text{ kN/m}^3 * 6,85 * 10^{-3} \text{ m}^2 = 0,123 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

- b) Stálé zatížení instalovanými kompozitními rošty a zábradlím je uvažováno rovno:

$$g_{k,doplňky} = 0,1 \text{ kN/m}$$

$$\text{Stálé charakteristické zatížení } g_k \text{ celkem} = 0,223 \text{ kN/m}$$

$$\text{Stálé návrhové zatížení } g_d \text{ celkem} = 0,223 \text{ kN/m} * \gamma_G = 0,223 * 1,35 = 0,3 \text{ kN/m}$$

- c) Užité zatížení lávky o šířce 1 m pohybem chodců je uvažováno dle [42] rovno = 2,5 kN/m<sup>2</sup>, se zatěžovací šířkou na jeden profil rovnou 0,5 m:

$$q_k = 2,5 \text{ kN/m}^2 * 0,5 \text{ m} = 1,25 \text{ kN/m}$$

$$\text{Užité charakteristické zatížení } q_k \text{ celkem} = 1,25 \text{ kN/m}$$

$$\text{Užité návrhové zatížení } q_d \text{ celkem} = q_k * \gamma_Q = 1,25 * 1,5 = 1,875 \text{ kN/m}$$

- d) Návrhové zatížení působící na hlavní nosník je tak celkově rovno:

$$\Sigma g_d + q_d = 0,3 + 1,875 = \mathbf{2,175 \text{ kN/m}}$$

Působící ohybový moment je roven:

$$M_{Ed} = \frac{1}{8} * (g_d + q_d) * L^2 = \frac{1}{8} * 2,175 * 4,0^2 = 4,35 \text{ kNm} \quad \text{R. 27}$$

Působící a mezní ohybové napětí nosníku se vypočte jako:

$$\sigma_0 = \frac{M_{Ed}}{W} = \frac{4,35}{541 * 10^{-6}} = 8,04 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{0,max} = \frac{E}{27 * \left(\frac{b}{t}\right)^{0,95}} = \frac{22,77 * 10^3}{27 * \left(\frac{90}{15}\right)^{0,95}} = 153,7 \text{ MPa} \quad \text{R. 28}$$

$$\sigma_0 = 8,04 \leq \sigma_{0,max} = 153,7$$

Průhyb nosníku se zahrnutím vlivu smyku je:

$$\begin{aligned} \omega &= \frac{5}{384} * \frac{(g_k + q_k) * L^4}{E * I_{xx}} + K_v * \frac{(g_k + q_k) * L^2}{A_w * G} \\ &= \frac{5}{384} * \frac{(0,223 + 1,25) * 4,0^4}{22,77 * (81,2 * 10^6) * 10^{-6}} + 0,35 * \frac{(0,223 + 1,25) * 4,0^2}{4050 * 2,95} \\ &= 3,35 \leq \frac{L}{250} = 16 \text{ mm} \end{aligned} \quad \text{R. 29}$$

kde  $v_k$  je spojité zatížení na nosníku

$L$  je rozpětí podpor

$E$  modul pružnosti

$I_{xx}$  moment setrvačnosti průřezu

$K_v$  koeficient vyjadřující maximální smykovou sílu, pro U profil 0,35

$A_w$  plocha stojiny

$G$  modul pružnosti ve smyku

Kritický moment pro podélný U nosník dále počítám dle národní přílohy NB uvedené v ČSN EN 1993-1-1 [42], jednotlivé součinitele dle R. 17 až R. 20 jsou rovny:

$$\begin{aligned} \mu_{cr} &= \frac{c_1}{k_z} * \left[ \sqrt{1 + \kappa_{wt}^2 + (C2 * \zeta_g - C3 * \zeta_j)^2} - (C2 * \zeta_g - C3 * \zeta_j) \right] = \\ &= \frac{1,13}{1} * \left[ \sqrt{1 + 0,75^2 + (0,459 * 0,94)^2} - (0,459 * 0,94) \right] = 1,0 \end{aligned} \quad \text{R. 30}$$

$$\kappa_{wt} = \frac{\pi}{k_w * L} * \sqrt{\frac{EI_w}{GI_t}} = \frac{\pi}{1 * 4000} * \sqrt{\frac{22770 * 59,66 * 10^9}{2950 * 506,1 * 10^3}} = 0,75 \quad \text{R. 31}$$

$$\zeta_g = \frac{\pi * z_g}{k_z * L} * \sqrt{\frac{EI_z}{GI_t}} = \frac{\pi * 150}{1 * 4000} * \sqrt{\frac{22770 * 4,18 * 10^6}{2950 * 506,1 * 10^3}} = 0,94 \quad \text{R. 32}$$

$$\zeta_j = \frac{\pi * z_j}{k_z * L} * \sqrt{\frac{EI_z}{GI_t}} = 0 \quad R. 33$$

Kritický moment pro hlavní nosník pak je dle R. 16 roven:

$$\begin{aligned} M_{cr} &= \mu_{cr} * \frac{\pi \sqrt{EI_z * GI_t}}{L} \\ &= 2,12 * \frac{\pi * \sqrt{22770 * 4,18 * 10^6 * 2950 * 506,1 * 10^3}}{4000} \\ &= 9,41 \text{ kNm} \end{aligned} \quad R. 34$$

kde  $C1$  a  $C2$  závisí na průběhu ohybového momentu a uložení konců nosníku, uvažováno  $C1 = 1,13$  a dle  $C2 = 0,459$  Tab. NB.3.2 [44]

$z_g$  závisí na poloze zatížení vzhledem ke středu smyku, uvažováno  $z_g = 150$

$z_j$  je pro symetrické profily k ose y-y rovno 0

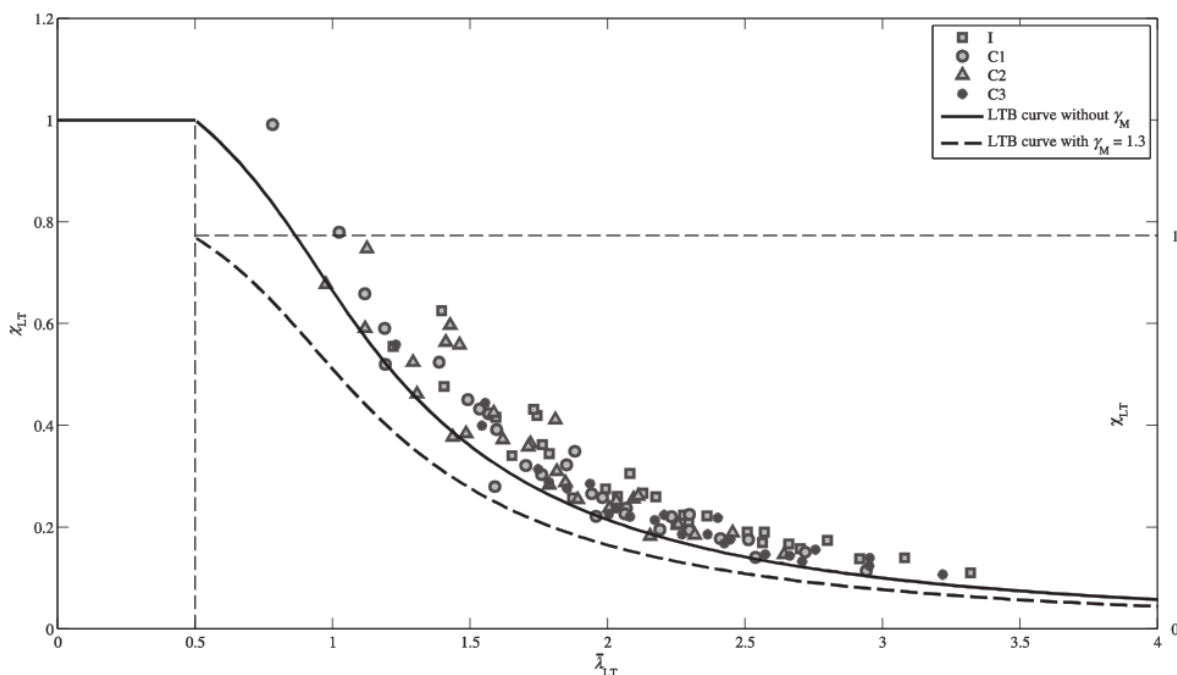
$L_{cr}$  je efektivní rozpětí mezi body zajištěnými proti posunu kolmo z roviny, pro hlavní nosník nepředpokládám dostatečné ztužení v příčném směru připojenými rošty či příčníky, tedy  $L_{cr}$  rovno 4,0 m

$k_z$  a  $k_w$  součinitele dle uložení konců a umožnění deplanace průřezu, oba uvažovány rovné 1,0

Poměrná štíhlost při ztrátě stability při ohybu je pak:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W * \sigma_m}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{541 * 10^3 * 153,7}{9,41 * 10^6}} = 2,97 \quad R. 35$$

Odpovídající součinitel příčné a torzní stability (křivka c) je pak roven  $\chi_{LT} = 0,097$  dle [49]. Podobné hodnoty lze nalézt i v [47], zde vychází pro vypočtenou poměrnou štíhlost  $\chi_{LT} \cong 0,09 \div 0,1$  se zahrnutím součinitele spolehlivosti  $\gamma_M = 1,3$ . Konzervativně tak uvažují s hodnotou 0,097.



graf. 27 Vzpěrnostní součinitele pro válcované profily z FRP kompozitu [47]

Momentová únosnost hlavního nosníku je potom dána jako:

$$M_{Rd} = \chi_{Lt} * W * \sigma_m = 0,097 * 541 * 10^3 * 153,7 = 8,07 \text{ kNm} > M_{Ed} = 4,35 \quad R. 36$$

Nosník za pokojové teploty vyhoví.

#### 4.4.2 Posouzení za požáru

Pro výpočet rozložení teploty v čase byl vytvořený model „nameshován“ v modulu Ansys Mechanical, při tomto úkonu jsou jednotlivé modelované části konstrukce automaticky analyzovány a na jejich povrchu je vytvořena výpočetní 2D síť, tvořená třístrannými či čtyřstrannými obrazci. Velikost jednotlivých obrazců byla zvolena v závislosti na jejich umístění, pro hlavní nosníky a příčník uprostřed rozpětí byla výpočetní síť „zhuštěna“ na velikost obrazce 50 x 50 mm, na pásnicích pak 30 x 100 mm, pro zbylé příčníky pak byly velikosti obrazců 90 x 90 mm. Tímto rozdělením jsem chtěl především urychlit výpočetní čas a zpřesnit požadované výsledky uprostřed rozpětí lávky. Pro kontrolu jsem porovnal průhyby navržené dvojice nosníků lávky zatížené silou 6 kN/m pro tři výpočetní sítě a ruční výpočet.

<i>Výpočet</i>	<i>Průhyb [mm]</i>	<i>Odchylka</i>	<i>Výpoč. čas [s]</i>
<i>Ruční výpočet</i>	6,890	-0,61 %	
<i>Vytvořená síť</i>	6,932	-	274
<i>Automatická síť 30 mm</i>	6,961	+0,41 %	757
<i>Automatická síť 60 mm</i>	6,926	-0,09 %	230

Z výpočtů lze vidět, že se má navržená síť výsledkově nacházet mezi dvěma automaticky vytvořenými sítěmi, tedy mezi menší sítí s obrazci o velikosti 30 x 30 mm a větší s obrazci 60 x 60 mm. Zpřesněný výpočet průhybu má však za následek prodloužení výpočetního času bezmála třináásobně při odchylce o 0,41 %, z tohoto důvodu proto dále volím svou navrženou síť.

Dále byly definovány okrajové podmínky modelu skládající se z podmínek prostého podepření lávky, zatížení a počáteční teploty rovné 20 °C. Tepelný tok na konstrukci byl zadán dle vypočtených bodů S0 až S6, části konstrukce mezi těmito body byly zatíženy lineárními funkcemi tepelného toku tak, aby bylo dosaženo rovnoměrného zahřívání všech exponovaných částí konstrukce s přihlédnutím k jejich vzdálenosti od zdroje požáru.

Proudění tepelného toku do okolí je konzervativně uvažováno při okolní teplotě 20 °C, sálání na straně vystavené požáru pak se součinitelem přestupu tepla rovno  $\alpha = 35 \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-1}$  a na odvrácených stranách  $\alpha = 4 \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-1}$  dle [50].

Pro výpočet byla v programu zvolena nelineární analýza s iterační numerickou metodou Newton – Raphsona (metoda tečen), která řeší soustavy nelineárních rovnic. Celý výpočet tak probíhá po jednotlivých výpočetních krocích se zahrnutím iterace, minimální počet iterací v krocích byl zvolen 15 s konvergencí vypočítaných hodnot 0,5 %. Pro provedení analýzy bylo definováno 28 výpočetních kroků odpovídajících převzatému grafu rychlosti uvolňování tepla viz. graf. 16. Kroky byly dále rozděleny na podkroky s minimální délkou 0,1 s a maximální 10 s, celkový počet podkroků pak byl maximálně 13.

Všechny čtyři varianty lišící se definovanou konstrukční výškou lávky, byly následně podrobeny teplotní analýze pro zjištění rozložení teploty po průřezu v závislosti na čase.

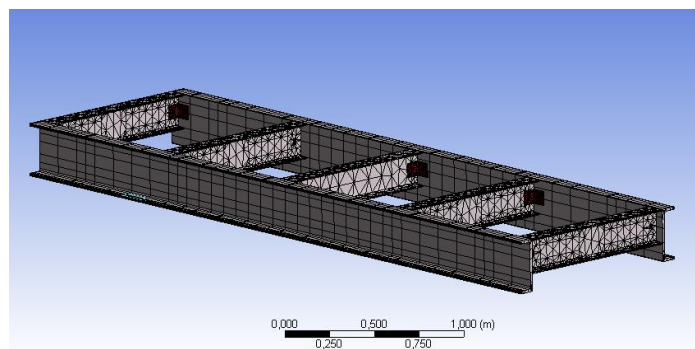


Details of "Analysis Settings"	
Step Controls	
Number Of Steps	28,
Current Step Number	8,
Step End Time	267,3 s
Auto Time Stepping	Program Controlled
Initial Time Step	0,191 s
Minimum Time Step	1,91e-002 s
Maximum Time Step	1,91 s
Time Integration	On

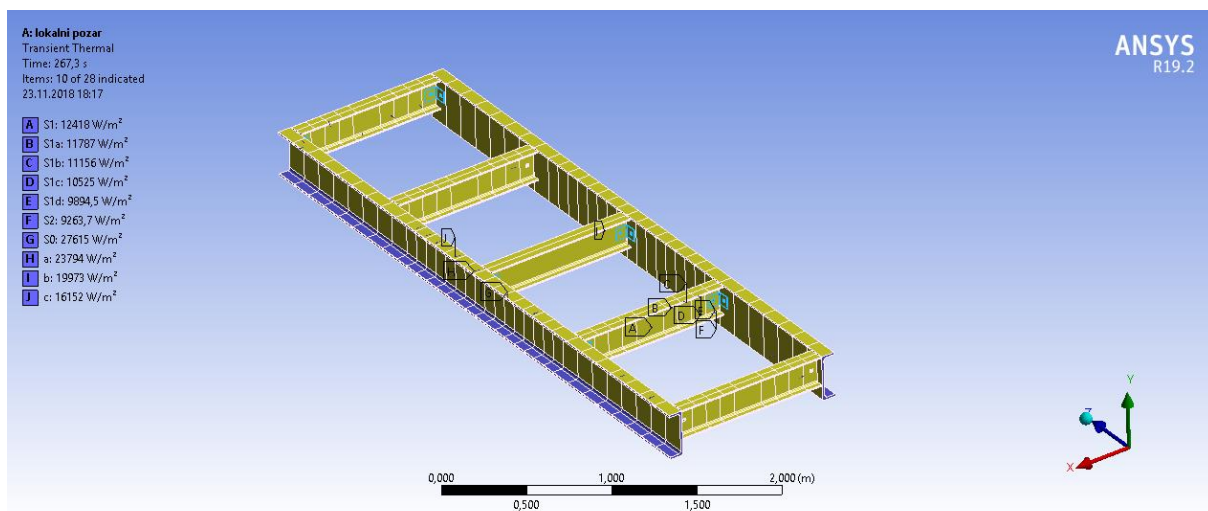
  

Details of "Initial Temperature"	
Definition	
Initial Temperature	Uniform Temperature
Initial Temperature Value	20, °C

obr. 56 Nastavení počáteční teploty a výpočetních kroků

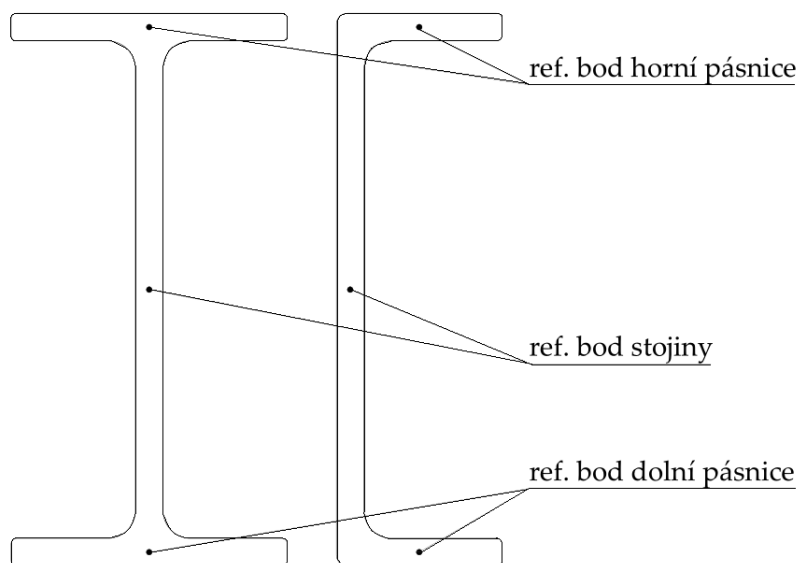


obr. 57 Výpočetní síť modelu

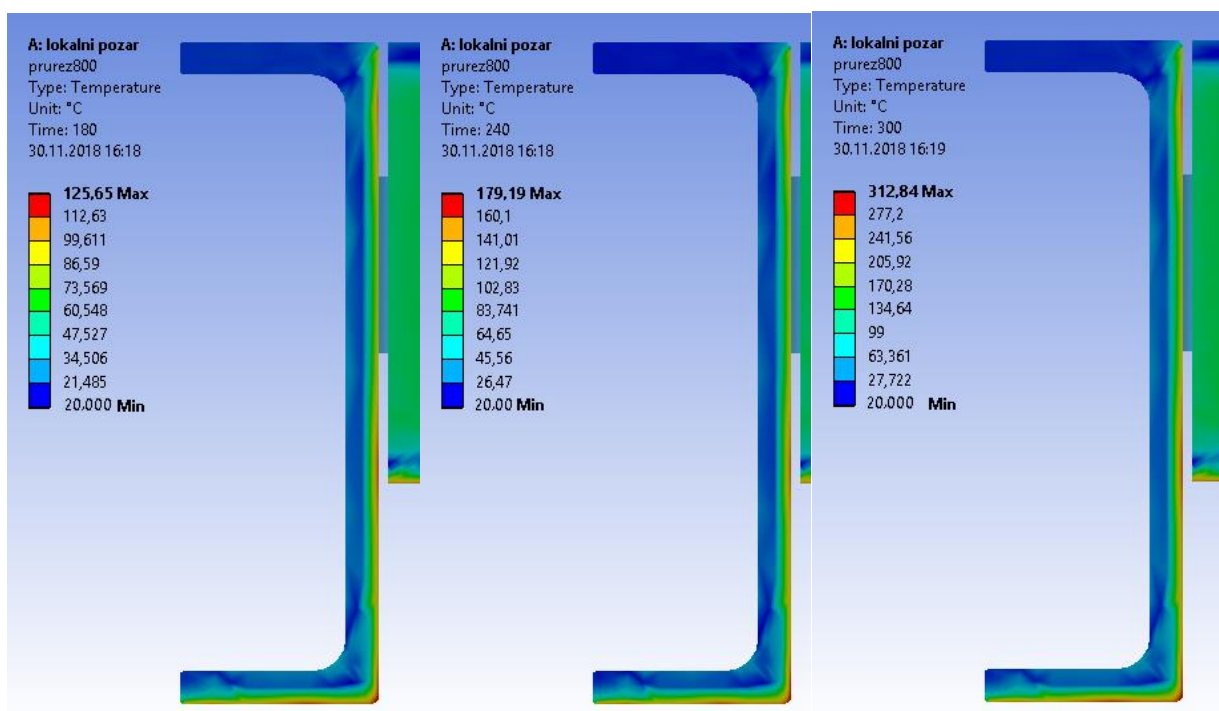


obr. 58 Zatížení jednotlivých částí konstrukce tepelným tokem

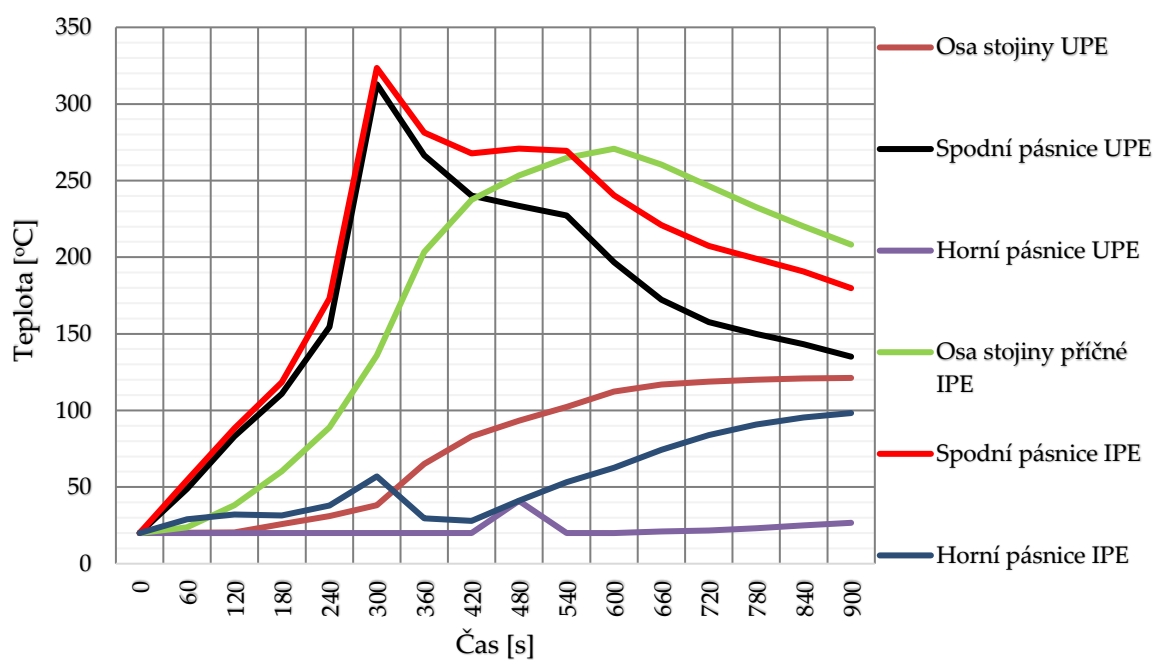
Maximální teplota pro variantu s konstrukční výškou 2,75 m dosažená na hlavním nosníku, je rovna  $\theta = 312,84$  °C v čase 300 s viz graf. 28. Vzhledem k malé vodivosti kompozitního materiálu dochází v průřezu k rychlému ohřívání povrchu tenké spodní pásnice a stojiny, zatímco uvnitř či při horní pásnici zůstává průřez po delší dobu chladný. Referenční body pro měření teploty byly zvoleny uprostřed stojin a obou pásnic profilů viz. obr. 59



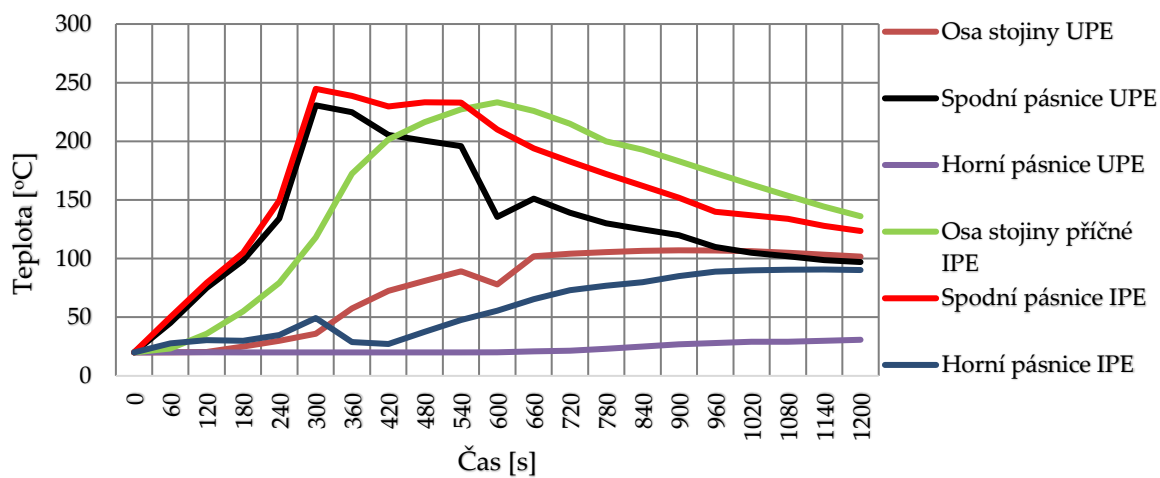
obr. 59 Rozmístění referenčních bodů po průřezech



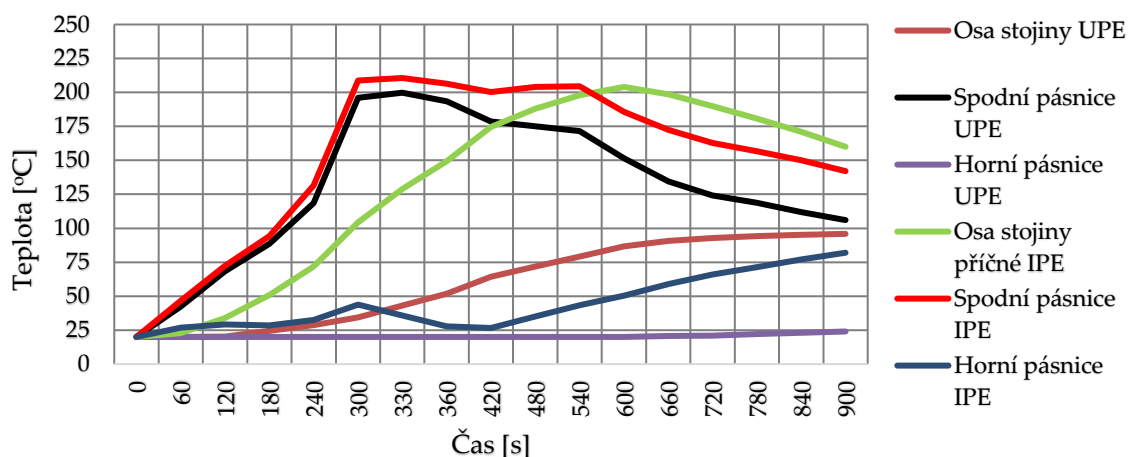
obr. 60 Teplota po průřezu pro Var 2,75



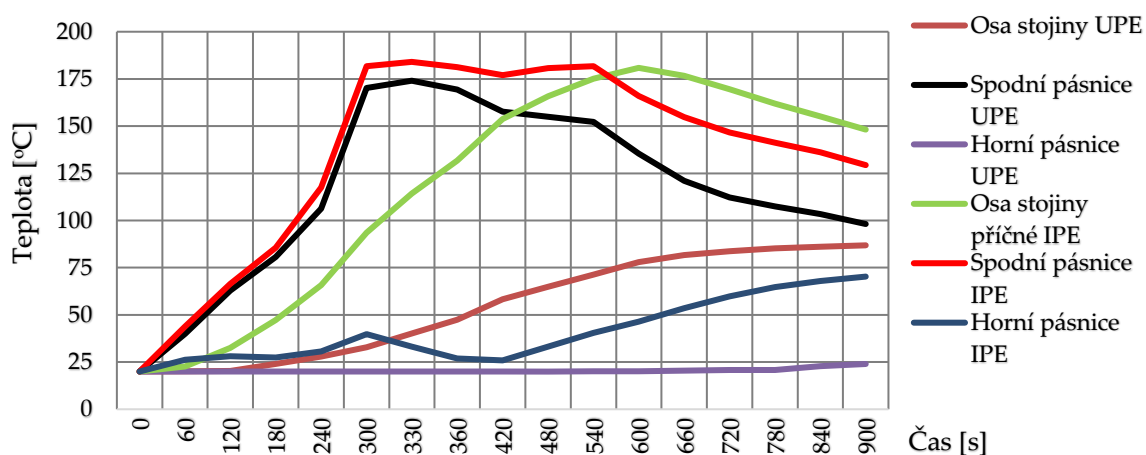
graf. 28 Vývoj teploty pro variantu 2,75



graf. 29 Vývoj teploty pro variantu 3,0

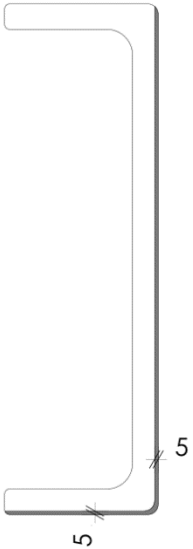


graf. 30 Vývoj teploty pro variantu 3,25



graf. 31 Vývoj teploty pro variantu 3,5

Pro jednotlivé varianty byly stanoveny kritické momenty v závislosti na čase, s uvažováním redukce materiálových vlastností kompozitu při zvyšující se teplotě. Pro variantu s nejnižší konstrukční výškou a tím i nejvyššími dosaženými teplotami (Var 2,75) byla dosažena momentová únosnost nosníku v čase 300 s [5 min]. Dle rovnice R. 16 jsou bezrozměrné koeficienty, kritický moment a poměrná štíhlost v tomto čase, při zahrnutí vlivu degradace materiálu pásnice a stojiny, rovny viz. R. 37 až R. 42. Je však nutné poznamenat, že je uvažováno s redukcí rozměrů navrženého průřezu o části s nulovou pevností viz obr. 61 (část spodní pásnice a stojiny s teplotou nad 200 °C), tím však může být dále uvedený normový postup mírně nepřesný, neboť není určen pro takto vzniklé nesymetrické profily, vzhledem k chybějícím znalostem a metodice však aplikují tyto vzorce stejně jako v kap. 4.4.1.

	Moment setrvačnosti $I_z$ [10 <sup>3</sup> mm <sup>4</sup> ]	3,79
	Moment setrvačnosti v kroucení $I_t$ [10 <sup>3</sup> mm <sup>4</sup> ]	215,2
	Výsečový moment setrvačnosti [10 <sup>9</sup> mm <sup>4</sup> ]	4,52
	Průřezový modul $W_{yy}$ [10 <sup>3</sup> mm <sup>3</sup> ]	435

obr. 61 Redukce průřezu v čase 300 s pro Var 2,75

$$\begin{aligned} \mu_{cr} &= \frac{c_1}{k_z} * \left[ \sqrt{1 + \kappa_{wt}^2 + (C2 * \zeta_g - C3 * \zeta_j)^2} - (C2 * \zeta_g - C3 * \zeta_j) \right] = & R. 37 \\ &= \frac{1,13}{1} * \left[ \sqrt{1 + 1,05^2 + (0,459 * 1,38)^2} - (0,459 * 1,38) \right] = 1,06 \end{aligned}$$

$$\kappa_{wt} = \frac{\pi}{k_w * L} * \sqrt{\frac{EI_w}{GI_t}} = \frac{\pi}{1 * 4000} * \sqrt{\frac{8410 * 45,19 * 10^9}{1107 * 215,2 * 10^3}} = 1,05 \quad R. 38$$

$$\zeta_g = \frac{\pi * z_g}{k_z * L} * \sqrt{\frac{EI_z}{GI_t}} = \frac{\pi * 144,1}{1 * 4000} * \sqrt{\frac{8410 * 3,79 * 10^6}{1107 * 215,0 * 10^3}} = 1,38 \quad R. 39$$

$$\zeta_j = \frac{\pi * z_j}{k_z * L} * \sqrt{\frac{EI_z}{GI_t}} = 0 \quad R. 40$$

Kritický moment:

$$\begin{aligned} M_{cr} &= \mu_{cr} * \frac{\pi \sqrt{EI_z * GI_t}}{L} & R. 41 \\ &= 1,05 * \frac{\pi * \sqrt{8410 * 3,79 * 10^6 * 1107 * 215,0 * 10^3}}{4000} \\ &= 2,19 \text{ kNm} \end{aligned}$$

Poměrná štíhlost při ztrátě stability při ohybu je pak:

$$\overline{\lambda}_{LTfi} = \sqrt{\frac{W * \sigma_{m190C}}{M_{Cr}}} = \sqrt{\frac{435 * 10^3 * 23,42}{2,19 * 10^6}} = 2,16 \quad R. 42$$

Odpovídající součinitel příčné a torzní stability je pak dle graf. 27 roven  $\chi_{LT} = 0,165$ . Při výpočtu momentové únosnosti je uvažováno s redukovanou mezí pevnosti kompozitu, vzhledem k nerovnoměrnému ohřevu po průřezu je počítáno s průměrnou teplotou mezi stojinou a spodní pásnici rovnou  $\theta_{prům} = 190 \text{ } ^\circ\text{C}$ , mez pevnosti je pak:

$$\sigma_{m(190C)} = -0,0002 * \theta^3 + 0,0945 * \theta^2 - 13,3484 * \theta + 689,6642 = 23,42 \text{ MPa}$$

a momentová únosnost rovna:

$$M_{Rd,fi} = \chi_{Lt} * W * \sigma_{m190C} = 0,165 * 435 * 10^3 * 23,42 = 1,68 \text{ kNm} \quad R. 43$$

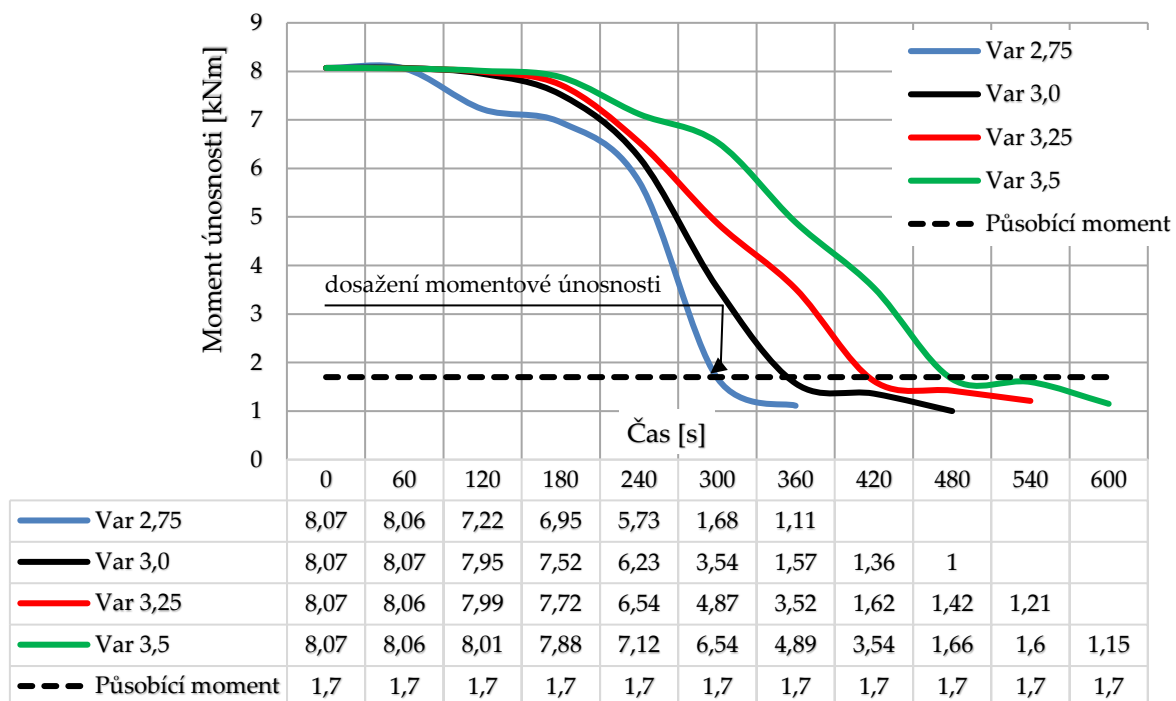
Pro posouzení za požáru je dále nutno stanovit redukční součinitel zatížení  $\eta_{fi}$ , daný jako poměr stálého a proměnného zatížení s kombinačním součinitelem  $\psi_{1,1} = 0,5$ , redukční součinitel je roven:

$$\eta_{fi} = \frac{g_k + \psi_{1,1} * q_k}{g_k * \gamma_g + q_k * \gamma_q} = \frac{0,223 + 0,5 * 1,25}{0,223 * 1,35 + 1,25 * 1,5} = 0,39 \quad R. 44$$

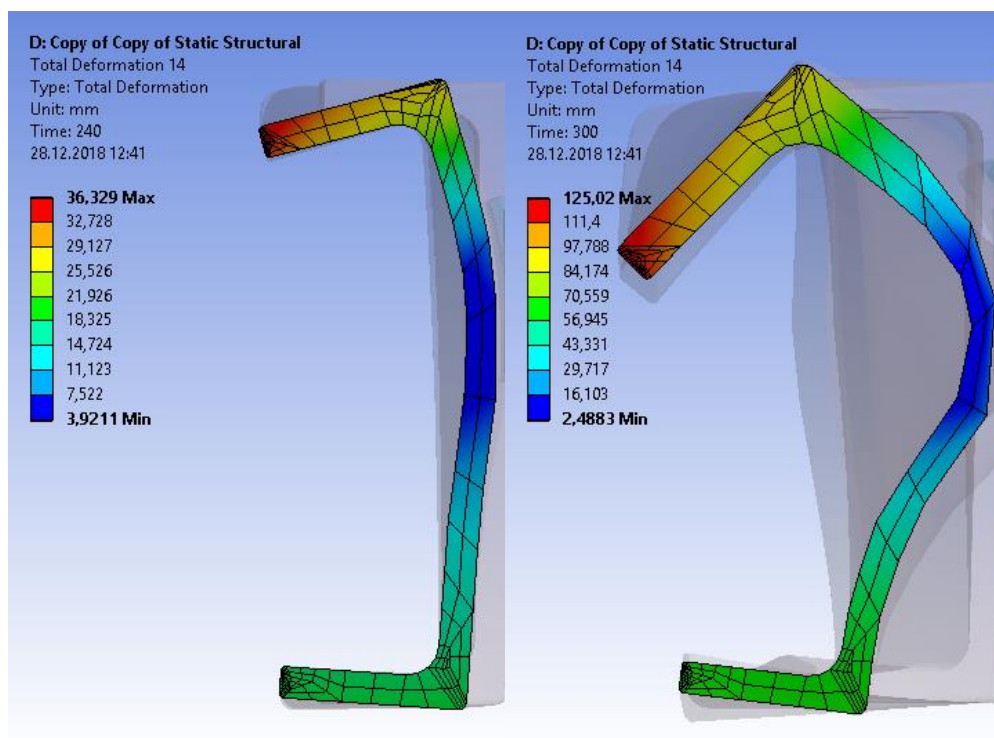
a ohybový moment působící při požární návrhové situaci je:

$$M_{Ed,fi} = \eta_{fi} * M_{Ed} = 0,39 * 4,35 = 1,70 \text{ kNm} > M_{Rd,fi} = 1,68 \quad R. 45$$

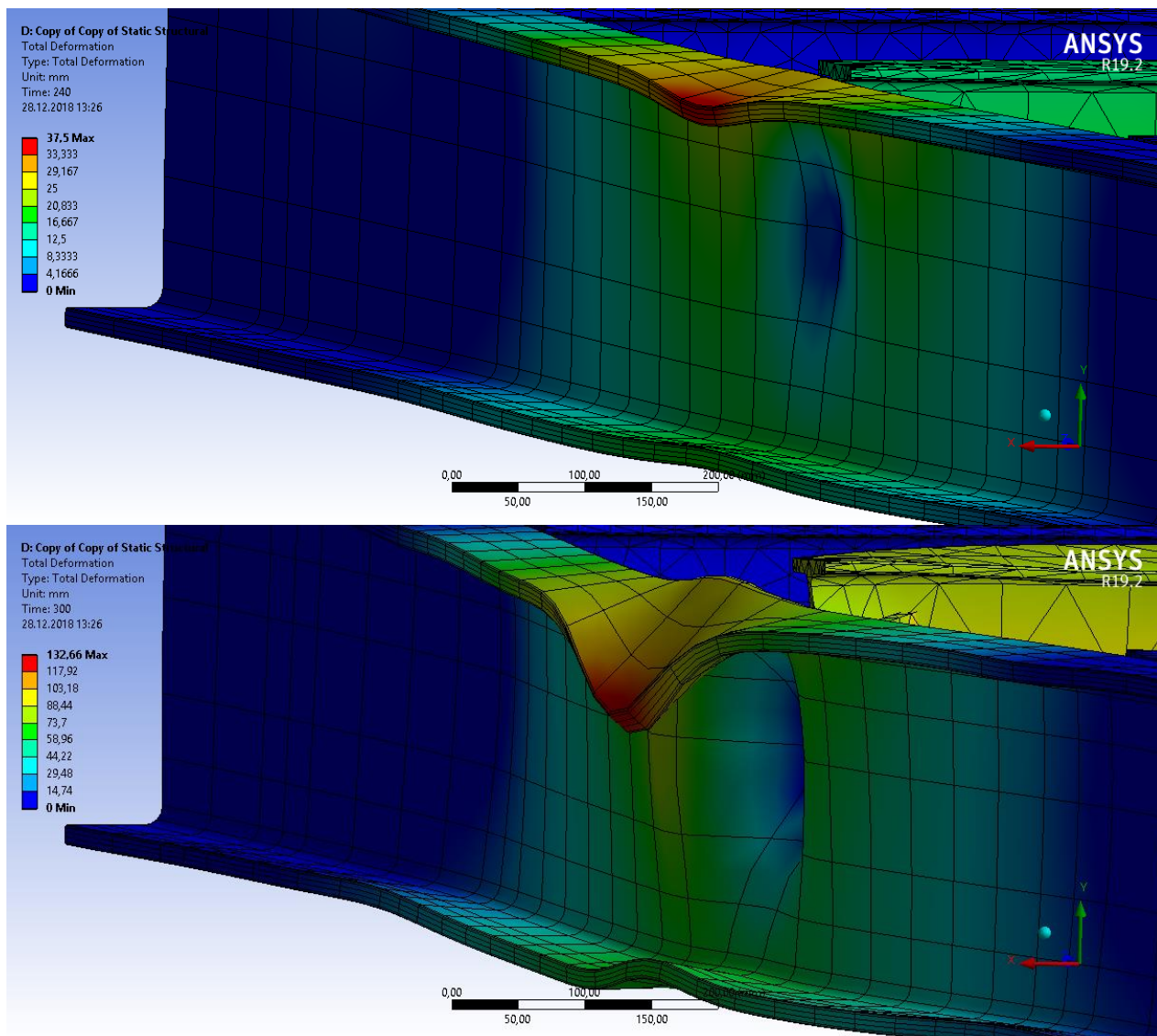
Nosník tak za požáru nevyhoví při ohybu, z grafu lze vidět prudký pokles únosnosti nosníku vlivem degradace materiálu v čase 240 s až 300 s, tzn. v době nejvyššího tepelného toku dopadajícího na konstrukci v čase 267 s dle graf. 32. V ostatních případech došlo vlivem menšího tepelného toku a pomalejšího ohřevu konstrukce k vyčerpání únosnosti hlavního nosníku později. Z grafu tak lze dále vyčíst zvýšení odolnosti o přibližně 60 sekund při zvýšení konstrukční výšky o 0,25 m, pro variantu 2,75 m tak dojde k velkým deformacím po 300 s, pro variantu 3,25 po 420 s, pro variantu 3,5 m po 480 s. Dále je na obr. 62 a obr. 63 vidět značné pružné deformace pásnic při ohybu od excentricky působícího zatížení na horní pásnici.



graf. 32 Redukce momentové únosnosti v průběhu požáru



obr. 62 Celková deformace po průřezu pro Var 2,75 v čase 240 a 300 s



obr. 63 Celková deformace pro Var 2,75 v čase 240 a 300 s



## 5 Závěr

V této práci jsem se zabýval dosavadním využitím, teoretickým složením, a rozdělením kompozitních materiálů. Uvedl jsem nejčastěji využívaná výztužná vlákna, jejich výhody a možnost praktické aplikace. Dále byl rozveden význam použité matrice a vlastnosti ovlivňující její chování při vyšších teplotách. Na závěr teoretické části byly uvedeny nejčastější metody zpracování a výroby kompozitních výrobků s uvedením výhod či nevýhod zvolené techniky.

V experimentální části jsem se věnoval zkoušení FRP kompozitních těles se zahrnutím vlivu teplot, cílem bylo především zjistit, do jaké míry ovlivňuje vyšší teplota fyzikálně – mechanické vlastnosti testovaného materiálu. Pro nástin problematiky zkoušení kompozitního materiálu a plastů obecně byly popsány požadavky na zkoušky materiálu v tahu a při ohybu a také průběh samotných zkoušek. Pro následný návrh a aplikaci kompozitního materiálu byla zvolena metoda čtyřbodového zatěžování v ohybu a popsáno použité zkušební zařízení a jednotlivé vzorky.

Cílem této části bylo stanovit modul pružnosti v ohybu a pevnost v ohybu jednotlivých vzorků za běžné teploty a při jejich předchozím předehřátí na rozdílné teploty. Dle vypočtených vlastností byla pozorována postupná degradace zkušebního materiálu, a to především vlivem měknutí použité matrice a poškozování chemických vazeb. Vzhledem k široké variabilitě výztužných vláken a typu pojiva při návrhu složení kompozitu nelze jednoznačně určit obecné vztahy pro popis jeho degradace v závislosti na teplotě, z průběhu zkoušek však lze konstatovat, že při teplotách nad 100 °C dochází v pojivu k nevratným změnám v souvislosti s jeho měknutím, při teplotách 170 – 200 °C pak dochází k dosažení nulové pevnosti materiálu. Dle *Ryjáček a kol.* [18] pak lze za hraniční teplotu většiny pojiv považovat 70 °C, s uvažováním poklesu pevnosti o 1 % - 5 % při nárůstu teploty o 5 °C nad touto hranicí, tzn. nulová pevnost je dosažena přibližně při 170 °C. To potvrzuje i předpokládanou příčinu malé odolnosti FRP kompozitu při požáru, tedy nízkou odolnost používaných pryskyřic, jejich měknutí a uvolňování pojiva ze zahřátého tělesa, což má za následek postupné snižování pevnosti kompozitu.

V rámci praktické části byla popsána modelovaná konstrukce lávky ve výpočetním programu Ansys a jednotlivé geometrické a materiálové vstupy do programu.

Dále se tato část věnovala stanovení teplotního zatížení navržené konstrukce působením lokálního požáru a použití metody při stanovení tepelného toku dopadajícího na zvolené části lávky.

Navržená obslužná lávka pak byla posouzena při běžné teplotě na mezní stavy únosnosti a použitelnosti a následně posouzena při zahrnutí vlivu zvýšené teploty, kdy byla zjištěna citlivost na ztrátu příčné a torzní stability navržených nosníků při ohřevu a deformace obou pásnic. Řešením tohoto problému by mohly být především konstrukční změny navržené lávky ve formě použití podélných profilů tvaru **I**, **H**, složených **U** profilů, případně použití uzavřených profilů. Dále by bylo možným řešením navržení šikmých vzpěr z kruhových trubek, pro zkrácení rozpětí.

Ze zjištěného chování jednotlivých variant navržené lávky během nárůstu teplot lze konstatovat, že i přes zjevné výhody těchto typů lávek z hlediska hmotnosti, ceny či životnosti je jejich použití v exponovaných místech značně omezeno, především pro jejich vyšší deformaci. Jejich využití bych tak viděl především v místech bez požárního rizika či s malým rizikem vzniku požáru, typicky tak například v objektech vodáren, ČOV či vodních ploch, případně jako obslužné plochy v uzavřených areálech bez požadavku na evakuaci osob. Vzhledem ke svým vlastnostem, především co se týče extrémně malé vodivosti oproti oceli a odolnosti vůči agresivnímu prostředí však vidím využitelnost kompozitních prvků především v kombinaci s ocelí či betonem, případně při navrhování doplňkových částí konstrukce jako jsou zábradlí, žebříky, poklopy či pochůzní rošty. Dominantní postavení pak vidím v jejich využití při konstrukcích vysílačů či krytů antén, a to z hlediska odolnosti vůči povětrnostním podmínkám, mechanické odolnosti a nestínění vyzařovaného vlnění.

## Seznam obrázků

obr. 1 Hliněná cihla vyztužená slámou [3] .....	1
obr. 2 Příklad kompozitního luku [2] (upraveno) .....	2
obr. 3 Detail kompozitní výztuže [5] .....	4
obr. 4 Aplikace uhlíkových lamel [6] .....	4
obr. 5 Podíl jednotlivých odvětví na světové spotřebě kompozitů v r. 2017 [8] .....	5
obr. 6 Příklad materiálového složení Boeingu 787 Dreamliner [9] (upraveno).....	5
obr. 7 Dělení vláken dle geometrie .....	7
obr. 8 Orientace vláken v matrici .....	8
obr. 9 Výroba skleněných vláken [4] (upraveno).....	9
obr. 10 Porovnání velikosti uhlíkového vlákna s lidským vlasem [12] .....	10
obr. 11 Schéma výroby PAN vláken [4] .....	11
obr. 12 Schéma výroby aramidových vláken [4].....	12
obr. 13 Příklad přírodních čedičových vláken zachycených na anténě [15] .....	13
obr. 14 Čedičová kompozitní síť [16] .....	13
obr. 15 Příklady degradace kompozitu vlivem zvýšených teplot (foto autora).....	17
obr. 16 Příklad ručního kladení [22] (upraveno).....	20
obr. 17 Výroba pomocí pultruze [24] (upraveno) .....	21
obr. 18 Použití protlačovaného profilu při renovaci lanové dráhy (foto autora).....	21
obr. 19 Výroba lisováním [25] (upraveno) .....	22
obr. 20 Použití pochozí roštu při renovaci lanové dráhy na Petřín (foto autora) .....	22
obr. 21 Výroba navíjením [26] (upraveno) .....	23
obr. 22 Výroba vstříkáním do matrice [27] (upraveno) .....	23
obr. 23 Metoda vakuového vaku [22] (upraveno) .....	24
obr. 24 Metoda lisováním v autoklávu [29] (upraveno) .....	25
obr. 25 Výroba kontinuální laminací [22] (upraveno).....	25
obr. 26 Výroba odstředivým litím [22] (upraveno) .....	26
obr. 27 Využití kompozitních komínů v uhelných elektrárnách [30].....	26

---

obr. 28	Směs uhlíkových vláken o velikosti 6 až 12 mm [32] .....	27
obr. 29	Mletá směs uhlíkových vláken určená pro recyklaci [33] .....	27
obr. 30	Příklad zkušebního tělesa pro zkoušku v tahu .....	30
obr. 31	Uspořádání při čtyřbodovém zatěžování ( $L = 3L'$ ) .....	32
obr. 32	Zkušební zařízení MTS QTEST/100 .....	35
obr. 33	Píčka s topnými spirálami a ovládací panel s termostatem .....	35
obr. 34	Výpočetní stanice pro kontrolu zařízení a záznam průběhu zkoušky .....	36
obr. 35	Zkušební ocelový přípravek .....	36
obr. 36	Vzorek zkušebního tělesa .....	36
obr. 37	Termočlánek umístěný v kompozitu .....	37
obr. 38	Tahové porušení vzorků č. 4, 7 a 10 .....	49
obr. 39	Tahové porušení vzorku č. 3 .....	50
obr. 40	Tahové porušení krajové vrstvy vzorku č. 11 .....	50
obr. 41	Tahové porušení krajové vrstvy vzorku č. 16 .....	50
obr. 42	Příklady delaminace kompozitu .....	51
obr. 43	Tlakové porušení vzorků č. 9, 12 a 15 .....	51
obr. 44	Řez navrhovanou konstrukcí .....	53
obr. 45	Pohled na navrhovanou konstrukci .....	53
obr. 46	Knihovniční prvek Solid 185 [36] .....	54
obr. 47	Schéma modelované konstrukce lávky .....	54
obr. 48	Schéma umístění lokálního požáru .....	62
obr. 49	Rozměry pohovky [39] .....	62
obr. 50	Modely lokálního požáru [40] .....	63
obr. 51	Schéma zjednodušeného modelu požáru a pozice měřených bodů .....	66
obr. 52	Geometrické veličiny pro výpočet polohového součinitele [41] .....	68
obr. 53	Geometrické veličiny pro výpočet polohového součinitele mezikruží [41] .....	69
obr. 54	Příklad prostorové deformace symetrického profilu [43] .....	74
obr. 55	Typy porušení kompozitních šroubovaných spojů .....	76

---

obr. 56 Nastavení počáteční teploty a výpočetních kroků .....	83
obr. 57 Výpočetní síť modelu .....	83
obr. 58 Zatížení jednotlivých částí konstrukce tepelným tokem .....	83
obr. 59 Rozmístění referenčních bodů po průřezech .....	84
obr. 60 Teplota po průřezu pro Var 2,75 .....	84
obr. 61 Redukce průřezu v čase 300 s pro Var 2,75 .....	87
obr. 62 Celková deformace po průřezu pro Var 2,75 v čase 240 a 300 s .....	89
obr. 63 Celková deformace pro Var 2,75 v čase 240 a 300 s .....	90

## Seznam tabulek

tab. 1 Orientační cena jednotlivých typů vláken [4].....	6
tab. 2 Vlastnosti vybraných vláken [4] .....	14
tab. 3 Mechanické vlastnosti pojiv [17] .....	16
tab. 4 Příklady pigmentů využívaných pro barvení kompozitů [4] .....	18
tab. 5 Rozměry zkušebních vzorků .....	34
tab. 6 Sada 1 za ohybu .....	37
tab. 7 Sada 2 za ohybu .....	39
tab. 8 Sada 3 za ohybu .....	40
tab. 9 Porovnání sad za ohybu .....	41
tab. 10 Modul pružnosti sady 1 .....	42
tab. 11 Modul pružnosti sady 2.....	44
tab. 12 Modul pružnosti sady 3.....	46
tab. 13 Porovnání modulu pružnosti všech sad .....	46
tab. 14 Průřezové charakteristiky použitých profilů .....	55
tab. 15 Materiálové charakteristiky oceli .....	57
tab. 16 Materiálové charakteristiky kompozitu .....	60

## Seznam grafů

graf. 1 Evropská produkce kompozitů se skleněnými vlákny v megatunách [7] .....	4
graf. 2 Závislost napětí na deformaci pro sadu vzorků č.1 .....	38
graf. 3 Závislost napětí na deformaci pro sadu vzorků č.2.....	39
graf. 4 Závislost napětí na deformaci pro sadu vzorků č.3.....	40
graf. 5 Idealizovaný graf ohybové pevnosti v závislosti na teplotě .....	41
graf. 6 Princip průběhu zkušební makra.....	42
graf. 7 Graf modulu pružnosti sady 1 .....	43
graf. 8 Graf modulu pružnosti sady 2 .....	45
graf. 9 Porovnání modulu pružnosti jednotlivých sad a průměr výsledků .....	48
graf. 10 Modul pružnosti oceli .....	58
graf. 11 Tepelná vodivost oceli.....	58
graf. 12 Měrná tepelná kapacita oceli.....	59
graf. 13 Tepelná roztažnost oceli.....	59
graf. 14 Pracovní diagram kompozitu v závislosti na teplotě .....	60
graf. 15 Modul pružnosti E kompozitu.....	61
graf. 16 Graf rychlosti uvolňování tepla hořící pohovky [39] .....	62
graf. 17 Graf výšky plamene během lokálního požáru .....	64
graf. 18 Graf tepelného toku dopadajícího na pásnici I profilu v bodě S0 .....	65
graf. 19 Poloměry jednotlivých válců ve zvolených výškách v průběhu hoření.....	67
graf. 20 Změna faktoru pro bod S1 a jednotlivé válce během požáru.....	68
graf. 21 Tepelný tok na bod S1 z jednotlivých válců s prstenci.....	70
graf. 22 Tepelný tok dopadající na jednotlivé body S1 až S6.....	70
graf. 23 Tepelný tok pro výšku 2,75 m.....	71
graf. 24 Tepelný tok pro výšku 3,0 m.....	71
graf. 25 Tepelný tok pro výšku 3,25 m.....	72
graf. 26 Pokles tepelného toku na bod S0 v závislosti na konstrukční výšce.....	72
graf. 27 Vzpěrnostní součinitele pro válcované profily z FRP kompozitu [47] .....	81

---

graf. 28 Vývoj teploty pro variantu 2,75 .....	85
graf. 29 Vývoj teploty pro variantu 3,0 .....	85
graf. 30 Vývoj teploty pro variantu 3,25 .....	86
graf. 31 Vývoj teploty pro variantu 3,5 .....	86
graf. 32 Redukce momentové únosnosti v průběhu požáru.....	89



## Citovaná literatura

- [1] *Advanced fibre-reinforced polymer (FRP) composites for structural applications*. Oxford: Woodhead Publishing, 2013. ISBN 9780857094186.
- [2] Composite Bows: Weapon of Ancient Nomadic Equestrian Cultures. In: *Legio I Lynx Fulminata* [online]. b.r. [cit. 2018-10-16]. Dostupné z: <https://legioilynx.com/2012/04/19/composite-bows-weapon-of-ancient-nomadic-equestrian-cultures/>
- [3] Mudbricks in Palestine 2011. In: *Wikimedia Commons* [online]. Wikimedia Commons, the free media repository., b.r. [cit. 2018-04-13]. Dostupné z: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/6d/Mudbricks\\_in\\_Palestine\\_2011.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/6d/Mudbricks_in_Palestine_2011.jpg)
- [4] EHRENSTEIN, Gottfried. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [5] GIRGLE, František, David HORÁK, Vojtěch KOSTIHA, Jan PROKEŠ a Petr ŠTĚPÁNEK. Moderní kompozitní materiály jako náhrada klasické výztuže do betonu. *IMaterialy.cz* [online]. 2015 [cit. 2018-10-16]. Dostupné z: [https://imaterialy.dumabyt.cz/rubriky/materialy/moderni-kompozitni-materialy-jako-nahrada-klasicke-vyztuze-do-betonu\\_42548.html](https://imaterialy.dumabyt.cz/rubriky/materialy/moderni-kompozitni-materialy-jako-nahrada-klasicke-vyztuze-do-betonu_42548.html)
- [6] HORKÝ, Josef. Externí uhlíkové výztuže – rekonstrukce bývalé budovy Omnipol. In: *TESAN S.R.O. speciální stavební technologie* [online]. Klíčany, b.r. [cit. 2018-10-16]. Dostupné z: <http://www.tesan.cz/externi-lepene-uhlikove-vyztuze/>
- [7] The 2018 State of the Composites Industry Report. *Composites Manufacturing* [online]. 2018 [cit. 2018-03-05]. Dostupné z: <http://compositesmanufacturingmagazine.com/2018/01/2018-composites-manufacturing-state-of-the-industry-report/>
- [8] PATHAN, Salmankhan, Miss NAWAJ a Aravin PERIYASAMY. High performance synthetic composites; manufacturing, recent developments and applications. *TextileToday* [online]. Dhaka, Bangladesh: Amin & Jahan Corporation Ltd., 2014 [cit. 2018-10-16]. Dostupné z:

- <https://www.textiletoday.com.bd/high-performance-synthetic-composites-manufacturing-recent-developments-and-applications/>
- [9] Composite materials. In: *MSE Club* [online]. Toronto Ontario, Canada, b.r. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <http://mse.skule.ca/img/guide/GuidePic4.png>
- [10] BODNÁROVÁ, Lenka. *Kompozitní materiály ve stavebnictví*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002. ISBN 9788021422667.
- [11] MODELÝ dílna. *Kolman.info* [online]. 2015 [cit. 2018-03-03]. Dostupné z: [http://www.kolmanl.info/?show=SHOW\\_TXT&alias=KUHLIK\\_UV](http://www.kolmanl.info/?show=SHOW_TXT&alias=KUHLIK_UV)
- [12] Cfaser haarrp. In: *Wikimedia Commons* [online]. Wikimedia Commons, the free media repository, 2005 [cit. 2018-03-04]. Dostupné z: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cfaser\\_haarrp.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cfaser_haarrp.jpg)
- [13] *Aramid fiber* [online]. b.r. [cit. 2018-03-03]. Dostupné z: <http://www.aramid.eu/>
- [14] Charakteristika čedičových vláken. *Basaltex a.s.* [online]. b.r. [cit. 2018-03-08]. Dostupné z: [http://www.basaltex.cz/cedic/cedic\\_charakteristika\\_cz.htm#07](http://www.basaltex.cz/cedic/cedic_charakteristika_cz.htm#07)
- [15] Peleshair on antenna.jpg. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2018-04-14]. Dostupné z: [https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Peleshair\\_on\\_antenna.jpg&oldid=193158563](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Peleshair_on_antenna.jpg&oldid=193158563)
- [16] Kompozitní síť ORLITECH® MESH. In: *Orlitech* [online]. Osík u Litomyšle: ORLIMEX CZ, s.r.o., 2018 [cit. 2018-11-14]. Dostupné z: <https://orlitech.cz/site/>
- [17] HARTLOVÁ, Iva. *Reaktoplastické lisovací hmoty*. Zlín, 2015. Dostupné také z: <https://theses.cz/id/tdc38n/>. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická. Vedoucí práce Ing. Simona Mrkvičková, Ph.D.
- [18] RYJÁČEK, Pavel, Kamila CÁBOVÁ, Jan VŮJTĚCH a Ludvík KOLPASKÝ. MVL 725 - Aplikace FRP polymerů pro vybavení železničních mostů: Mostní vzorový list. *Správa železniční dopravní cesty. státní organizace* [online]. 2017, , 16 [cit. 2018-12-03]. Dostupné z: [http://typdok.tudc.cz/typdok/files/MVL\\_725\\_2017\\_02\\_21.pdf](http://typdok.tudc.cz/typdok/files/MVL_725_2017_02_21.pdf)
- [19] JANOVEC, Jiří, Jiří CEJP a Josef STEIDL. *Perspektivní materiály*. Vyd. 3., přeprac. V Praze: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-80-01-04167-3.

- [20] PETROVÁ, Šárka, Petr SOUDEK a Tomáš VANĚK. RETARDANTY HOŘENÍ, JEJICH POUŽITÍ A VLIV NA ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ. *Chemické listy* [online]. Praha: Chemické listy, 2015, **109**(9), 679-686 [cit. 2018-10-16]. ISSN 1213-7103. Dostupné z: [www.chemicke-listy.cz/docs/full/2015\\_09\\_679-686.pdf](http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2015_09_679-686.pdf)
- [21] UV Resistance of FRP Composite Architectural Products: Technical Bulletin. *Industrial Fiberglass Specialties, Inc.* [online]. 2008 [cit. 2018-03-08]. Dostupné z: [www.ifs-frp.com/wp/pdf/technical-bulletins/sun-vs-frp-ifs.pdf](http://www.ifs-frp.com/wp/pdf/technical-bulletins/sun-vs-frp-ifs.pdf)
- [22] Processes. In: *Compositeslab* [online]. 2016 [cit. 2018-03-03]. Dostupné z: <http://compositeslab.com/composites-manufacturing-processes/>
- [23] Technologie výroby. *Prefa kompozity* [online]. © 2011–2015 [cit. 2018-03-03]. Dostupné z: <http://www.prefa-kompozity.cz/technologie-vyroby/liti-do-formy/>
- [24] Pultruze (tažení). In: *Spolek pro technickou podporu a propagaci polymerních kompozitů* [online]. 2018 [cit. 2018-03-03]. Dostupné z: <http://polymer-composites.cz/2017/11/15/pultrusion/>
- [25] Vláknové kompozitní materiály, jejich vlastnosti a výroba. In: *Kompozity.info* [online]. Praha: FS ČVUT v Praze, 2007 [cit. 2018-03-03]. Dostupné z: [www.kompozity.info/seminar/2\\_seminar/1\\_materialy\\_technologie.pdf](http://www.kompozity.info/seminar/2_seminar/1_materialy_technologie.pdf)
- [26] Composites Manufacturing. In: *AeroSpace Engineering* [online]. 2012 [cit. 2018-03-03]. Dostupné z: <http://aerospaceengineeringblog.com/composite-manufacturing/>
- [27] DÖRING, Joachim, Wolfgang STARK, Jarlath MCHUGH, Jürgen BARTUSCH a Petra FENGLER. Rheologische und akustische Bestimmung der Fließ-Härtungseigenschaften von Injektionsharzen. In: *NDT net* [online]. Berlin: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, 2002 [cit. 2018-03-04]. Dostupné z: <http://www.ndt.net/article/dgzfp02/papers/v51/v51.htm>
- [28] Composite Autoclaves. *Melco Steel* [online]. 2012 [cit. 2018-03-04]. Dostupné z: <http://www.melcosteel.com/composite-autoclaves.html>
- [29] Some methods of production of products from composites. In: *Geek magazine* [online]. 2014 [cit. 2018-03-04]. Dostupné z: [https://hsto.org/getpro/geektimes/post\\_images/990/0c9/e93/9900c9e938d4e8a2e29ab73d98e76e67.jpg](https://hsto.org/getpro/geektimes/post_images/990/0c9/e93/9900c9e938d4e8a2e29ab73d98e76e67.jpg)

- [30] Product overview: FRP Chimneys. In: *Plasticon Composites* [online]. Hengelo Netherlands: © Plasticon Composites, b.r. [cit. 2018-11-03]. Dostupné z: <https://www.plasticoncomposites.com/composite-products-overview>
- [31] RIBEIRO, Maria, António FIÚZA, António FERREIRA, Maria DINIS, Ana MEIRA CASTRO, João MEIXEDO a Mário ALVIM. Recycling Approach towards Sustainability Advance of Composite Materials' Industry. *Recycling* [online]. 2016, 1(1), 178-193 [cit. 2018-04-13]. DOI: 10.3390/recycling1010178. ISSN 2313-4321. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/2313-4321/1/1/178>
- [32] Chopped tow. In: *ELG Carbon Fibre Ltd* [online]. Coseley, West Midlands, UK, 2017 [cit. 2018-04-13]. Dostupné z: <http://www.elgcf.com/assets/images/ct-slide1.jpg>
- [33] Milled fibre. In: *ELG Carbon Fibre Ltd* [online]. Coseley, West Midlands, UK, 2017 [cit. 2018-04-13]. Dostupné z: <http://www.elgcf.com/assets/images/mf-slide3-lg.jpg>
- [34] ČSN EN ISO 527-1 *Plasty - Stanovení tahových vlastností - Část 1: Obecné principy*. 2. dopl. vyd. Praha: © Český normalizační institut, 2012.
- [35] ČSN EN ISO 14125 *Vlákný vyztužené plastové kompozity - Stanovení ohybových vlastností*. Změna A1. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [36] 4.185 SOLID185 3-D Structural Solid. In: *SW ANSYS Academic Teaching na STU Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave* [online]. Bratislava: STU Bratislava, b.r. [cit. 2018-12-28]. Dostupné z: [http://www.ansys.stuba.sk/html/elem\\_55/graphics/ES4-144.gif](http://www.ansys.stuba.sk/html/elem_55/graphics/ES4-144.gif)
- [37] ČSN EN 1993-1-2: *Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-2: Obecná pravidla - Navrhování konstrukcí na účinky požáru*. Z1 3.10t, Oprava 1 3.10t. Praha: © Český normalizační institut, 2006.
- [38] PROKEŠ, Jan. DIMENZOVÁNÍ KOMPOZITNÍCH PROFILŮ PREFEN. In: *Prefa Kompozity a.s.* [online]. Brno: Prefa Kompozity a.s., 2018 [cit. 2018-11-22]. Dostupné z: <http://www.prefa-kompozity.cz/wp-content/uploads/2015/09/katalog-dimenzovani-profilu-cs.pdf>
- [39] WALD, František, Marek POKORNÝ, Kamila HOROVÁ, Petr HEJTMÁNEK, Hana NAJMANOVÁ, Martin BENÝŠEK, Marta KUREJKOVÁ a Ivo SCHWARZ.

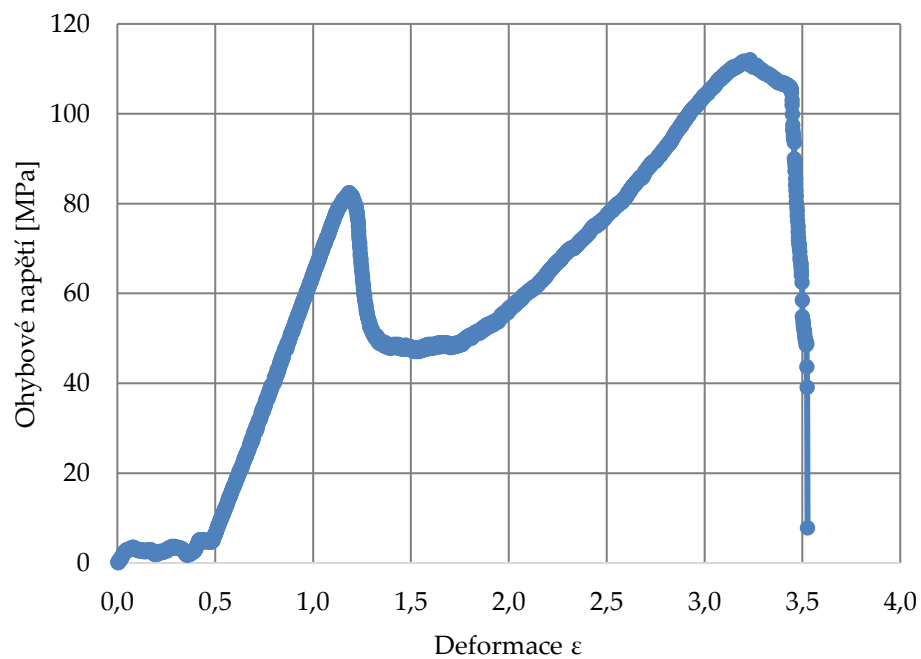
- Modelování dynamiky požáru v budovách*. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2017. ISBN 978-80-01-05633-2.
- [40] BENKORICHI, Salah. Fire Models: Localised Fires. In: *Salah Benkorichi Fire safety engineering* [online]. b.r. [cit. 2018-10-22]. Dostupné z: <https://www.sbenkorichi.com/fire-models/>
- [41] FRANCIS, Phil, Nancy BADDOO, Francois HANUS, Christophe THAUVOYE, Kamila CÁBOVÁ, Nikola LIŠKOVÁ, Zdeněk SOKOL a František WALD. *Návrh sloupu vystaveného lokálnímu požáru*. 1. vyd. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2018. ISBN 978-80-01-06475-7.
- [42] 73 0035. ČSN EN 1991-1-1: Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-1: Obecná zatížení - Objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení pozemních staveb. 1. vyd. Praha: © Český normalizační institut, 2004.
- [43] BALÁZS, Ivan. *Klopení tenkostěnných ocelových nosníků s vazbami vybočení z roviny ohybu*. Brno, 2017. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav kovových a dřevěných konstrukcí. Vedoucí práce Prof. Ing. Jindřich Melcher, DrSc.
- [44] ČSN EN 1993-1-1: Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby. Z1 3.10t. Praha: © Český normalizační institut, 2006.
- [45] TIMOSHENKO, Stephen a James GERE. *Theory of elastic stability*. 2nd ed., Dover ed. Mineola, N.Y.: Dover Publications, 2009. ISBN isbn9780486472072.
- [46] VLASOV, Vasilij. *Tenkostěnné pružné pruty*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1962.
- [47] NGUYEN, T.T., T.M. CHAN a J.T. MOTTRAM. *Composites Part B: Engineering: Lateral-torsional buckling resistance by testing for pultruded FRP beams under different loading and displacement boundary conditions* [online]. Oxon: Elsevier, 2014 [cit. 2018-12-28]. ISSN 1359-8368. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836813007555>
- [48] ASCIONE, L., A. GIORDANO a S. SPADEA. *Composites Part B: Engineering: Lateral buckling of pultruded FRP beams* [online]. Oxon: Elsevier, 2011 [cit. 2018-11-23]. ISSN 1359-8368. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836811000436>

- [49] SOKOL, Zdeněk a František WALD. *Ocelové konstrukce: tabulky*. 2., přeprac. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2010. ISBN 9788001046555.
- [50] WALD, František. *Výpočet požární odolnosti stavebních konstrukcí*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 8001031578.

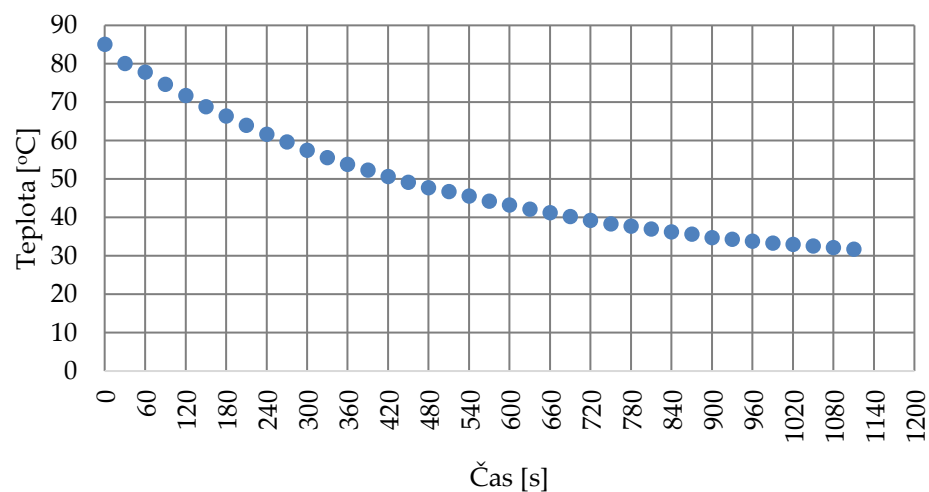
## 6 Přílohová část

### 6.1 Grafy pro sadu vzorků č.1

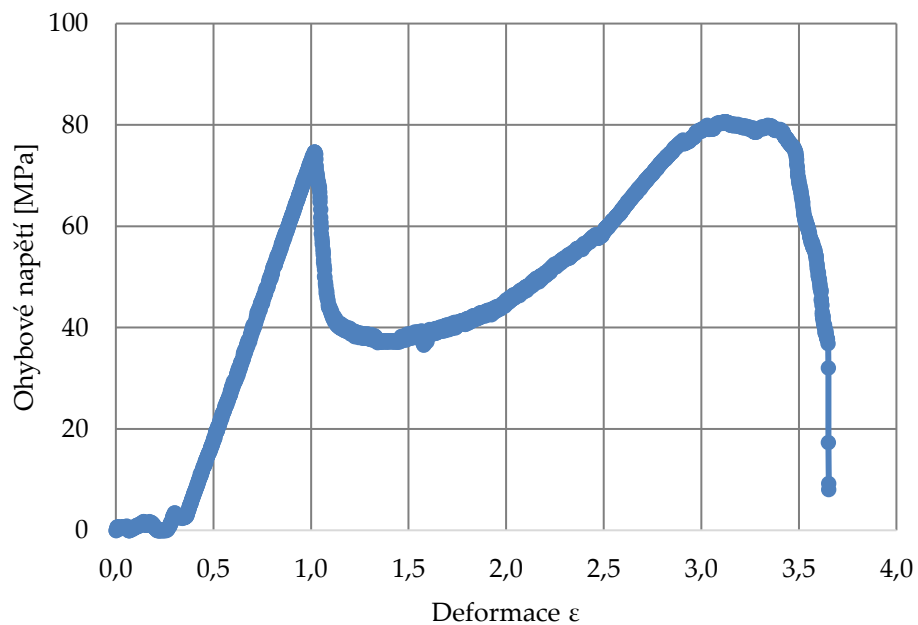
Graf deformace - napětí  
Vzorek 4



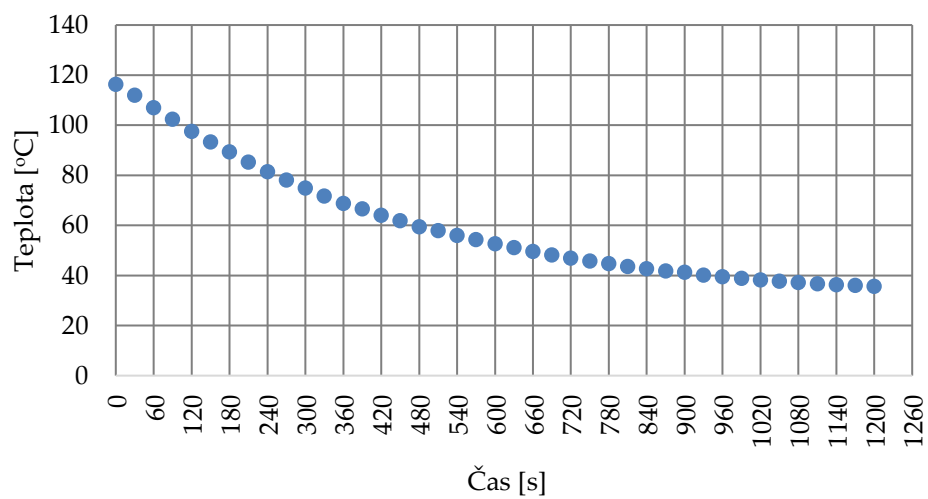
Teplota tělesa při zkoušce - Vzorek 4



Graf deformace - napětí  
Vzorek 5

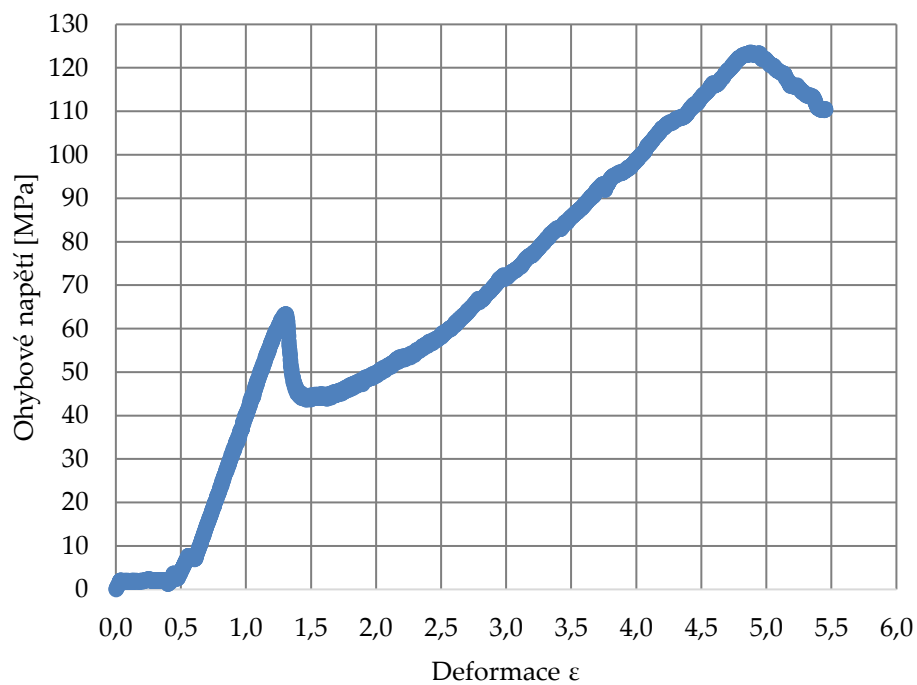


Teplota tělesa při zkoušce - Vzorek 5

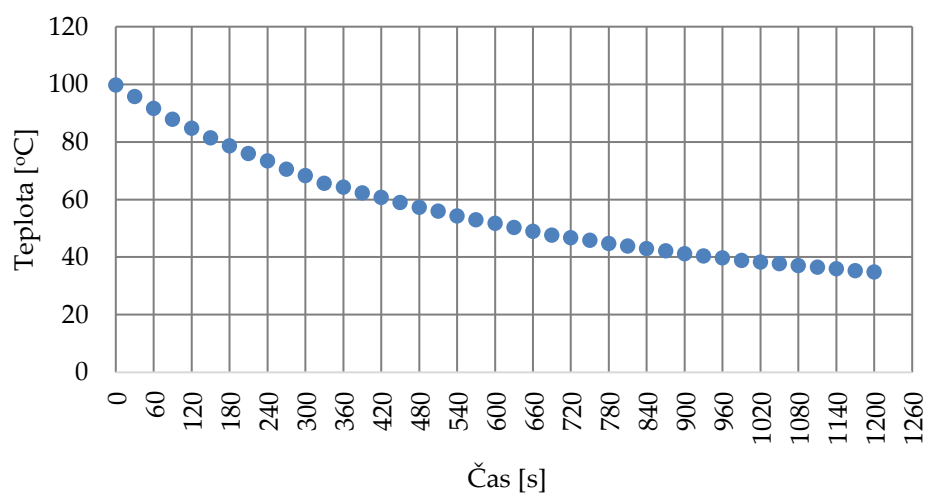


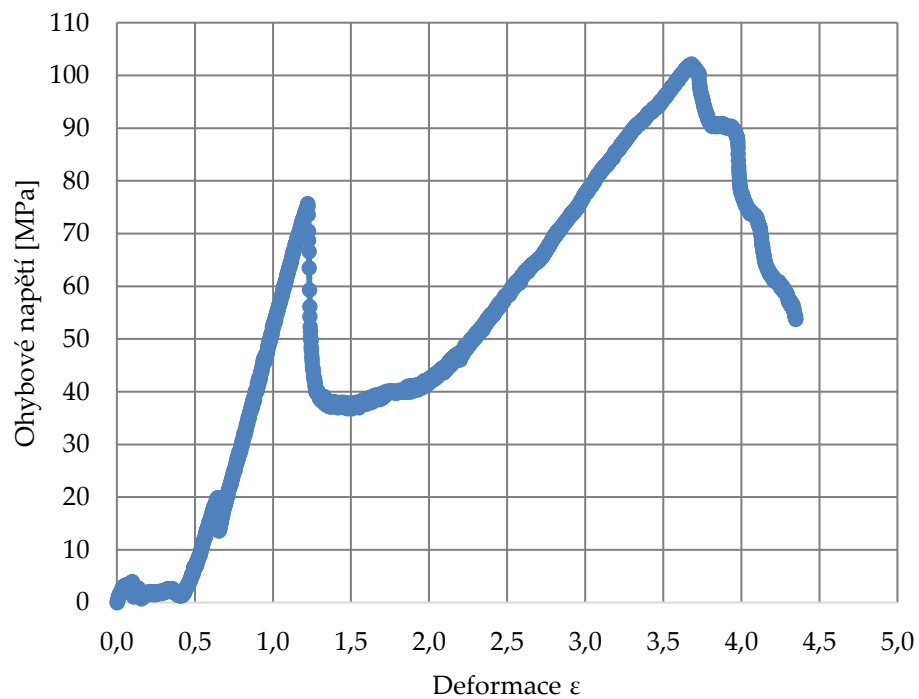


Graf deformace - napětí  
Vzorek 6

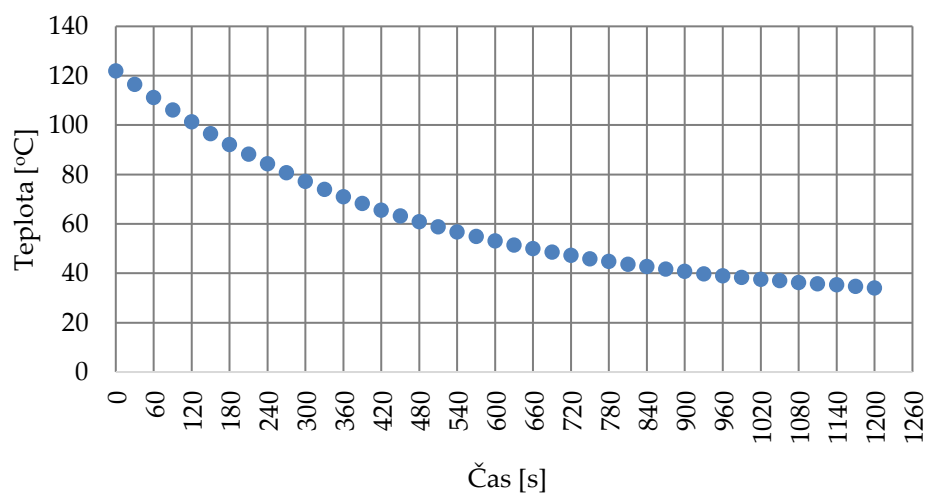


Teplota tělesa při zkoušce - Vzorek 6

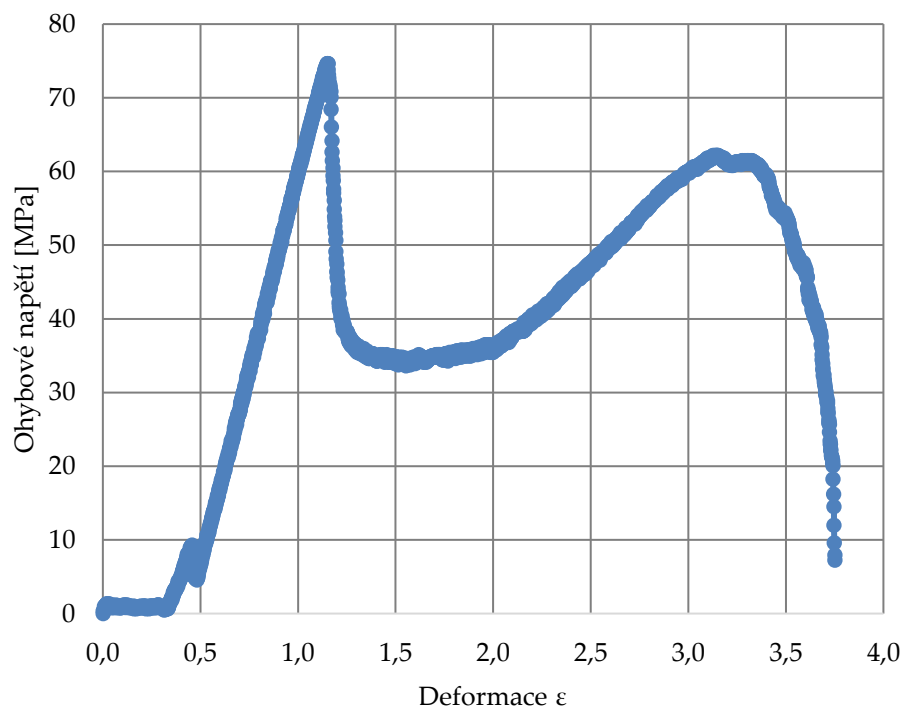


Graf deformace - napětí  
Vzorek 7

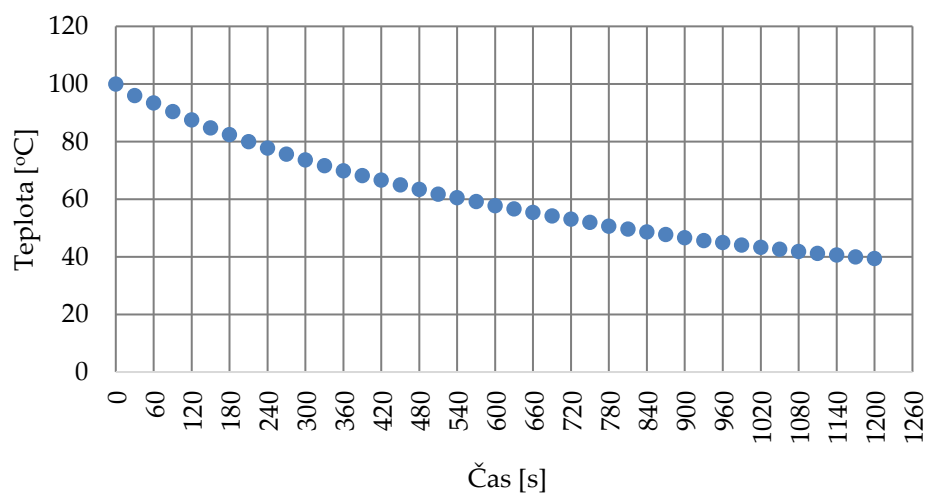
Teplota tělesa při zkoušce - Vzorek 7



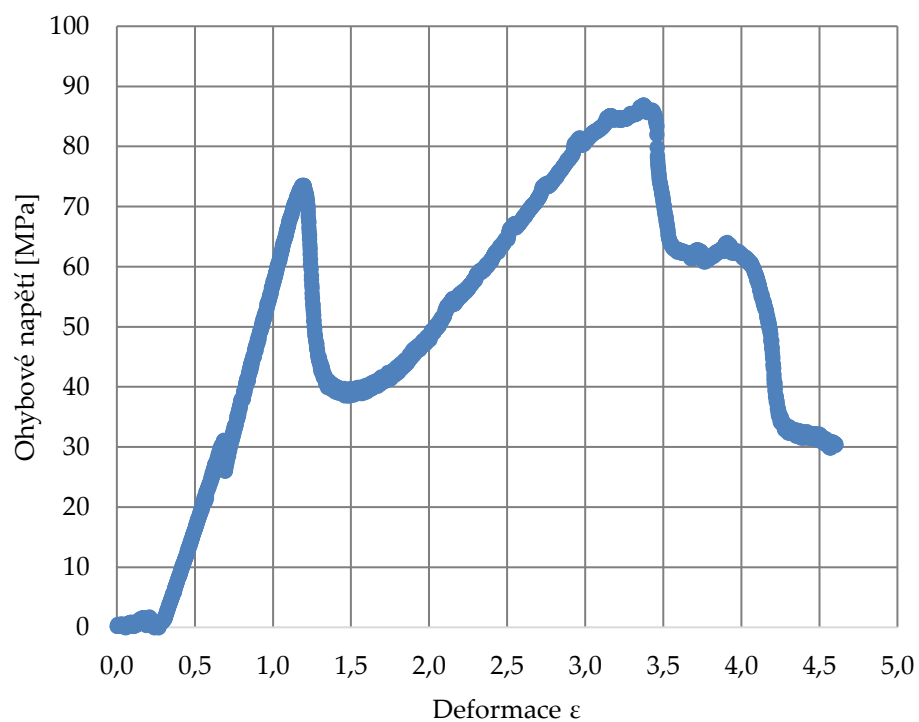
Graf deformace - napětí  
Vzorek 8



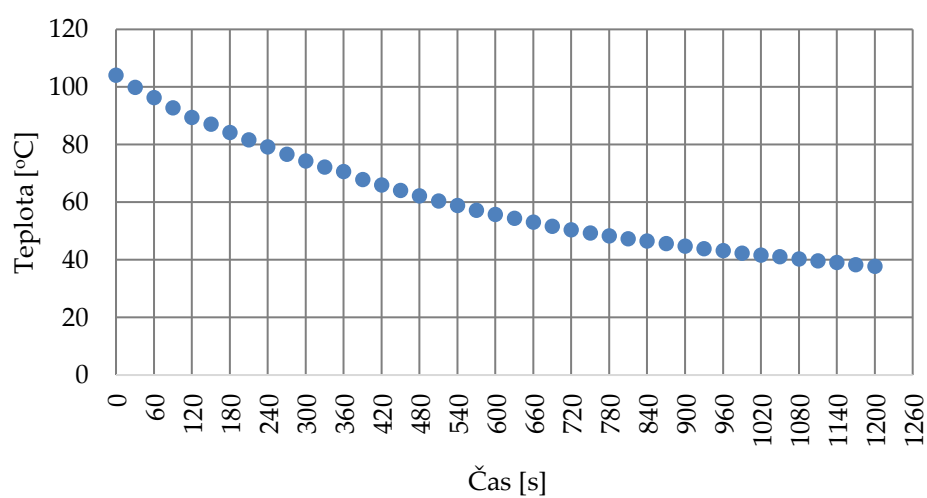
Teplota tělesa při zkoušce - Vzorek 8



Graf deformace - napětí  
Vzorek 10

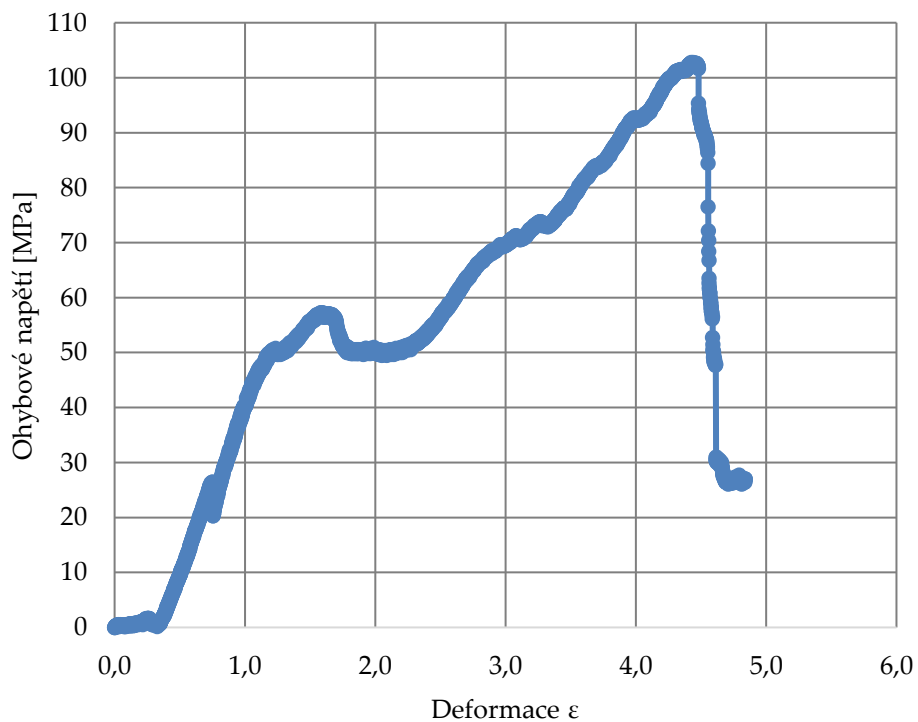


Teplota tělesa při zkoušce - Vzorek 10

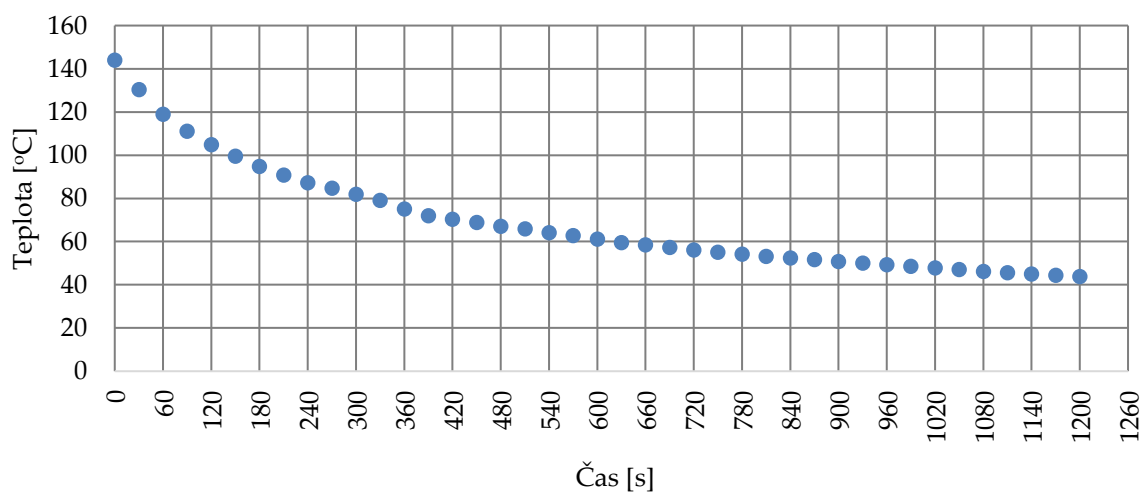


## 6.2 Grafy pro sadu vzorků č.2

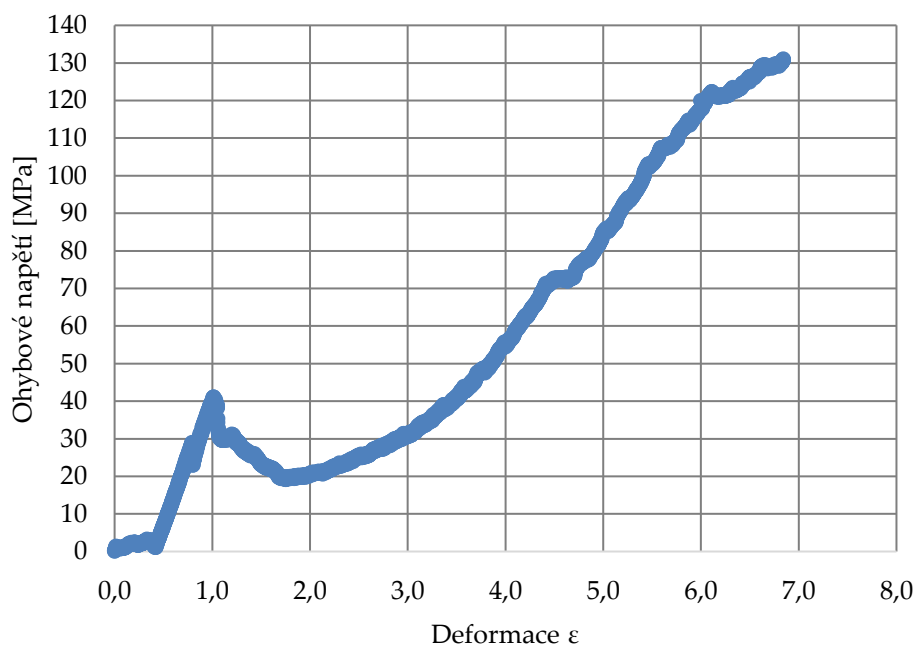
Graf deformace - napětí  
Vzorek 11



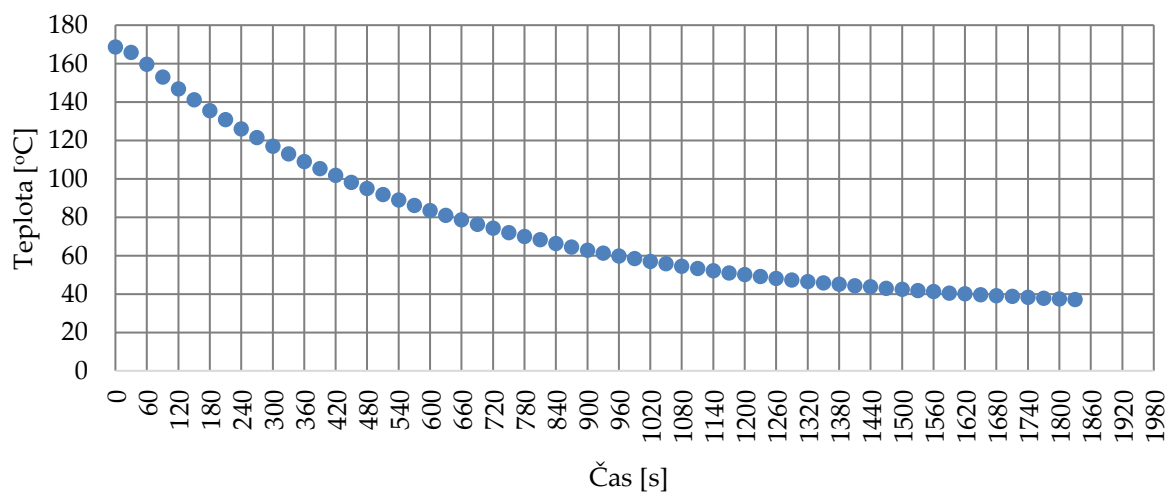
Teplota tělesa při zkoušce - Vzorek 11



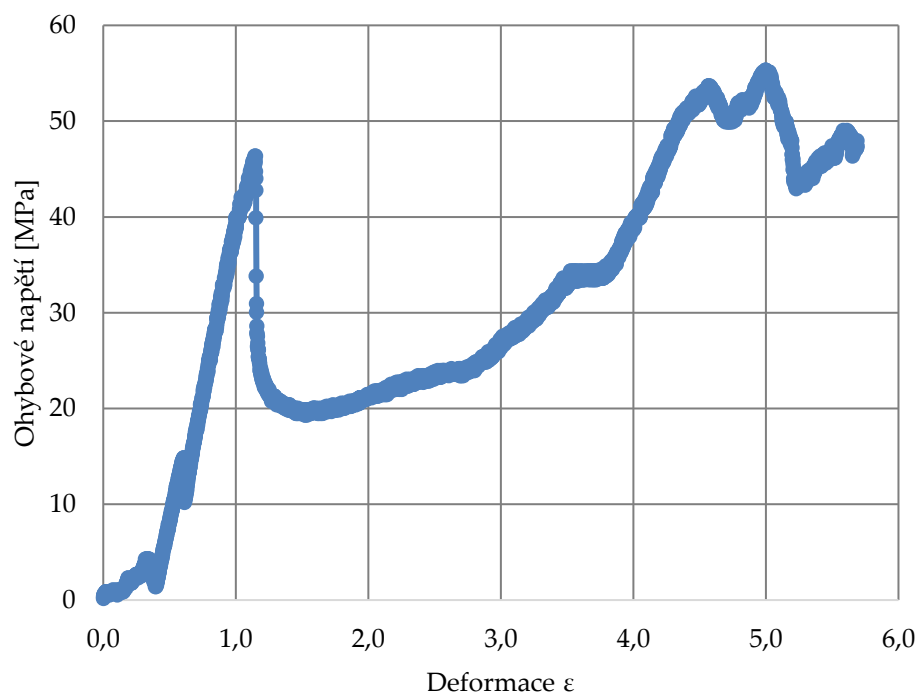
Graf deformace - napětí  
Vzorek 13



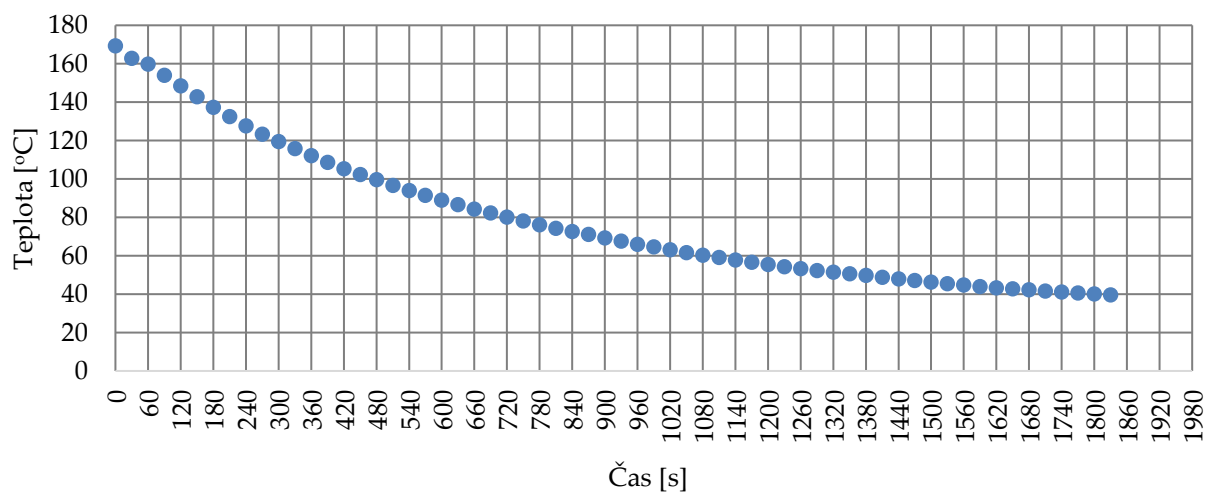
Teplota tělesa při zkoušce - Vzorek 13



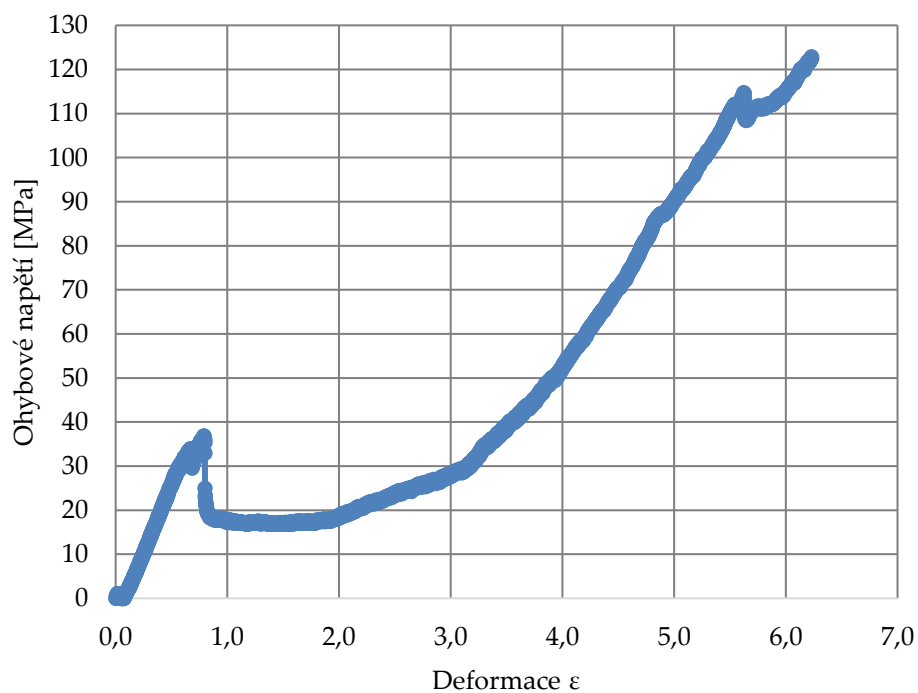
Graf deformace - napětí  
Vzorek 14



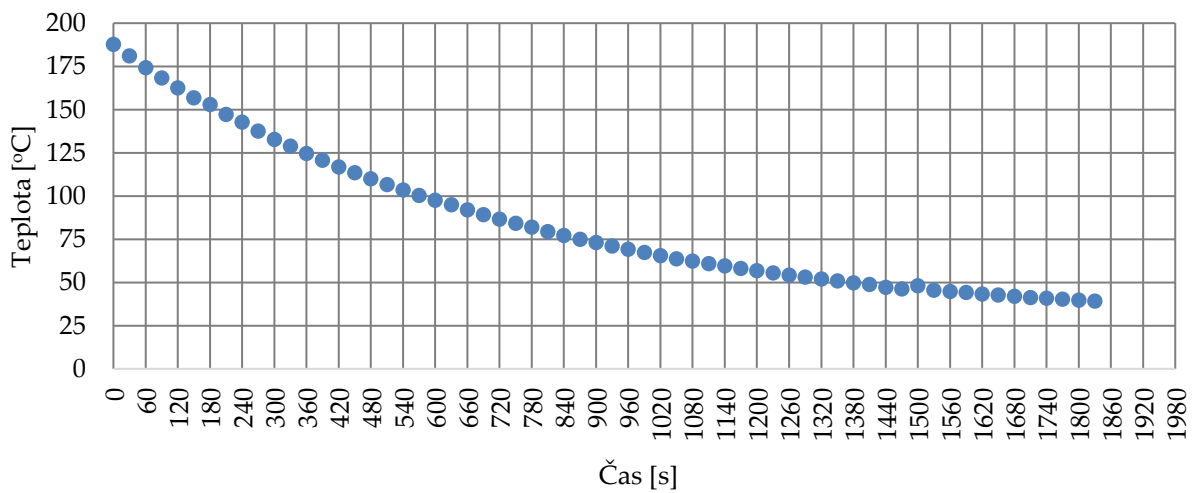
Teplota tělesa při zkoušce - Vzorek 14



Graf deformace - napětí  
Vzorek 15

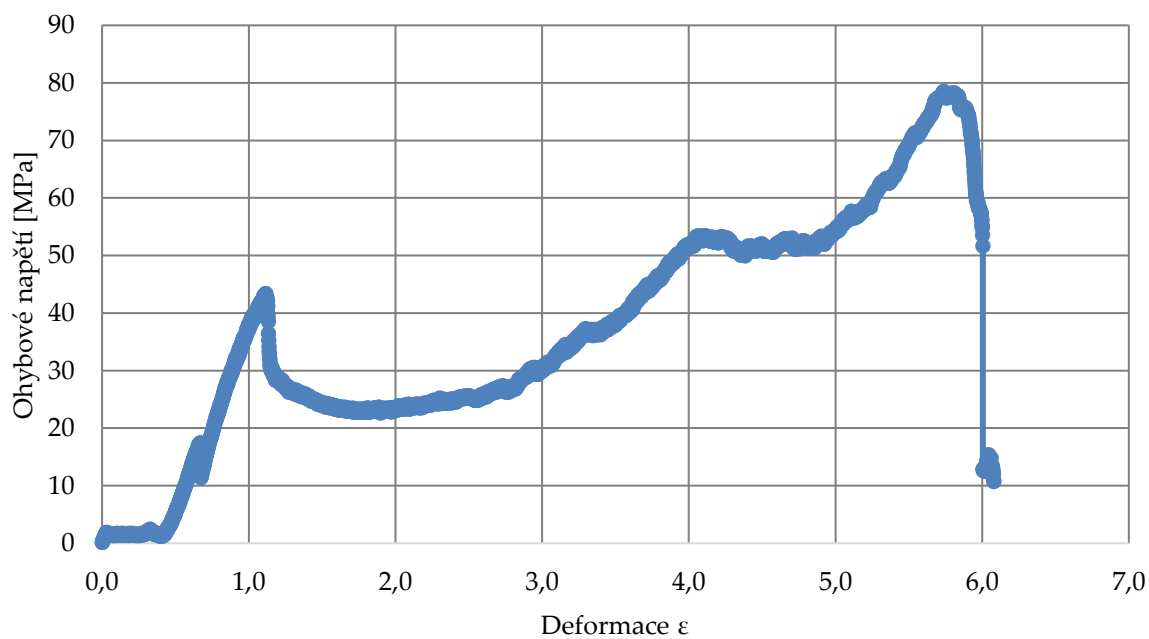


Teplota tělesa při zkoušce - Vzorek 15

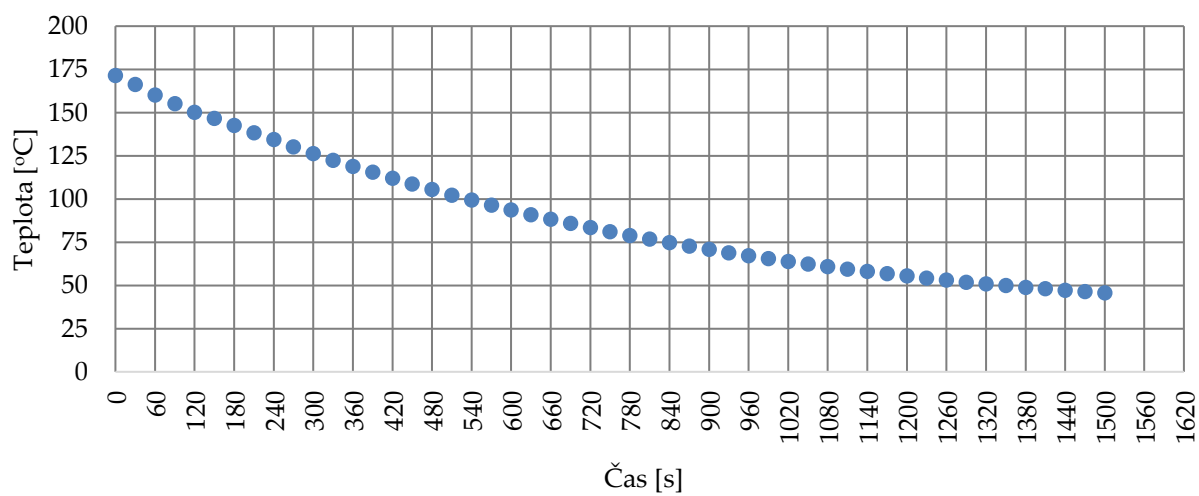




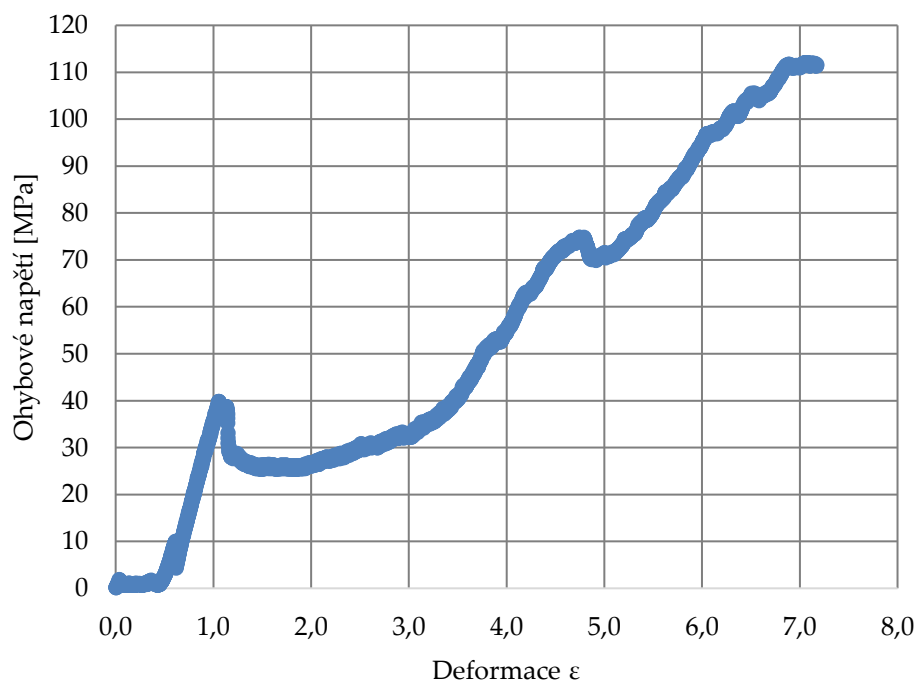
Graf deformace - napětí  
Vzorek 16



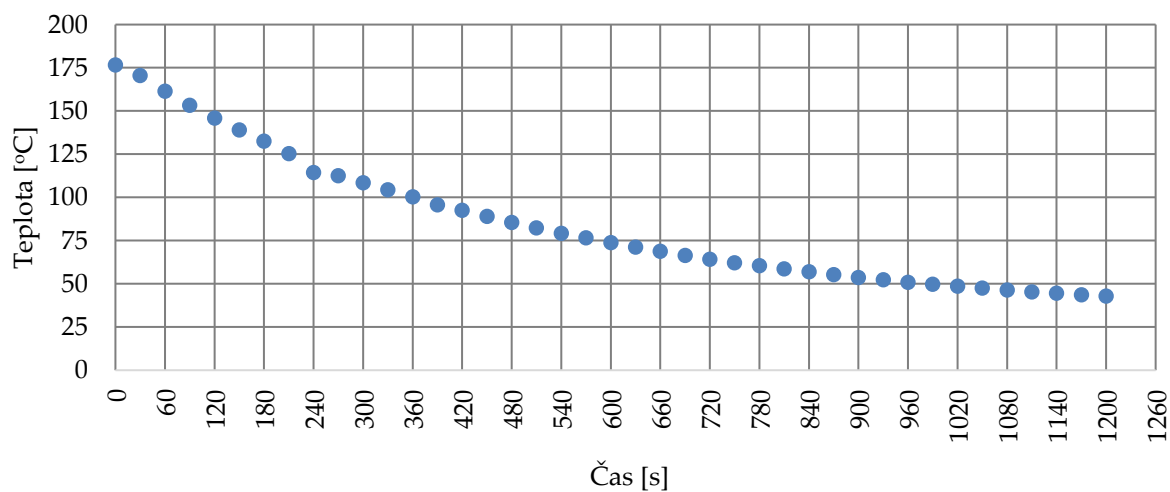
Teplota tělesa při zkoušce - Vzorek 16



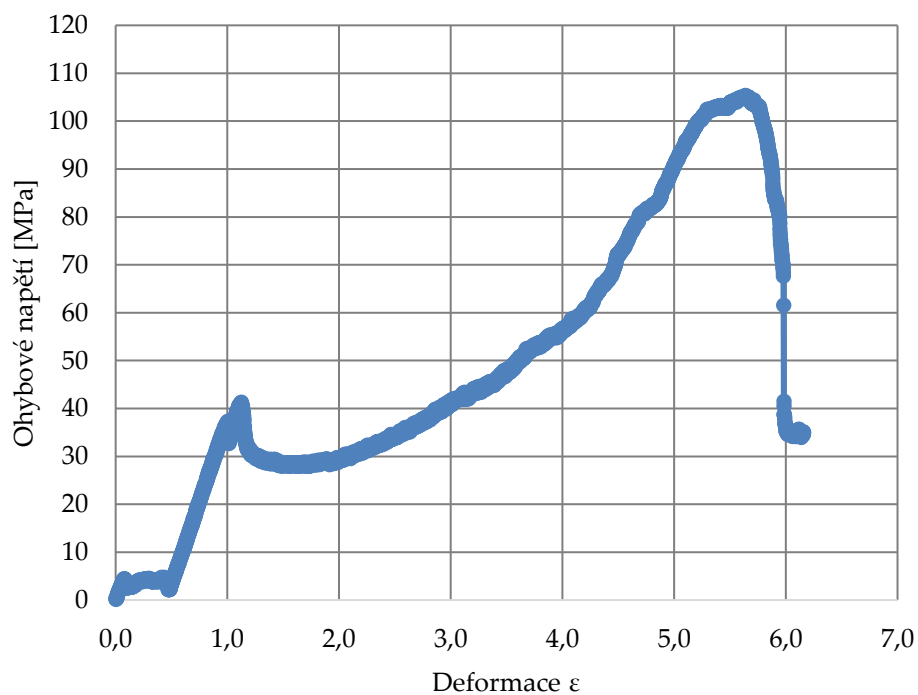
Graf deformace - napětí  
Vzorek 17



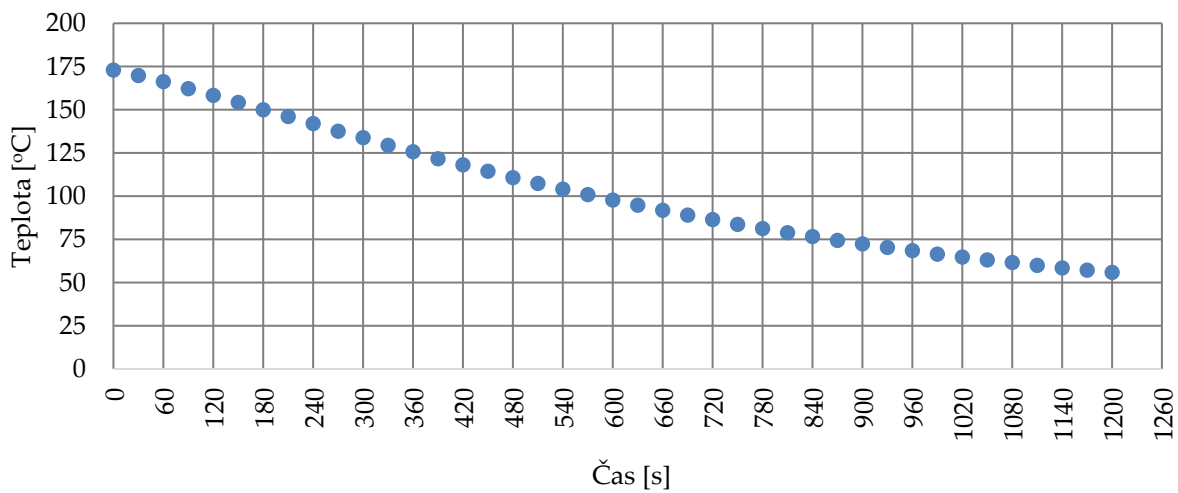
Teplota tělesa při zkoušce - Vzorek 17



Graf deformace - napětí  
Vzorek 18

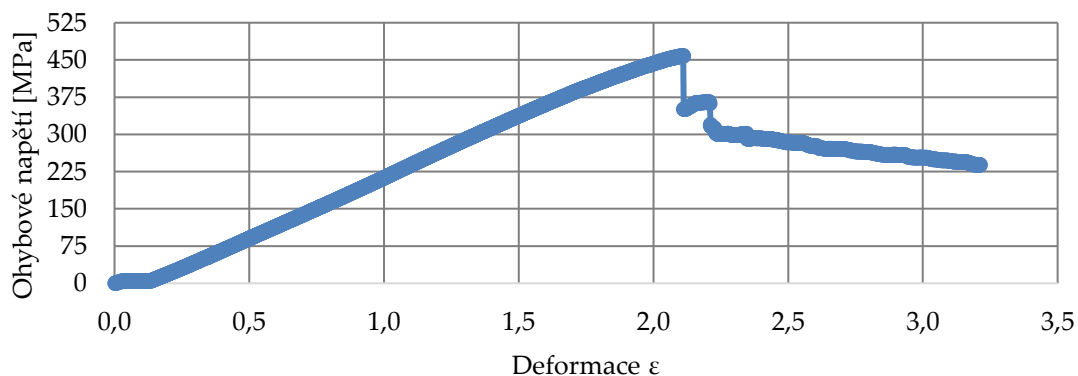


Teplota tělesa při zkoušce - Vzorek 18

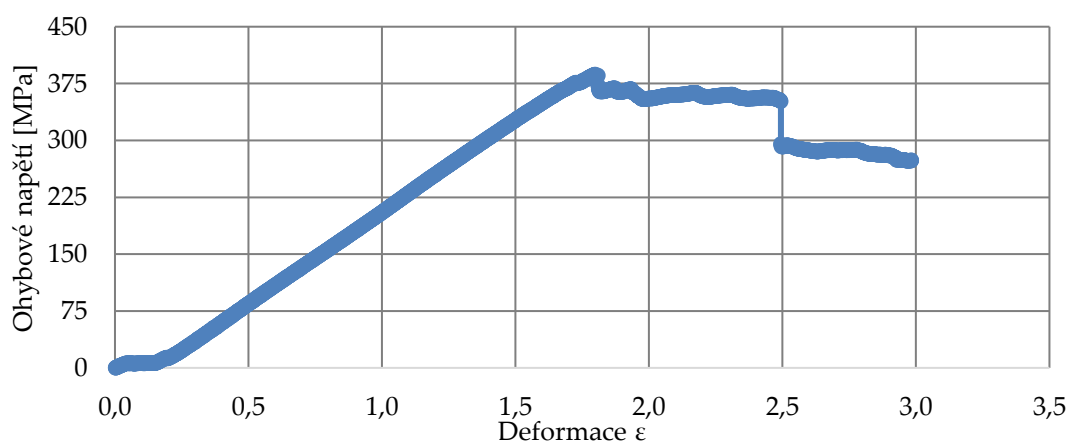


### 6.3 Grafy pro sadu vzorků č.3

Graf deformace - napětí  
Vzorek 1



Graf deformace - napětí  
Vzorek 2



Graf deformace - napětí  
Vzorek 3

