

# **Stanovení mechanických vlastností vybraných elastomerů**

Luboš Machač

---

Bakalářská Práce  
2018



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická  
Ústav výrobního inženýrství  
akademický rok: 2017/2018

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Luboš Machač**  
Osobní číslo: **T15618**  
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Technologická zařízení**  
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Stanovení mechanických vlastností vybraných elastomerů**

Zásady pro vypracování:

1. literární přehled
2. příprava experimentu
3. experiment
4. vyhodnocení výsledků

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

**Dle doporučení vedoucího bakalářské práce**

Vedoucí bakalářské práce:

**doc. Ing. Jakub Javořík, Ph.D.**

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

**2. ledna 2018**

Termín odevzdání bakalářské práce:

**18. května 2018**

Ve Zlíně dne 5. dubna 2018



doc. Ing. František Buňka, Ph.D.  
*děkan*



prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.  
*ředitel ústavu*

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby <sup>1)</sup>;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 <sup>2)</sup>;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 18.5.2018

*Machač Luboš*

<sup>1)</sup> zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

<sup>2)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

---

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě díla vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

<sup>3)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybného projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užit či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlídně k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

## **ABSTRAKT**

Cílem práce bylo odzkoušet 6 různých elastomerů a určit jejich mechanické vlastnosti. Zkoušené materiály se využívají k výrobě pneumatik.

Elastomery byly testovány na jednoosý tah při různých teplotách, čistý smyk a dvouosou napjatost.

Výsledné hodnoty byly zaneseny do tabulek a znázorněny v grafech. Pro jednoosý tah byly zpracovány grafy závislosti napětí na teplotě. Pro čistý smyk a dvouosou napjatost byly zpracovány grafy závislosti napětí na poměrném prodloužení.

Klíčová slova: Mechanické zkoušky, elastomer, jednoosý tah, čistý smyk, dvouosá napjatost, hyperelastická

## **ABSTRACT**

The aim of the work was to test 6 different elastomers and to determine their mechanical properties. The tested materials are used for the production of tires.

The elastomers were tested for uniaxial tension at different temperatures, pure shear and equibiaxial tension.

The results were listed in the tables and shown in the graphs. For uniaxial tension, stress-vs-temperature graphs were processed. For pure shear and equibiaxial tension, stress/strain were processed.

Keywords: Mechanical tests, elastomer, uniaxial tension, equibiaxial tension, pure shear, hyperelasticity

Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Jakobovi Javoříkovi, Ph.D. za příkladné vedení práce, trpělivost a cenné odborné rady, které mi poskytoval. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Františkovi Vavříkovi za vstřícnou pomoc při vysekávání a přípravě zkušebních tělísek.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

# OBSAH

<b>ÚVOD.....</b>	<b>10</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST.....</b>	<b>11</b>
<b>1 VLASTNOSTI ELASTOMERŮ.....</b>	<b>12</b>
1.1 DRUHY KAUKUKŮ .....	13
1.1.1 Přírodní kaučuk (NR).....	13
1.1.2 Syntetické kaučuky pro všeobecné použití .....	13
Butadien-styrenový kaučuk (SBR).....	13
Isoprenový kaučuk (IR) .....	13
Butadienový kaučuk (BR) .....	13
1.1.3 Speciální syntetické kaučuky .....	14
Chloroprenový kaučuk (CR).....	14
Butadien-akrylonitrilový kaučuk (NBR) .....	14
Butylkaučuk (IIR).....	14
Ethylen-propylenové kaučuky (EPM a EPDM) .....	14
<b>2 DRUHY HYPERELASTICKÝCH MODELŮ.....</b>	<b>15</b>
2.1 PŘEHLED HYPERELASTICKÝCH MODELŮ.....	15
2.1.1 Neo-Hookean .....	15
2.1.2 Arruda-Boyce.....	16
2.1.3 Polynomická funkce.....	16
2.1.4 Mooney-Rivlin .....	16
2.1.5 Ogden .....	18
2.1.6 Yeoh .....	18
2.1.7 Gent.....	19
<b>3 MECHANICKÉ VLASTNOSTI HYPERELASTICKÝCH MATERIÁLŮ .....</b>	<b>20</b>
3.1 OBECNÁ TEORIE VELKÝCH ELASTICKÝCH DEFORMACÍ .....	20
3.2 JEDNOOSÁ NAPJATOST.....	21
3.3 DVOUOSÁ NAPJATOST .....	23
3.4 ČISTÝ SMYK .....	23
<b>4 MECHANICKÉ ZKOUŠKY.....</b>	<b>25</b>
4.1 TAHOVÁ ZKOUŠKA .....	25
4.2 ZKOUŠKA DVOUOSÉ NAPJATOSTI .....	26
4.3 ZKOUŠKA ČISTÝM SMYKEM.....	27
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>28</b>
<b>5 CÍL PRÁCE .....</b>	<b>29</b>
5.1 ZKOUŠENÝ MATERIÁL.....	29
5.2 TAHOVÁ ZKOUŠKA .....	29
5.2.1 POSTUP MĚŘENÍ.....	29
5.2.2 ZKUŠEBNÍ TĚLÍSKA .....	30
5.2.3 PODMÍNKY MĚŘENÍ.....	30
5.2.4 ZKUŠEBNÍ ZAŘÍZENÍ.....	31



5.2.5	ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ .....	31
5.3	ČISTÝ SMYK .....	31
5.3.1	POSTUP MĚŘENÍ.....	31
5.3.2	ZKUŠEBNÍ TĚLÍSKA .....	32
5.3.3	PODMÍNKY MĚŘENÍ.....	32
5.3.4	ZKUŠEBNÍ ZAŘÍZENÍ.....	32
5.3.5	ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ .....	33
5.4	ZKOUŠKA DVOUOSÉ NAPJATOSTI .....	33
5.4.1	POSTUP MĚŘENÍ.....	33
5.4.2	ZKUŠEBNÍ TĚLÍSKA .....	33
5.4.3	PODMÍNKY MĚŘENÍ.....	34
5.4.4	ZKUŠEBNÍ ZAŘÍZENÍ.....	34
5.4.5	ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ .....	35
<b>6</b>	<b>VÝSLEDKY MĚŘENÍ .....</b>	<b>36</b>
6.1	MATERIÁL R1 .....	36
6.1.1	TAH.....	36
6.1.2	ČISTÝ SMYK.....	40
6.1.3	DVOUOSÁ NAPJATOST.....	41
6.2	MATERIÁL R2 .....	41
6.2.1	TAH.....	41
6.2.2	ČISTÝ SMYK.....	46
6.2.3	DVOUOSÁ NAPJATOST .....	46
6.3	MATERIÁL R3.....	47
6.3.1	TAH.....	47
6.3.2	ČISTÝ SMYK.....	51
6.3.3	DVOUOSÁ NAPJATOST .....	52
6.4	MATERIÁL R4.....	52
6.4.1	TAH.....	52
6.4.2	ČISTÝ SMYK.....	57
6.4.3	DVOUOSÁ NAPJATOST .....	57
6.5	MATERIÁL R5 .....	58
6.5.1	TAH.....	58
6.5.2	ČISTÝ SMYK.....	62
6.5.3	DVOUOSÁ NAPJATOST .....	63
6.6	MATERIÁL R6.....	63
6.6.1	TAH.....	63
6.6.2	ČISTÝ SMYK.....	68
6.6.3	DVOUOSÁ NAPJATOST .....	68
6.7	SROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT U VŠECH MATERIÁLŮ .....	69
	<b>DISKUZE VÝSLEDKŮ .....</b>	<b>70</b>
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>72</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>73</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>74</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>75</b>

<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>78</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>80</b>

## ÚVOD

Elastomery, označované též jako hyperelastické materiály, se využívaly už před více jak dvanácti tisíci lety. Tehdy se však používaly pouze elastomery přírodní. Od konce 19. století se však k elastomerům přírodním přidali i syntetické. Díky tomu to objevu se otevřely pro chemiky a konstruktéry nové oblasti využití.

Elastomer můžeme za běžných podmínek malou silou značně deformovat bez porušení, přičemž deformace je většinou vratná. Elastomerní materiály můžeme vyrábět buď z přírodního, nebo syntetického kaučuku. Přírodní kaučuk se získává z kaučukovitých rostlin. Syntetické kaučuky se v přírodě nevyskytují. Získáváme je chemickou syntézou, odtud pramení název syntetické kaučuky.

Největší podmnožinou elastomerů jsou kaučuky, z nichž se vyrábí pryž. Dříve se slovo pryž používalo pro materiál získaný z kaučukovitých rostlin nazývaný latex. V dnešní době se však toto označení používá pro veškeré materiály nesoucí vlastnosti stejné, jako má přírodní kaučuk.

Elastomery jsou v dnešní době významným konstrukčním materiálem. Setkáváme se s nimi snad v každém výrobním oboru, přístroji a zařízení. Jejich význam spočívá hlavně v tom, že se mohou stát ve stroji rozhodující z hlediska jeho životnosti a spolehlivosti.

Pro zhodnocení vhodného elastomeru je potřeba měřit mechanické vlastnosti. Mechanické vlastnosti elastomerů jsou značně odlišné od materiálů, pro které platí Hookeův zákon. Pro stanovení mechanických vlastností se využívá speciálních vyhodnocovacích metod.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 VLASTNOSTI ELASTOMERŮ

Kaučukovitý (hyperelastický) stav je formulován jako vlastnost hmoty deformovat se působením relativně malých vnějších sil v takovém rozsahu (100 a více %), jaký ostatní materiály nedovolují. Jakmile přestane působit síla, která tuto deformaci způsobila, materiál se velmi rychle vrací téměř do původního stavu. Tyto materiály, které se vyznačují výše uvedeným chováním v širokém rozsahu teplot, jsou označovány jako elastomery. Plasty sem nepatří, protože mají kaučukovitý stav jen při vyšších teplotách a v celkem úzkém rozsahu teplot při přechodu z tuhého do plastického stavu. Jako kaučuky se zpravidla stanovují ty elastomery, které lze síťovat (vulkanizovat) pomocí vulkanizačních činidel. Existují ovšem i termoplastické elastomery, které nepotřebují vulkanizaci. Propojení makromolekul se zde docílí fyzikálními vazbami.

Hlavní znaky hyperelastivity jsou:

- Elastické (vratné) deformace jsou mnohonásobně vyšší než u ideálně elastických látek. Tažnost má hodnotu několika set procent původní délky.
- Závislost napětí na deformaci máme silně nelineární. Tvar této závislosti se vyznačuje charakteristickým esovitým průběhem.
- Deformace materiálu probíhá již vlivem malých sil.
- Objemová tuhost hyperplastických materiálů je dosti vysoká. Má hodnotu až několik tisíce MPa. [1]

## 1.1 Druhy kaučuků

### 1.1.1 Přírodní kaučuk (NR)

Přírodní kaučuk je přirozeně se vyskytující produkt. Je obsažen v rostlinách v podobě mléčně zbarvené mízy nazývané se latex. Pro gumárenský průmysl se využívá latex ze stromu *Hevea Brasiliensis*. Nejprve se latex ze stromu získá čepováním. Dále se musí koagulovat pomocí kyseliny mravenčí, nebo kyseliny octové a vznikne tzv. *latexový koagulát*. Ten můžeme zpracovat různým způsobem. Nejčastěji se koagulát pošle mezi dva válce a vznikne nám folie o tloušťce přibližně 2 až 3 cm, poté je sušen horkým vzduchem. Přírodní kaučuk má vysokou mechanickou pevnost, vysokou elasticitu a velmi dobrou odolnost proti oděru. Používá se na pružiny, pneumatiky a vibrační uložení. [6]

### 1.1.2 Syntetické kaučuky pro všeobecné použití

#### ***Butadien-styrenový kaučuk (SBR)***

Butadien-styrenový kaučuk je kopolymer styrenu a butadienu. Jde o nejpoužívanější a nejdůležitější syntetický kaučuk na celém světě. Vyrábí se z ropy. SBR má lepší tepelnou odolnost než přírodní kaučuk, ale horší elastické vlastnosti. Nejvíce se využívá při výrobě pneumatik. [4,2]

#### ***Isoprenový kaučuk (IR)***

Isoprenový kaučuk se vyrábí aniontově nebo Ziegler-Nattovou polymerací. Je to ekvivalent přírodního kaučuku. Tento kaučuk má stabilnější zpracovatelské vlastnosti, lepší rychlost vulkanizace a méně zapáchá jako přírodní kaučuk. Zároveň odpadá potřeba plastikace před zpracováním. Využívá se tam, kde jsou zvýšené nároky na zpracovatelnost směsi a ve zdravotnickém průmyslu. [5,6]

#### ***Butadienový kaučuk (BR)***

Butadienový kaučuk je vyroben z butadienu. BR je vyráběno jak v emulzi, tak i v roztoku. Jsou využívány ve směsích s NR a SBR, kde zvyšují odolnost proti oděru, zvyšují odolnost při nízkých teplotách a elasticitu. BR má nejlepší odolnost proti oxidaci ze všech dienových kaučuků. Nejčastěji jsou používány při výrobě pneumatik. [6]

### 1.1.3 Speciální syntetické kaučuky

#### ***Chloroprenový kaučuk (CR)***

Chloroprenový kaučuk získáváme pomocí emulzní polymerace. Prodává se pod názvem *NEOPRENE*. Tento kaučuk má zvýšenou odolnost proti olejům, vynikající houževnatost a zvýšenou odolnost proti hoření. Je to vlastně první komerční syntetický kaučuk. Využívá se pro výrobu lepidel. [6,2]

#### ***Butadien-akrylonitrilový kaučuk (NBR)***

NBR je kopolymer butadienu a akrylonitrilu, který se získává emulzní polymerací. Jeho cena je nejnižší ze všech elastomerů. Vyznačuje se vysokou odolností proti teplu a olejům. Nejvíce se využívá na hadice, nádrže a olejovzdorné dopravní pásy. [6]

#### ***Butylkaučuk (IIR)***

Butylkaučuk je kopolymer isobutylenu s malým podílem isoprenu. Připravuje se kationtovou polymerací za nízkých teplot. Existují také bromované a chlorované butylkaučuky. Tento kaučuk je velmi odolný proti stárnutí a má dobrou nepropustnost proti plynům. Díky tomu je široce využíván k výrobě trubek a na pláště pneumatik. [5]

#### ***Ethylen-propylenové kaučuky (EPM a EPDM)***

Jedná se o kopolymer etylenu a propylenu. Získávají se roztokovou polymerací. Jejich výhodou je odolnost proti vodě, ozonu a povětrnostním podmínkám. Jejich využití je na střešní folie, těsnění pro okna a automobilovém průmyslu. Díky vysokému elektrickému odporu se využívají na obaly kabelů. [6]

## 2 DRUHY HYPERELASTICKÝCH MODELŮ

Hyperelastické modely jsou závislé na definici vztahu pro potenciál deformační práce  $W$ . Jedna skupina hyperelastických modelů je založena na mikromechanických modelech vnitřní struktury elastomerů (např. Neo-Hookean, Arruda-Boyce). U těchto modelů mají materiálové konstanty jednoznačný fyzikální význam. Druhá skupina hyperplastických modelů byla sestrojena na základě pozorování deformačně napěťového chování elastomerů na makroskopické úrovni tak, aby nám model nejlépe vyhodnotil tato pozorování. Tyto modely (např. Polynomický, Mooney-Rivlin, Ogden, Yeoh, Gent) se nazývají fenomenologické a jejich materiálové konstanty nemají konkrétní fyzikální význam. [1]

### 2.1 Přehled hyperelastických modelů

#### 2.1.1 Neo-Hookean

Model *Neo-Hookean* se považuje za nejstarší a nejjednodušší model. Je brána jako podmnožina *polynomické* formy pro  $N = 1$ ,  $c_{01} = 0$ ,  $c_{10} = \mu/2$ . Pro závěrečnou vyztužovací fázi napěťové deformační odezvy elastomerů je tento model nevhodný. Navíc pro smykovou deformaci vykazuje lineární chování.

$$W = \frac{\mu}{2}(I_1 - 3) \quad (1)$$

kde  $\mu$  vyjadřuje počáteční smykový modul

$$\mu = nkT \quad (2)$$

kde  $n$  vyjadřuje počet polymerních řetězců v jednotkovém objemu,  $k$  je Boltzmannova konstanta a  $T$  je absolutní teplota.

Model je vhodný pro deformaci v jednoosém namáhání do 40%. [1]



### 2.1.2 Arruda-Boyce

Model Arruda-Boyce je založen na mikromechanice vnitřní struktury elastomerů. Považujeme ho za rozšíření modelu *Yeoh* pro  $N = 5$ , kde konstanty nabývají reálného významu.

$$W = \mu \sum_{i=1}^5 \frac{C_i}{\lambda_L^{2i-2}} (I_1^i - 3^i) \quad (3)$$

kde konstanty  $C_i$  jsou definovány jako:

$$C_1 = \frac{1}{2}, C_2 = \frac{1}{20}, C_3 = \frac{11}{1050}, C_4 = \frac{19}{7000}, C_5 = \frac{519}{673750}$$

kde  $\mu$  vyjadřují počáteční smykový modul (jako u modelu Neo-Hookean)  $\lambda_L$  je tzv. „limitní protažení“ sítě mikromechanického modelu struktury materiálu, při kterém se už síť dál neprotahuje a napětí se začíná blížit nekonečnu.

Pokud se  $\lambda_L$  rovná nekonečnu, Arruda-Boyce přechází na Neo-Hookean. Využívá se pro deformaci do 300 %. [1]

### 2.1.3 Polynomická funkce

Tato funkce závisí na prvním a druhém deformačním invariantu ( $I_1, I_2$ ). Model této funkce má formu:

$$W = \sum_{i+j=1}^N c_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (4)$$

kde  $c_{ij}$  vyjadřuje materiálové konstanty a za  $N$  dosazujeme hodnoty od jedné do nekonečna, ovšem většinou není hodnota  $N$  vyšší než 3. Uplatňuje se pro deformace dosahující až 300%. [1]

### 2.1.4 Mooney-Rivlin

Model *Mooney-Rivlin* je považován za speciální případ *polynomické formy*. Existují dvou, tří, pěti a devíti-parametrové *Mooney-Rivlin* modely.

Model, který je složený ze dvou parametrů, se používá nejčastěji. Tento model se shoduje s polynomickou formou  $N=1$ :

$$W = c_{10}(I_1 - 3) + c_{01}(I_2 - 3) \quad (5)$$

kde  $c_{10}$ ,  $c_{01}$  vyjadřují materiálové konstanty.

Využívá se na tahové deformace do 90 až 100 %, kde nemusí být správně charakterizováno chování materiálu při stlačení.

Model, který je složený ze tří parametrů, se shoduje s *polynomickou formou* pro  $N = 2$  a  $c_{20} = c_{02} = 0$ :

$$W = c_{10}(I_1 - 3) + c_{01}(I_2 - 3) + c_{20}(I_1 - 3)^2 + c_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + c_{02}(I_2 - 3)^2 \quad (6)$$

kde  $c_{10}$ ,  $c_{01}$ ,  $c_{11}$  vyjadřují materiálové konstanty.

Model, který je složený z pěti parametrů, se shoduje s *polynomickou formou* pro  $N = 2$ :

$$W = c_{10}(I_1 - 3) + c_{01}(I_2 - 3) + c_{20}(I_1 - 3)^2 + c_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + c_{02}(I_2 - 3)^2 \quad (7)$$

kde  $c_{10}$ ,  $c_{01}$ ,  $c_{11}$ ,  $c_{20}$ ,  $c_{02}$  vyjadřují materiálové konstanty.

Model, který je složený z devíti parametrů, se shoduje s *polynomickou formou* pro  $N = 3$ :

$$W = c_{10}(I_1 - 3) + c_{01}(I_2 - 3) + c_{20}(I_1 - 3)^2 + c_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + c_{02}(I_2 - 3)^2 + c_{30}(I_1 - 3)^3 + c_{21}(I_1 - 3)^2(I_2 - 3) + c_{12}(I_1 - 3)(I_2 - 3)^2 + c_{03}(I_2 - 3)^3 \quad (8)$$

kde  $c_{10}$ ,  $c_{01}$ ,  $c_{11}$ ,  $c_{20}$ ,  $c_{02}$ ,  $c_{30}$ ,  $c_{21}$ ,  $c_{12}$ ,  $c_{03}$  vyjadřují materiálové konstanty.

Pěti nebo devíti parametrické modely jsou využívány pro deformace až do 300 %. [1]

### 2.1.5 Ogden

Model *Ogden* docela dobře vyjadřuje chování elastomerů při velkých deformacích a je často využíván.

$$W = \sum_{i=1}^N \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3) \quad (9)$$

kde  $\mu_i$  a  $\alpha_i$  vyjadřují materiálové konstanty bez konkrétního fyzikálního významu a  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  vyjadřují poměrné protažení. Za  $N$  jsou dosazovány číselné hodnoty od jedné do nekonečna, ale v mnoha případech hodnota  $N$  není větší než 3.

Pokud  $N = 1$  a  $\alpha_1 = 2$  se Model *Ogden* stává rovnocenný k modelu *Neo-Hookean*. Pokud  $N = 2$ ,  $\alpha_1 = 2$  a  $\alpha_2 = -2$  se Ogden transformuje na dvou-parametrový Mooney-Rivlin model. Ogden je využíván pro deformace do 700%. [1]

### 2.1.6 Yeoh

Model *Yeoh* je obdobný polynomické formě, ale nevyužívá druhého deformačního invariantu. Tento model se složitěji vyhodnocuje a jeho výsledky jsou docela nepřesné. Za výhodu je považována jeho jednoduchost.

$$W = \sum_{i=1}^N c_{i0} (I_1 - 3)^i \quad (10)$$

kde  $c_{i0}$  vyjadřuje materiálovou konstantu a za  $N$  jsou dosazovány hodnoty od jedné do nekonečna, ale v mnoha případech není hodnota  $N$  vyšší než 3. Neo-Hookean je uvažován pro  $N = 1$ .

Pro  $N = 3$  jde o model *Yeoh*. *Yeoh* model, který má tři parametry, vyhodnocuje kvalitní výsledky pro větší deformace, ale pro menší deformace je nevhodný. [1]

### 2.1.7 Gent

Model *Gent* je analogický modelu Arruda-Boyce, protože užívá pojmu limitní síťové protažení, ovšem z vnitřní struktury elastomerů nevychází.

$$W = -\frac{EI_m}{6} \ln\left(1 - \frac{I_1 - 3}{I_m}\right) \quad (11)$$

kde  $E$  vyjadřuje počáteční modul pružnosti, jehož hodnota je pro nestlačitelné materiály  $3\mu$ .  $I_m$  vyjadřuje limitní hodnotu členu  $(I_1 - 3)$ , podobný k  $\lambda_L$  v Arruda-Boyce modelu. Pokud se hodnota přirozeného logaritmu bude zvyšovat, výsledná forma se bude přibližovat Yeoh modelu. Pokud  $I_m$  bude vycházet nekonečno, model se přemění na formu Neo-Hookean. Tento model je jednoduchý a má schopnost pokrýt konečnou vyztužovací fázi napět'ové deformační odezvy. [9]

### 3 MECHANICKÉ VLASTNOSTI HYPERELASTICKÝCH MATERIÁLŮ

#### 3.1 Obecná teorie velkých elastických deformací

Rivlinem byl objeven obecný vztah mezi napětím a deformací u hyperelastických materiálů, jenž vychází ze vztahu pro potenciál deformační energie ( $W$ ), kde může být funkcí hlavních protažení nebo přímo funkcí deformačních invariantů:

$$W = W(I_1 I_2 I_3), \quad (12)$$

$$W = W(\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3). \quad (13)$$

Pro napětí  $\sigma_{ij}$  platí deformační potenciál definovaný jako:

$$\sigma_{ij} = \frac{\partial W}{\partial E_{ij}}, \quad (14)$$

kde  $E_{ij}$  vyjadřuje Lagrangeův deformační tenzor. Očekává se, že materiál je izotropní v elastickém chování v nezátíženém stavu a téměř nestlačitelný v objemu. Metoda měření napětí na vzorku elastomeru je nezávislá na výběru osy a je dána třemi deformačními invarianty, formulovanými jako:

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3 \quad (15)$$

$$I_2 = \lambda_1^2 \cdot \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \cdot \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \cdot \lambda_1^2 - 3 \quad (16)$$

$$I_3 = \lambda_1^2 \cdot \lambda_2^2 \cdot \lambda_3^2 - 1, \quad (17)$$

kde symboly  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  znamenají hlavní protažení, formulované jako procento z prodloužené délky na neprodlouženou délku hran malého objemového elementu, krychlového tvaru v nezátíženém stavu:

$$\lambda = \frac{L}{L_0} = \frac{L + \Delta u}{L_0}, \quad (18)$$

kde hodnoty  $\lambda_i$  jsou vyjádřeny  $(1 + \varepsilon_i)$  a  $\varepsilon_i$  je poměrná deformace. Hodnoty  $I_i$  vychází nulové v nezátíženém stavu, když  $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 1$ . Pokud je vybrán nestlačitelný materiál, je  $I_3$  rovno

nule. Díky tomu zbývají pouze dvě nezávislé hodnoty napět'ových konstant  $I_1, I_2$ . Z těchto konstant vyplývá rovnice deformačního potenciálu  $W = W(I_1, I_2)$ .

Vztah mezi napětím a deformací dostaneme z rovnice napět'ového energetického potenciálu, vyjádřením „virtuální“ práce, formulované jako:

$$\delta W = \left(\frac{\sigma_1}{\lambda_1}\right) \left(\frac{\partial W}{\partial \lambda_1}\right) \delta \lambda_1 \quad (19)$$

Identicky lze vyjádřit vztah pro  $\lambda_1, \lambda_2$ . Pro  $\sigma_1$  získáme:

$$\sigma_1 = 2 \left[ \lambda_1^2 \left(\frac{\partial W}{\partial I_1}\right) - \left(\frac{1}{\lambda_1^2}\right) \left(\frac{\partial W}{\partial I_2}\right) \right] + P \quad (20)$$

Identicky lze vyjádřit  $\sigma_2, \sigma_3$ , kde  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  vyjadřují jednotlivá skutečná napětí. Symbol  $P$  vyjadřuje nespecifikovaný tlak.  $P$  se určuje na základě známých hodnot  $\sigma$  a  $\lambda$ . [5]

### 3.2 Jednoosá napjatost

Jednoosá napjatost je vyjádřena poměrným protažením  $\lambda_1 = \lambda, \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda^{-1/2}$ . Jednoduché prodloužení vychází ze stavu nestlačitelnosti, kde objem je konstantní a tudíž  $\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = 1$ . Pro tento stav napětí, kde boky stran nejsou namáhány, platí  $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$  a rovnice (20) pro  $\sigma_2$  a  $\sigma_3$  se změní na rovnici neznámého stlačení  $P$ :

$$P = -2 \left[ \left(\frac{1}{\lambda}\right) \left(\frac{\partial W}{\partial I_1}\right) - \lambda \left(\frac{\partial W}{\partial I_2}\right) \right] \quad (21)$$

Pokud vložíme tuto funkci do vztahu (20), pro  $\sigma_1 (= \sigma)$  výsledek je:

$$\sigma = 2 \left[ \left(\frac{\partial W}{\partial I_1}\right) + \left(\frac{1}{\lambda}\right) \left(\frac{\partial W}{\partial I_2}\right) \right] \left( \lambda^2 - \frac{1}{\lambda} \right) \quad (22)$$

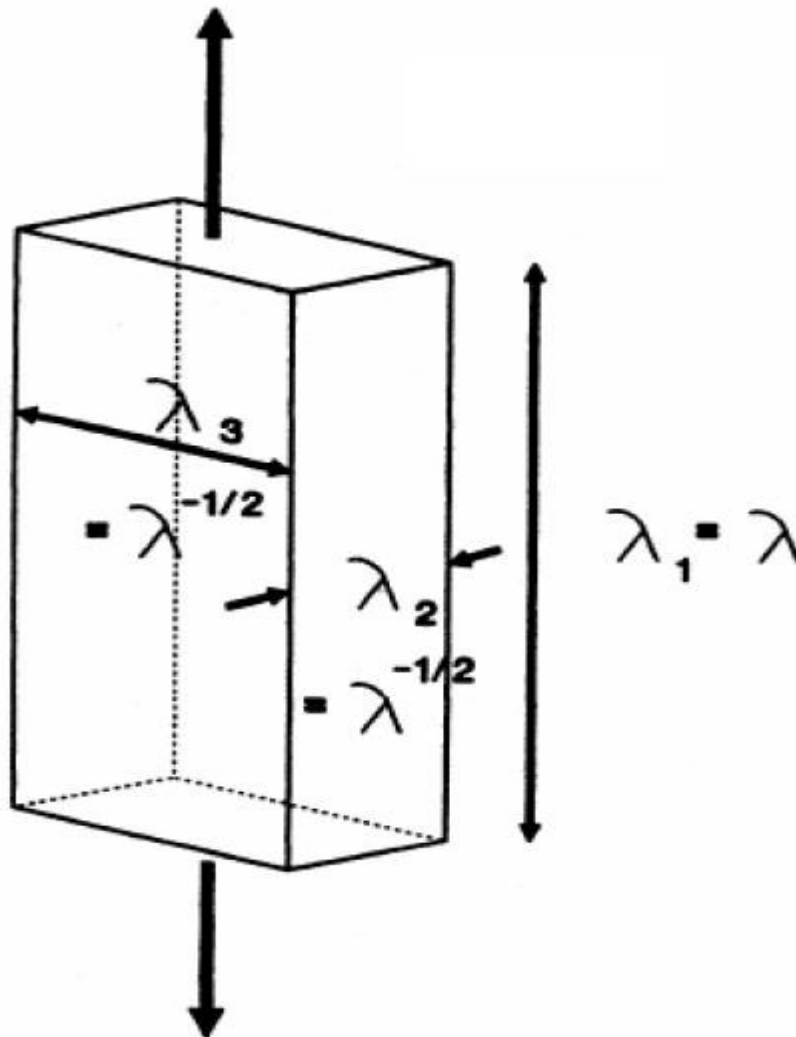
kde  $\sigma$  vyjadřuje skutečné napětí.

Obvykle se měří silové napětí působící na část nedeformovaného průřezu,

$$f = \frac{\sigma}{\lambda} \quad (23)$$

kde  $\sigma$  je dáno rovnicí (22).

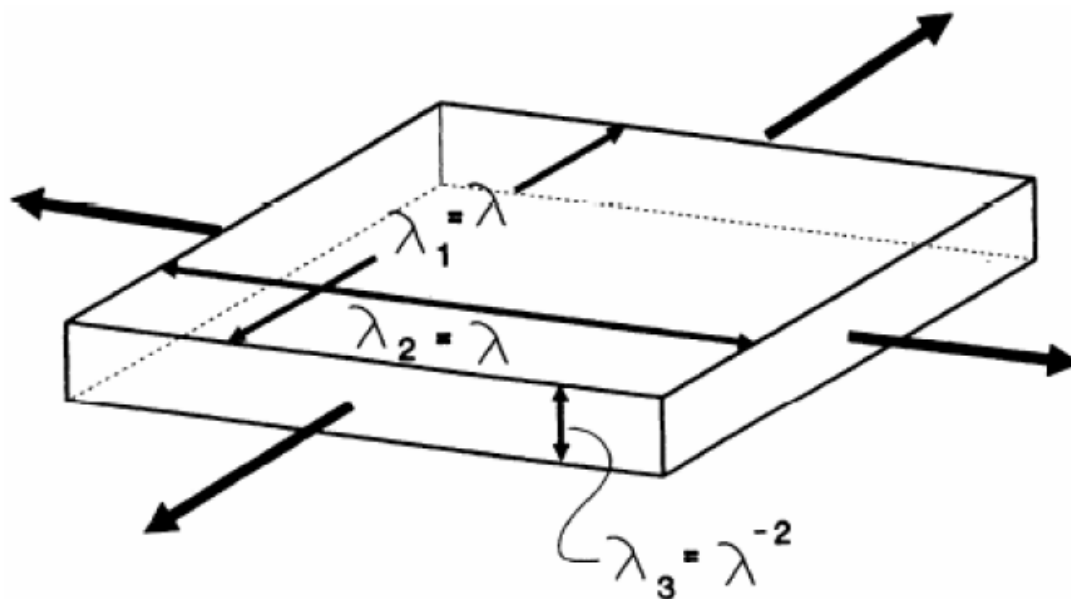
Rovnice (22) znamená „velko-deformační“ ekvivalent základního vzorce Hookeova zákona,  $\sigma = E\varepsilon$  použitelného pro malé deformace. [5,1]



Obr. 1: Jednoosá napjatost [5]

### 3.3 Dvousá napjatost

Lze využít vztahů pro jednoosou napjatost. Zde je poměrné protažení vyjádřeno jako  $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$ ,  $\lambda_3 = 1/\lambda^2$ . Napětí  $\sigma_3$  je rovno nule, jelikož tato strana není namáhána. Tlak  $P$  v rovnici (20) se změní na  $P = -2(\lambda^{-4}W_1 - \lambda^4W_2)$ . Napětí  $\sigma_2$  a  $\sigma_1$  jsou vyjádřeny jako:  $\sigma_1 = \sigma_2 = 2(W_1 + \lambda^2W_2)(\lambda^2 - \lambda^{-4})$ . Mezi napětím a deformací je tedy velmi nelineární vztah. [1]



Obr. 2: Dvousá napjatost [5]

### 3.4 Čistý smyk

Je vyjádřen jako napětí aplikované ve směru 1 a zároveň je zamezeno změně šířky ve směru 2, tzn.  $\lambda_2 = 1$ . Tato definice nám vyjadřuje název „smyk“. Linie, která je paralelní s hlavní osou, nepodléhá žádnému prodloužení při čistém smyku. Název „čistý“ vyjadřuje, že hlavní osy nerotují při této deformaci. Horizontální šířka  $w$  daného vzorku je značně větší, než výška  $h$  ve vertikálním směru (směr namáhání) a to přibližně o jednu desetinu  $w$ . K zamezení smrštění bočních stran vzorku slouží dlouhé horizontální svorky, a proto napětí působí jen ve vertikálním směru, tzn.  $\lambda_2 = 1$ .

Poměrné prodloužení je při deformaci vyjádřeno jako:  $\lambda_1 = \lambda$ ,  $\lambda_2 = 1$  a  $\lambda_3 = 1/\lambda$ , napětí  $\sigma_3$  je nulové. Napětí  $\sigma_2$  je nenulové, protože je způsobeno tuhými svorkami. Z rovnice (20) je vyjádřen tlak  $P$  jako:



$$P = -2(\lambda^{-2}W_1 - \lambda^2W_2) \quad (24)$$

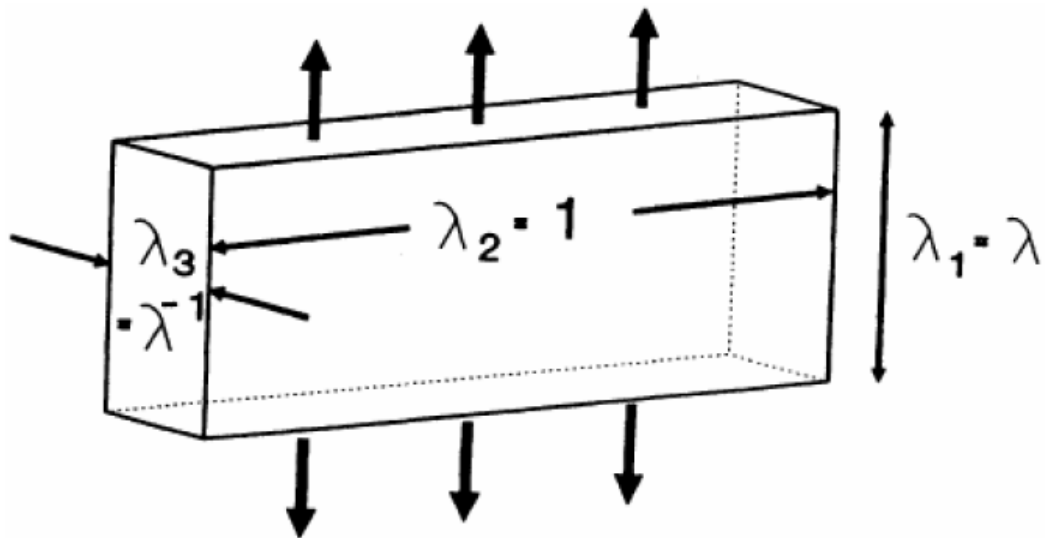
proto napětí  $\sigma_1 (= \sigma)$  ve směru protahování je vyjádřeno jako:

$$\sigma = 2(W_1 + W_2) \cdot (\lambda^2 - \lambda^{-2}) \quad (25)$$

a vedlejší napětí  $\sigma_2$  má tvar:

$$\sigma_2 = 2(W_1 + \lambda^2W_2) \cdot (1 - \lambda^{-2}) \quad (26)$$

[5,1]



Obr. 3: Čistý smyk [5]

## 4 MECHANICKÉ ZKOUŠKY

Prostřednictvím mechanických zkoušek a jejich následným vyhodnocením lze popsat zkoušený materiál. Pro většinu elastomerů je nejčastější víceosé zkoušení, nejlépe totiž vystihuje základní vztahy pro pryže. [7]

Nejčastěji se zkouší materiál na jednoosou napjatost, dvouosou napjatost a čistý smyk. Hodnoty, získané z těchto zkoušek, slouží k získání konstant pro hyperplastické modely. Jak je známo, každý elastomer má specifické vlastnosti, proto je nezbytné pro každou konkrétní analýzu přesně vymezovat materiálové konstanty daných materiálů. [9]

### 4.1 Tahová zkouška

Tato zkouška se uskutečňuje dle normy ČSN ISO 37. Provádí se na trhacích strojích, kde se normalizované zkušební těleso natahuje stejnou rychlostí a vyhodnocuje se průběh změny sledované fyzikální hodnoty. Zkušební tělísko se zhotovuje vysekáváním a má tvar oboustranných lopatek. Ze získaných hodnot pak lze zjistit charakteristiky zkoušeného materiálu. [8]

U zkoušky tahem lze definovat následující pojmy:

Napětí v tahu je vyjádřeno jako podíl síly  $F$  (N) působící kolmo k průřezu a původního průřezu  $S$  (m<sup>2</sup>). Je označováno také jako smluvní napětí  $\sigma$  (MPa).

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (27)$$

Prodloužení (stlačení)  $\Delta l$  je vyjádřeno jako rozdíl měřené délky  $l$  pracovní oblasti zkušební tělesa v určitém okamžiku zkoušky a původní délky  $l_0$ . Jednotka prodloužení je  $m$ .

Poměrné prodloužení (stlačení)  $\varepsilon$  je vyjádřeno jako poměr změny délky ( $\Delta l = l - l_0$ ) k původní měřené délce  $l_0$  v procentech.

$$\varepsilon = 100(l - l_0)/l_0 \quad (28)$$

Tažnost je vyjádřena jako poměrné prodloužení pracovní oblasti zkušební tělesa v okamžiku přetržení a udává se v procentech.

$$\varepsilon_p = 100(l - l_0)/l_0 \quad (29)$$

Modul v tahu je takové napětí, při kterém se dosáhne určitého předem stanoveného prodloužení. Tento modul není stejný jako Youngův modul pružnosti. Pro elastomery s tažností do 400 % se předepisuje modul při poměrných prodlouženích 50, 100, 300 %.

Pro elastomery s tažností do 750 % se stanovuje modul při poměrných prodlouženích 100, 300, 500 %. Elastomery s tažností více jak 750 % se stanovuje modul při poměrných prodlouženích 300, 500, 700 %.

Dále se objevuje pojem rovnovážný modul v tahu. Je to taková hodnota modulu, která se s časem už dále nemění. Lze ho určit tak, že zkoušené těleso je plynulou rychlostí natahováno až do předepsané hodnoty poměrného prodloužení pracovní části zkušebního tělesa. V tomto okamžiku se natahování zastaví. Poté se začne zatížení postupně zmenšovat. V intervalech po jedné minutě se sledují hodnoty modulů do té doby, než jsou tři po sobě jdoucí hodnoty stejné. [1]

## 4.2 Zkouška Dvousé napjatosti

Při této zkoušce napínáme vzorek materiálu ve všech směrech jeho roviny. Existuje několik způsobů, jak toho dosáhnout. První způsob je prováděn vydutím plochého vzorku stlačeným vzduchem (Obr. 4). Další způsob se uskutečňuje roztahováním kruhového vzorku radiálně, ve směru od středu. Poslední způsob je roztahování čtvercového vzorku do dvou navzájem kolmých směrů.

Ze všech těchto způsobů je z hlediska konstrukčního nejjednodušší nafukování. Těžší způsob je ten, při kterém snímáme deformace v průběhu testování. Tloušťka se stanovuje složitě, pokud je ovšem zavedena podmínka objemové nestlačitelnosti materiálu, lze ji vypočítat následovně:

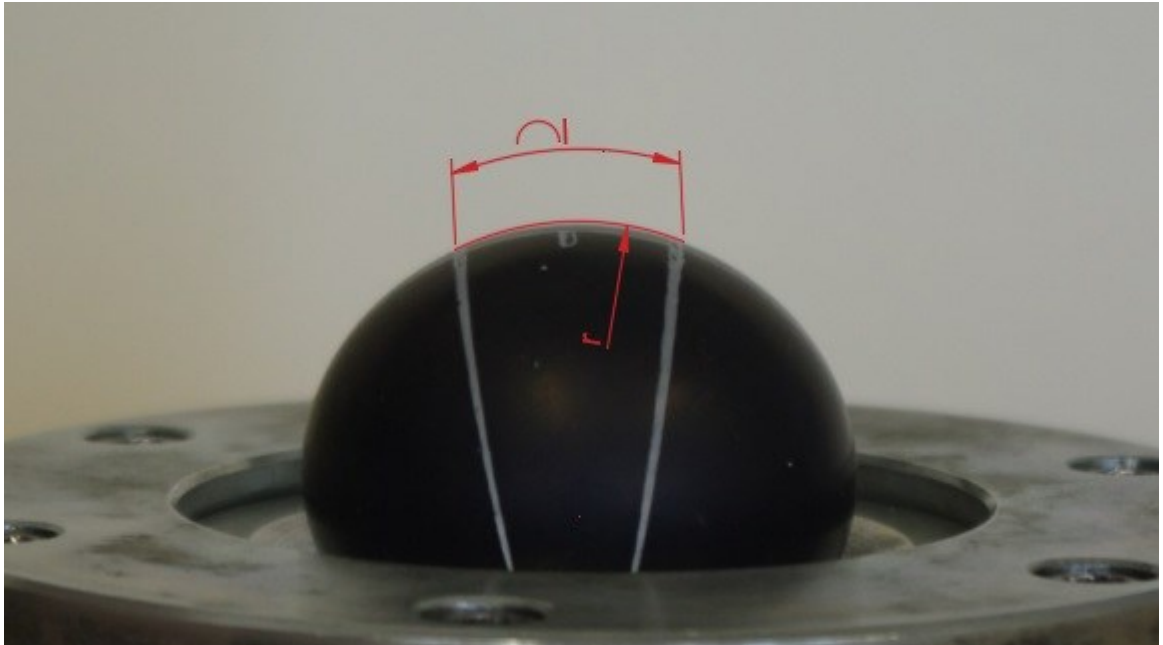
$$t = \frac{t_0}{\lambda^2} \quad (30)$$

kde  $t_0$  je původní tloušťka a  $\lambda$  je poměrné protažení.

V tomto způsobu nafukování se jedná o membránu, proto lze napětí po dosazení rovnice (30) do obecné rovnice membránového napětí psát ve tvaru [9]

$$\sigma = \frac{p \cdot r \cdot \lambda^2}{2 \cdot t_0} \quad (31)$$

kde  $p$  vyjadřuje tlak působící na vzorek,  $r$  vyjadřuje poloměr oblouku,  $\lambda$  vyjadřuje poměrné protažení a  $t_0$  vyjadřuje původní tloušťku.



Obr. 4: Zkouška dvouosé napjatosti

### 4.3 Zkouška čistým smykem

Tato zkouška je prováděna upnutím a podélným natahováním v jednom směru, což je podobné jako u tahové zkoušky. Čistého smyku je možno dosáhnout natahováním podélného vzorku, přičemž jeho výška je nejméně 10x menší než jeho šířka. Po testování jsou získány materiálové konstanty důležité pro FEM modely a charakteristický popis materiálu. [9]



Obr. 5: Zkouška smykem [10]

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 5 CÍL PRÁCE

Cílem práce bylo zhodnotit mechanické vlastnosti vybraných elastomerů. Mechanické vlastnosti se zjišťovaly pomocí zkoušky čistým smykem, zkoušky dvouosého namáhání a tahovou zkouškou, která byla prováděna za různých teplot.

### 5.1 ZKOUŠENÝ MATERIÁL

Všechny druhy směsí a jejich složení jsou v tabulce (Tab. 1).

Tab. 1: Složení jednotlivých směsí

Směs	Saze [Dsk]	KAUČUK
R1	60	NR + BR
R2	65	NR + SBR
R3	50	NR + CIIR
R4	42	NR + BR
R5	60	NR + BR + SBR
R6	75	NR + BR + SBR

### 5.2 TAHOVÁ ZKOUŠKA

#### 5.2.1 POSTUP MĚŘENÍ

1. Nejprve byla vysekána zkušební tělíska z každé směsi. (Podrobněji popsáno v kapitole 5.2.2.)
2. Poté v softwaru testXpert II byla nastavena požadovaná metoda a zadány rozměry jednotlivých tělísek, které byly naměřeny posuvným měřidlem.
3. Každé tělísko bylo potřeba vyhřát na požadovanou teplotu.
4. Zkušební tělísko bylo upnuto do stroje ZWICK 1456, který měl teplotní komoru, kde se zadala požadovaná teplota, při které měl test probíhat.
5. Po vytemperování komory mohl být test spuštěn.
6. Test probíhal cyklicky a zkušební tělísko bylo v prvním cyklu protahováno na 60 % původní délky, poté bylo odlehčeno a následně 3x protaženo na 30% původní délky.
7. Po skončení testu bylo tělísko vytaženo a vyměněno za další.
8. Test byl prováděn pro 3 různé teploty (24°C, 70°C, 100°C).

### 5.2.2 ZKUŠEBNÍ TĚLÍSKA

Tělíska byla vysekána pomocí vysekávacího nože, který odpovídal normě ČSN ISO 37. Hotové tělísko mělo tvar oboustranných lopatek (Obr. 6) a bylo jich vždy 15 kusů ve směru válcování a 15 proti směru válcování z každé směsi (5 zkušebních tělísek pro každou teplotu). Z tabulky byl zvolen vysekávací nůž typu 1 (Tab. 2).

Rozměr	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4
A Celková délka (minimální) <sup>4)</sup>	115	75	50	35
B Šířka lopatek	25,0 ± 1,0	12,5 ± 1,0	8,5 ± 0,5	6,0 ± 0,5
C Délka zúžené části	33,0 ± 2,0	25,0 ± 1,0	16,0 ± 1,0	12,0 ± 0,5
D Šířka zúžené části	6,0 ± 0,4	4,0 ± 0,1	4,0 ± 0,1	2,0 ± 0,1
E Přejíhový poloměr vnější	14,0 ± 1,0	8,0 ± 0,5	7,5 ± 0,5	3,0 ± 0,1
F Přejíhový poloměr vnitřní	25,0 ± 2,0	12,5 ± 1,0	10,0 ± 0,5	3,0 ± 0,1

<sup>4)</sup> Vnější celková délka může být nutná pro zajištění, aby do kontaktu s čelistmi stroje přicházely jenom rovnoběžné části rozšířených konců, což zabraňuje trhání zkušebních těles v rozšiřujících částech

Obr. 6: Tabulka s rozměry vysekávacích nožů [10]



Obr. 7: Vyseknuté zkušební tělísko

### 5.2.3 PODMÍNKY MĚŘENÍ

Měření bylo prováděno za teplot 24°C, 70°C, 100°C. Teploty se nastavovaly v teplotní komoře.

## 5.2.4 ZKUŠEBNÍ ZAŘÍZENÍ

Trhací zařízení vyhovuje normě ISO 7500-1 Třídy 1.

Tab. 2: Informace o zařízení ZWICK

Název zařízení	ZWICK 1456
Maximální rychlost posuvu	800 mm/min
Teplotní komora	-80/250°C
Maximální nastavitelná síla	20kN
Použitý software	testXpert II

## 5.2.5 ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ

Zpracování výsledků bylo prováděno dle teoretické části (kapitola 4.1.). Pro každou směs se vycházelo z 15 hodnot pro 30 % poměrného prodloužení a z 5 hodnot pro 60 % poměrného prodloužení. Z naměřených hodnot (původní délka, měřená délka pracovní oblasti zkušebního tělesa, síla a průřez) bylo vypočítáno napětí a poměrné prodloužení. Výsledky pak byly zpracovány do grafů a tabulek.

## 5.3 ČISTÝ SMYK

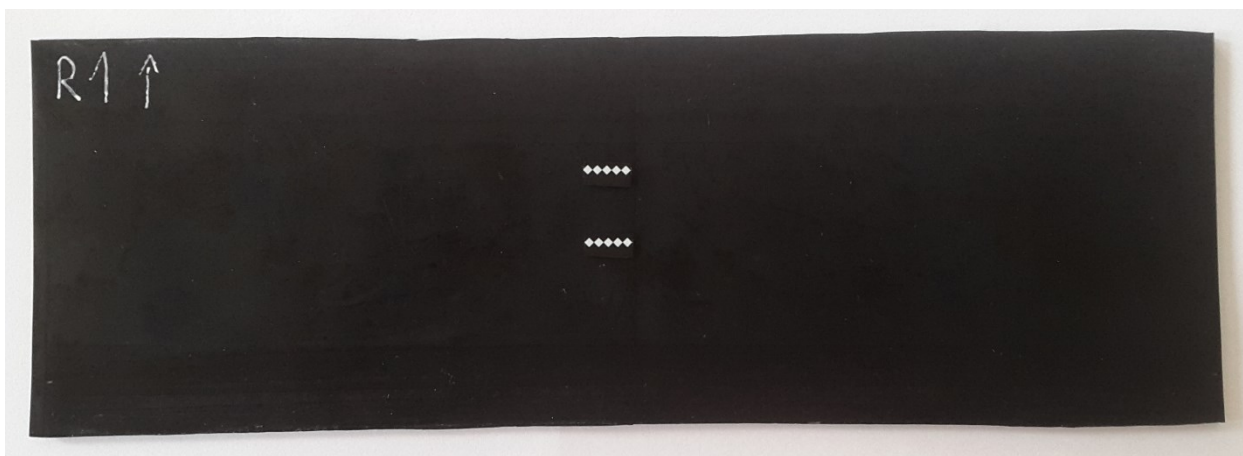
### 5.3.1 POSTUP MĚŘENÍ

1. Zkušební tělíska byla nastříhána z každé směsi. (Podrobněji popsáno v kapitole 5.3.2.)
2. Poté byla v softwaru TRAPEZIUM nastavena zkouška čistého smyku a rozměry měřených zkušebních tělísek, které byly změřeny posuvným měřidlem.
3. Zkušební tělísko bylo uchyceno do čelistí trhacího stroje SHIMADZU AGS-50kNXD. Na zkušební tělísko byly umístěny značky, které snímala digitální kamera a vyhodnocovala tak protažení tělíska.
4. Po spuštění testu se tělísko natahovalo do poměrného protažení 60 % pro určení modulu M50. Rychlost natahování tělíska byla 20 mm/min. Software TRAPEZIUM následně vyhodnocoval průběh závislosti napětí na poměrném protažení.
5. Jakmile bylo dosaženo protažení zkušebního tělíska o 60 %, byl test ukončen. Tělísko se uvolnilo a upevnilo se další tělísko.
6. Tento postup byl použit pro všech 36 měření.



### 5.3.2 ZKUŠEBNÍ TĚLÍSKA

Bylo připraveno 6 zkušebních tělísek (3 podélné a 3 příčné se směrem válcování materiálu) u každé z 6 směsí. (Obr. 8). Všechna zkušební tělíska byla označena svým číslem a značkou, která ukazovala směr válcování. Rozměry tělísek byly 240mm x 80mm. Tloušťka byla průměrně 2,50 mm.



Obr. 8: Vystřížené zkušební tělísko

### 5.3.3 PODMÍNKY MĚŘENÍ

Měření bylo prováděno za laboratorní teploty 24 °C a laboratorních podmínkách.

### 5.3.4 ZKUŠEBNÍ ZAŘÍZENÍ

Trhací zařízení vyhovuje normě ISO 7500-1 Třídy 1.

Tab. 3: Informace o zkušebním zařízení

Název zařízení	SHIMADZU AGS-50kNXD
Rozsah zdvihu příčnicku	0 mm až 1250 mm
Rozsah zkušební rychlosti příčnicku	0,001 mm/min až 1600 mm/min
Šířka pracovního prostoru	425 mm
Maximální nastavitelná síla	50 kN
Přesnost měření	$\pm 1$ % indikované síly
Použitý software	TRAPEZIUM

### 5.3.5 ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ

Zpracování výsledků bylo prováděno dle teoretické části (kapitoly 4.1. a 4.3.). Z naměřených hodnot (původní délka značek, změřená délka značek po zkoušce, síly a průřezu) bylo vypočítáno napětí a poměrné prodloužení. Výsledky pak byly zpracovány do grafů a tabulek.

## 5.4 ZKOUŠKA DVOUOSÉ NAPJATOSTI

### 5.4.1 POSTUP MĚŘENÍ

1. Zkušební tělíska byla nastříhána do kruhového tvaru o průměru 80mm, kvůli dobrému upnutí do zkušebního stroje.
2. Uprostřed byly na tělíska nakresleny dvě čáry ve vzájemné vzdálenosti 10mm. Tyto čáry byly důležité pro měření.
3. Tělísko bylo připevněno do zkušebního zařízení.
4. Měřicí kamera byla zaměřena a zaostřena na čáry a snímala celý průběh zkoušky.
5. Pomalu byl přidáván tlak a tělíska byla nafukována až do doby, kdy se vzdálenost čar zvětšila o 30%.
6. Fotografie z kamery byly zpracovány v programu AutoCAD.
7. Pomocí programu Excel byly zpracovány grafy v závislosti průběhu napětí na poměrném prodloužení.

### 5.4.2 ZKUŠEBNÍ TĚLÍSKA

Testovaná plocha tělísek měla po upnutí do zkušebního zařízení průměr 50 mm. Uprostřed zkoušeného průměru byly nakresleny 2 čáry o vzájemné vzdálenosti 10 mm.



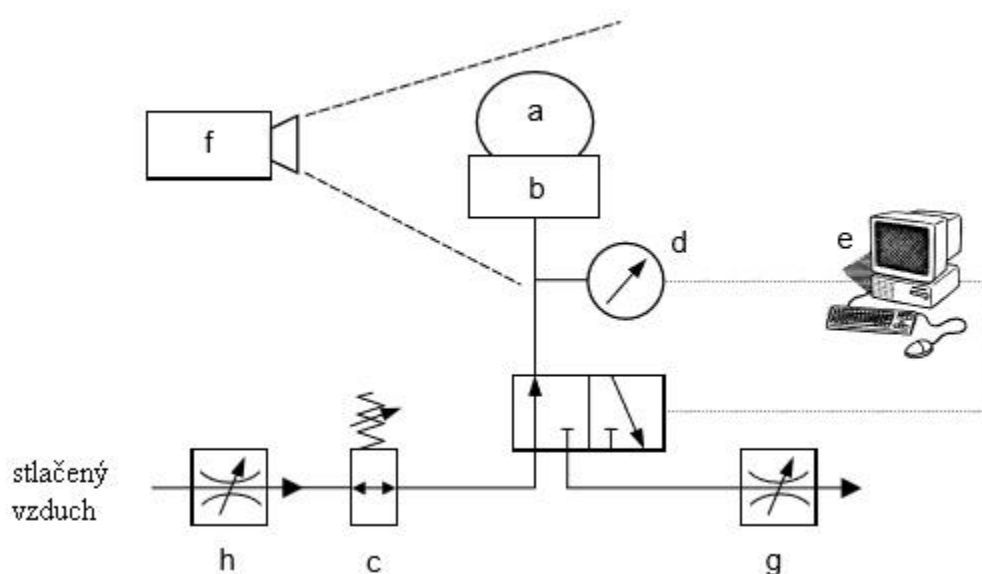
Obr. 9: Zkušební tělisko

### 5.4.3 PODMÍNKY MĚŘENÍ

Měření bylo prováděno při laboratorní teplotě 24 °C a předepsaných laboratorních podmínkách.

### 5.4.4 ZKUŠEBNÍ ZAŘÍZENÍ

Zkušební zařízení bylo speciálně vyrobené pro tuto zkoušku (Obr. 10).



Obr. 10: Zařízení pro zkoušku dvouosé napjatosti [10]

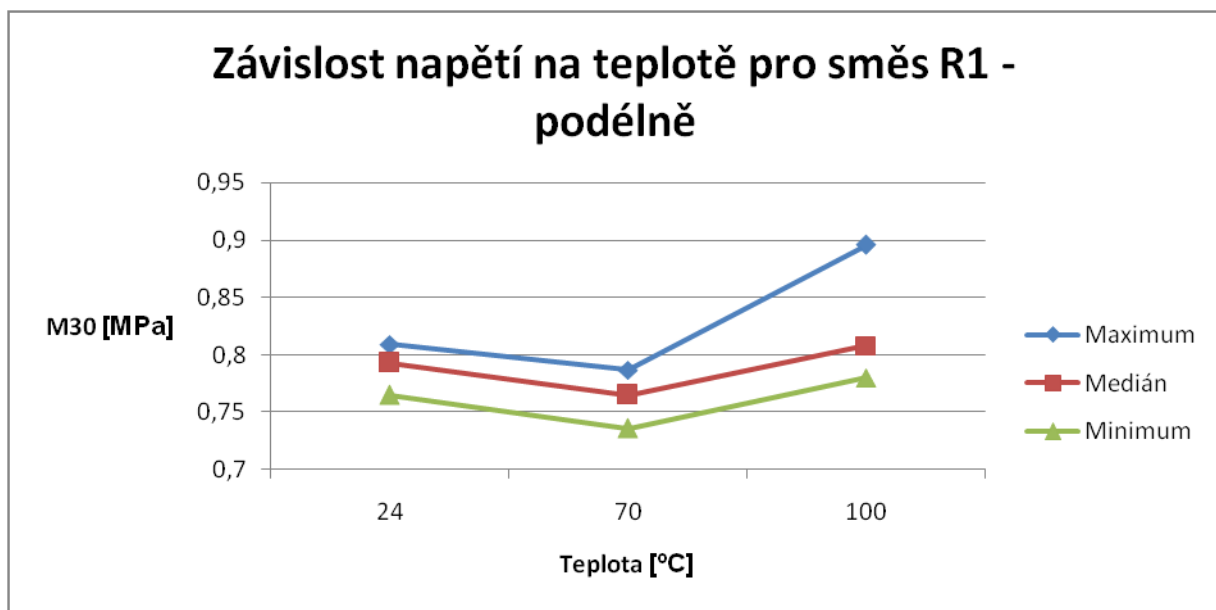
#### 5.4.5 ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ

Zpracování výsledků bylo prováděno dle teoretické části (kapitola 4.2.). Na základě naměřených hodnot (tlak, délka a poloměr oblouku) bylo vypočítáno napětí a poměrné prodloužení. Výsledky pak byly zpracovány do grafů a tabulek.

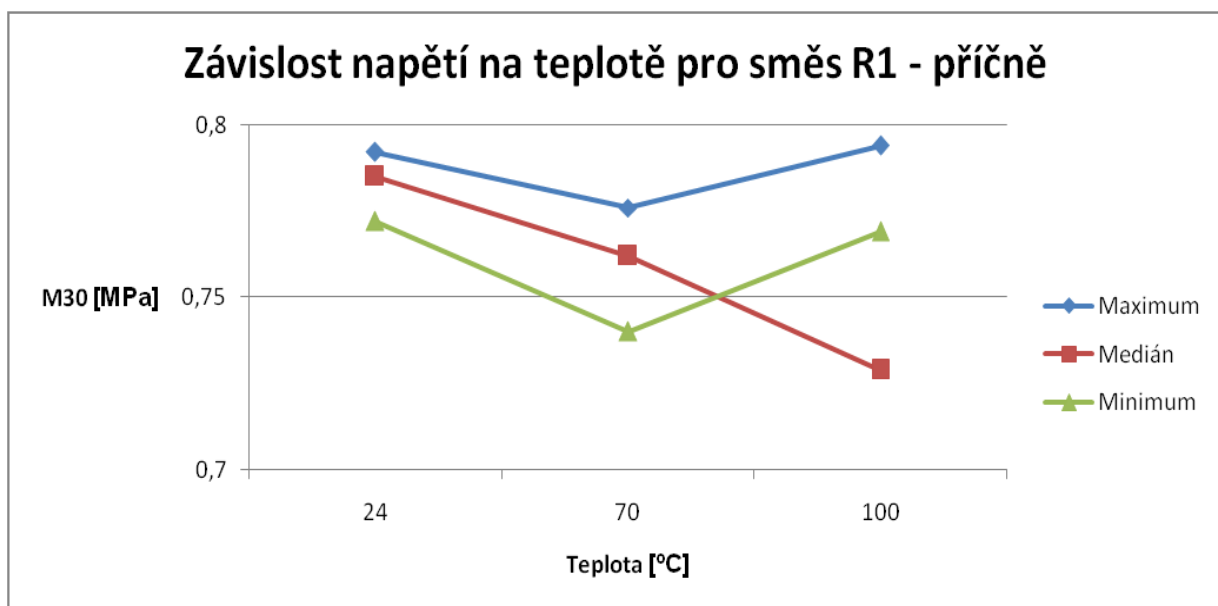
## 6 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

### 6.1 MATERIÁL R1

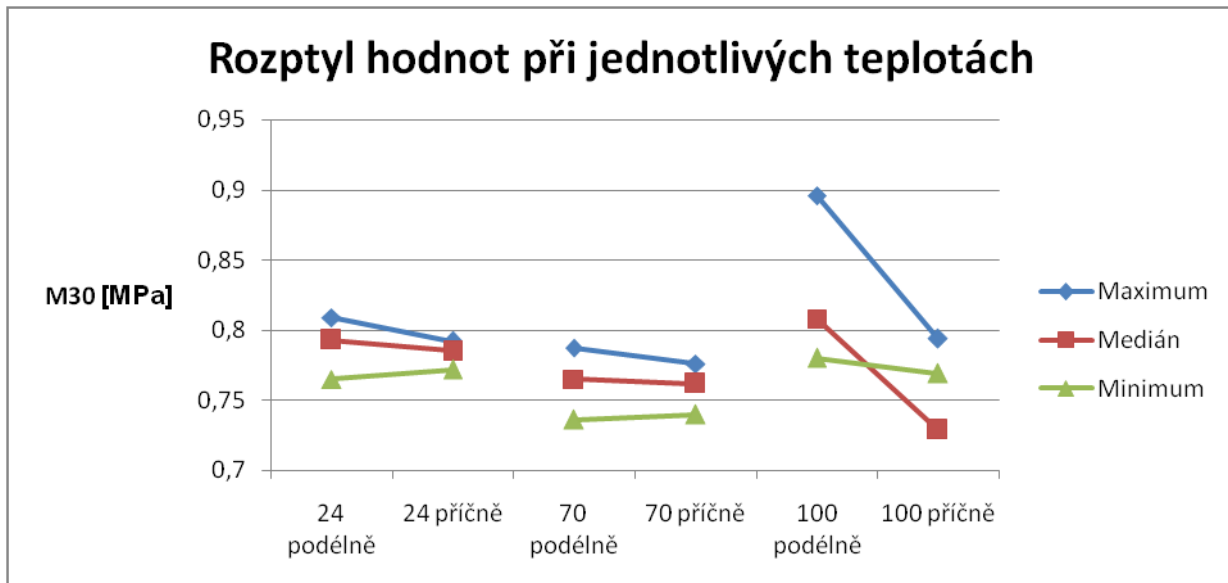
#### 6.1.1 TAH



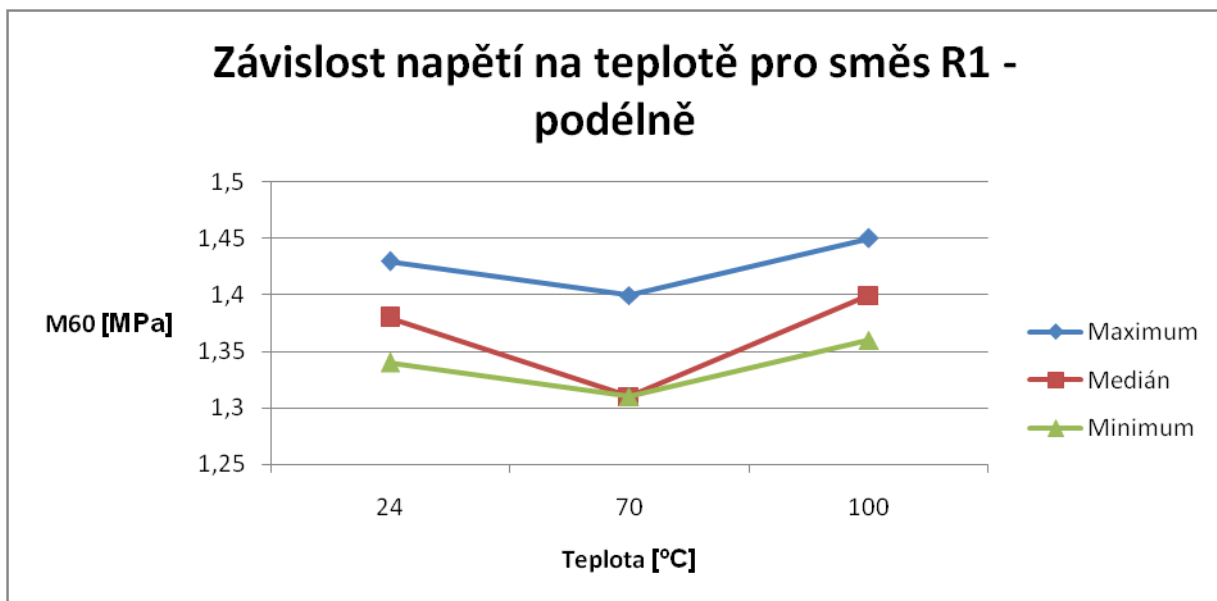
Obr. 11: Směs R1 v podélném směru při poměrném prodloužení 30 %



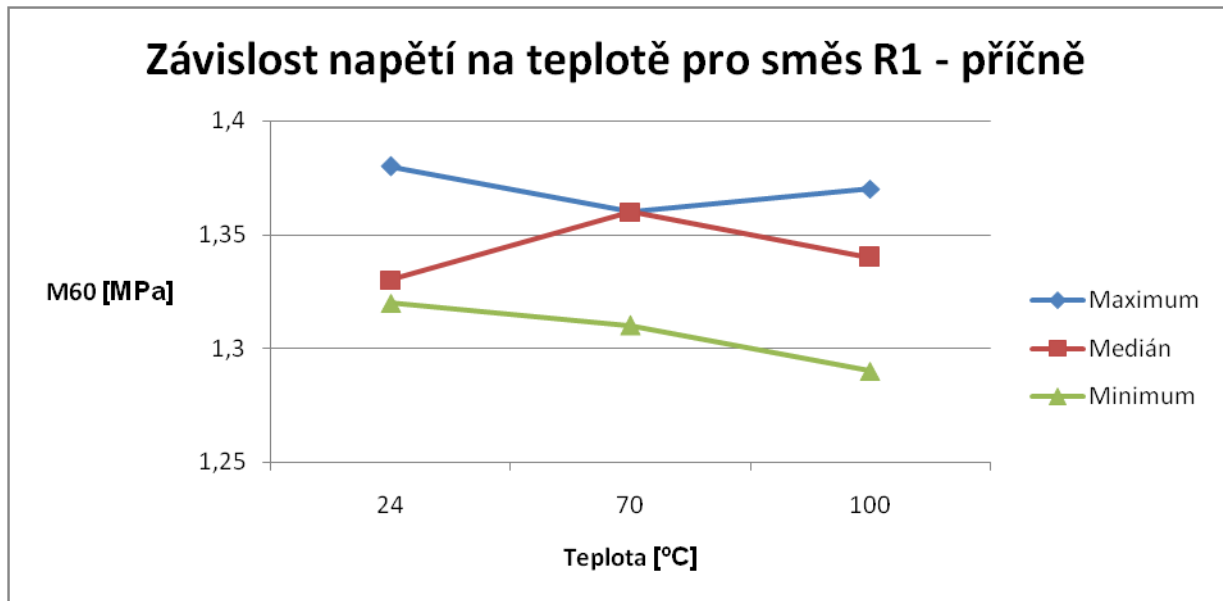
Obr. 12: Směs R1 v příčném směru při poměrném prodloužení 30 %



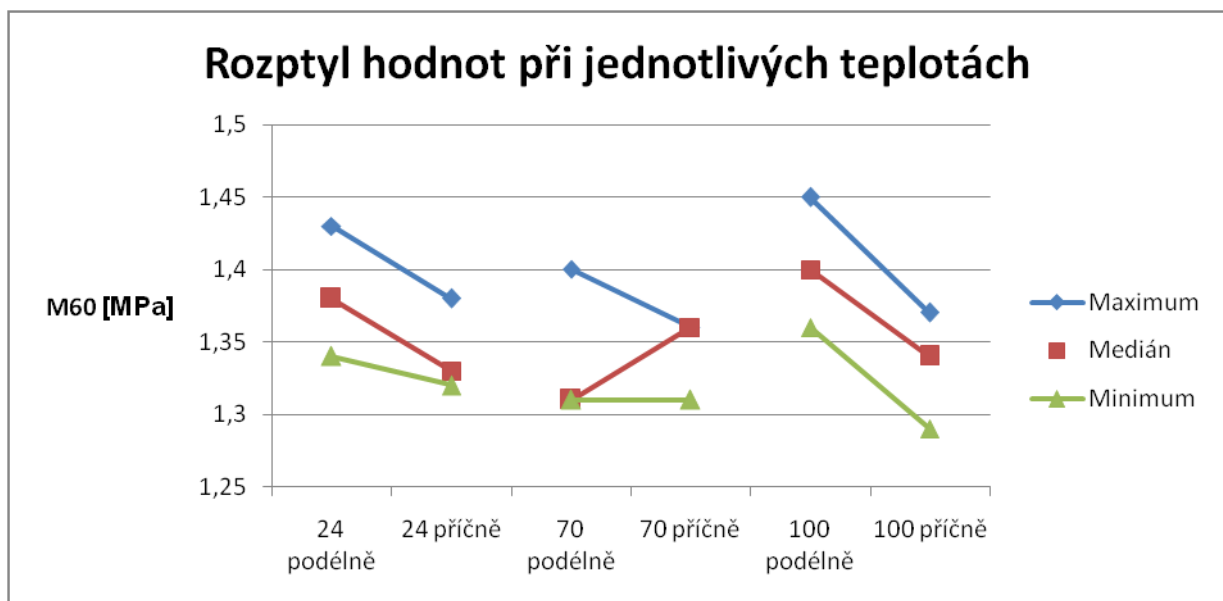
Obr. 13: Rozptyl hodnot napětí ve směsi R1 pro měřené teploty při poměrném prodloužení 30 %



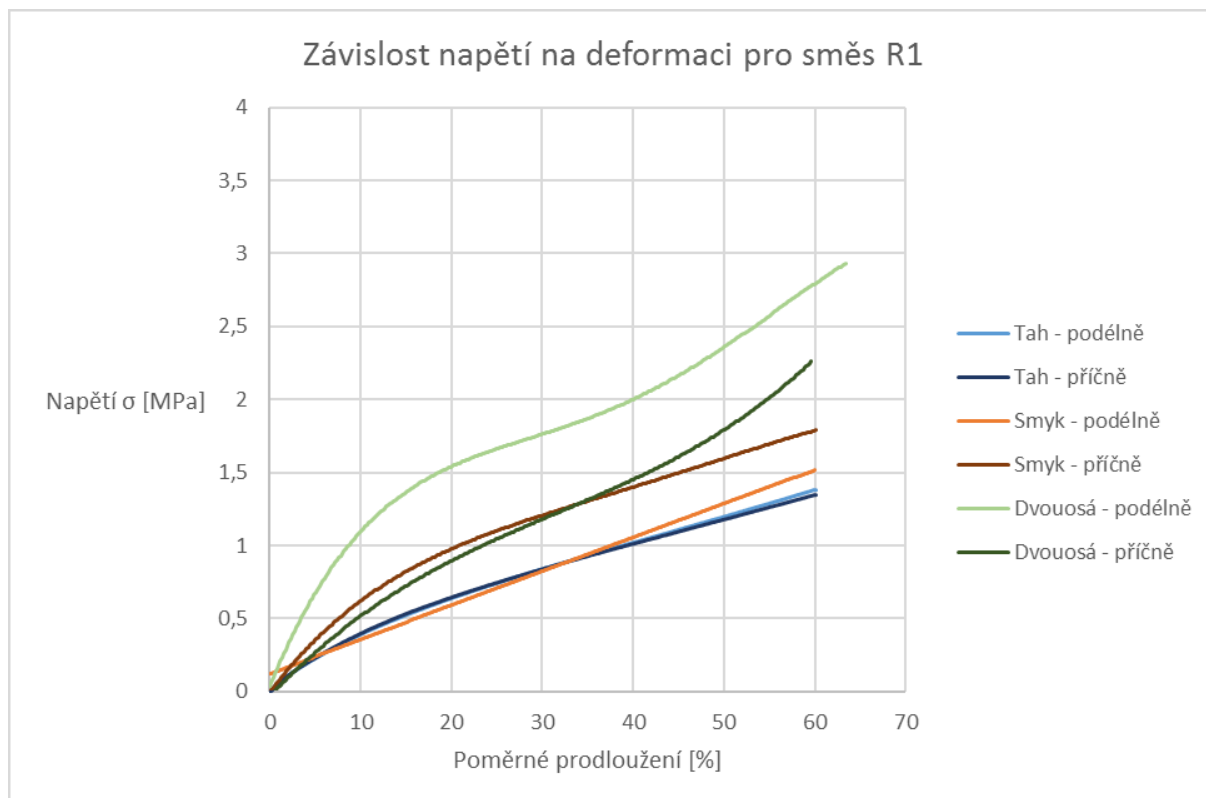
Obr. 14: Směs R1 v podélném směru při poměrném prodloužení 60 %



Obr. 15: Směs R1 v příčném směru při poměrném prodloužení 60 %



Obr. 16: Rozptyl hodnot napětí pro směs R1 pro měřené teploty při poměrném prodloužení 60 %



Obr. 17: Závislosti napětí na poměrném prodloužení pro všechny provedené zkoušky pro směs R1

Tab. 4: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro směs R1 při poměrném prodloužení 30 %

Napětí při teplotě 24 °C a poměrném prodloužení $\epsilon = 30$ % [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
R1 podélně	0,81	0,79	0,77
R1 příčně	0,79	0,79	0,77
Napětí při teplotě 70 °C a poměrném prodloužení $\epsilon = 30$ % [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
R1 podélně	0,79	0,77	0,74
R1 příčně	0,78	0,76	0,74
Napětí při teplotě 100 °C a poměrném prodloužení $\epsilon = 30$ % [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
R1 podélně	0,90	0,81	0,78
R1 příčně	0,79	0,73	0,77



Tab. 5: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro směs R1 při poměrném prodloužení 60 %

Napětí při teplotě 24 °C a poměrném prodloužení $\epsilon = 60$ % [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
R1 podélně	1,43	1,38	1,34
R1 příčně	1,38	1,33	1,32
Napětí při teplotě 70 °C a poměrném prodloužení $\epsilon = 60$ % [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
R1 podélně	1,40	1,31	1,31
R1 příčně	1,36	1,36	1,31
Napětí při teplotě 100 °C a poměrném prodloužení $\epsilon = 60$ % [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
R1 podélně	1,45	1,40	1,36
R1 příčně	1,37	1,34	1,29

## 6.1.2 ČISTÝ SMYK

Tab. 6: Naměřené hodnoty napětí v čistém smyku pro směs R1

Napětí při poměrném prodloužení $\epsilon = 30$ % [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
R1 podélně	1,1117	0,8799	0,8256
R1 příčně	1,2110	1,1792	0,8290
Napětí při poměrném prodloužení $\epsilon = 60$ % [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
R1 podélně	1,6667	1,2603	1,2323
R1 příčně	1,7945	1,7491	1,4959

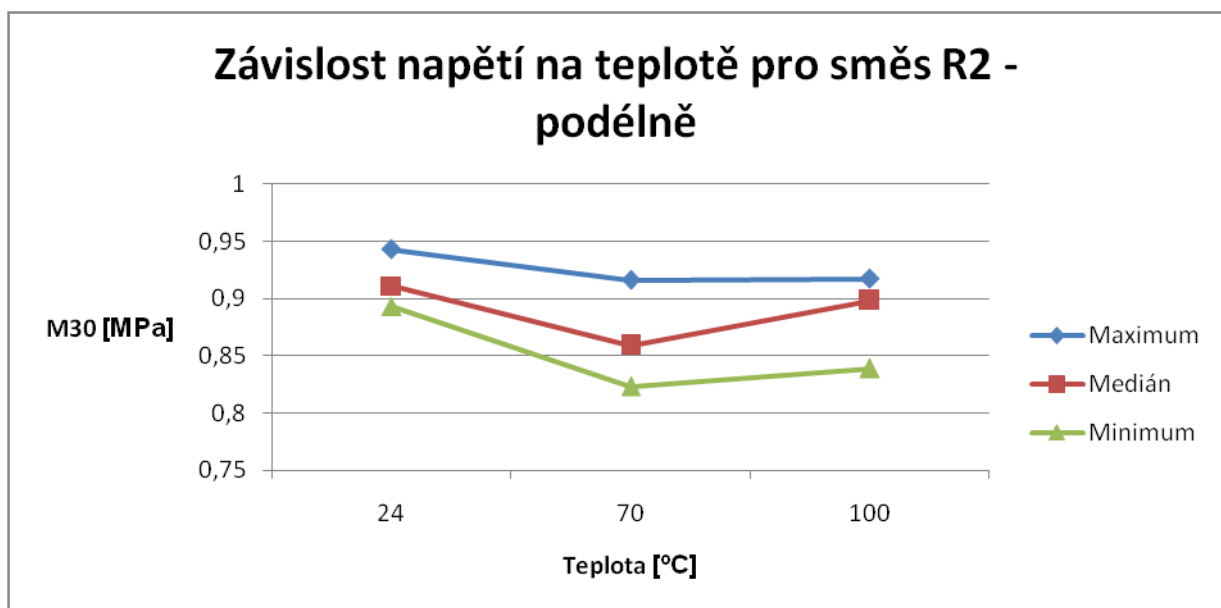
### 6.1.3 DVOUOSÁ NAPJATOST

Tab. 7: Naměřené hodnoty napětí ve dvouosé napjatosti pro směs R1

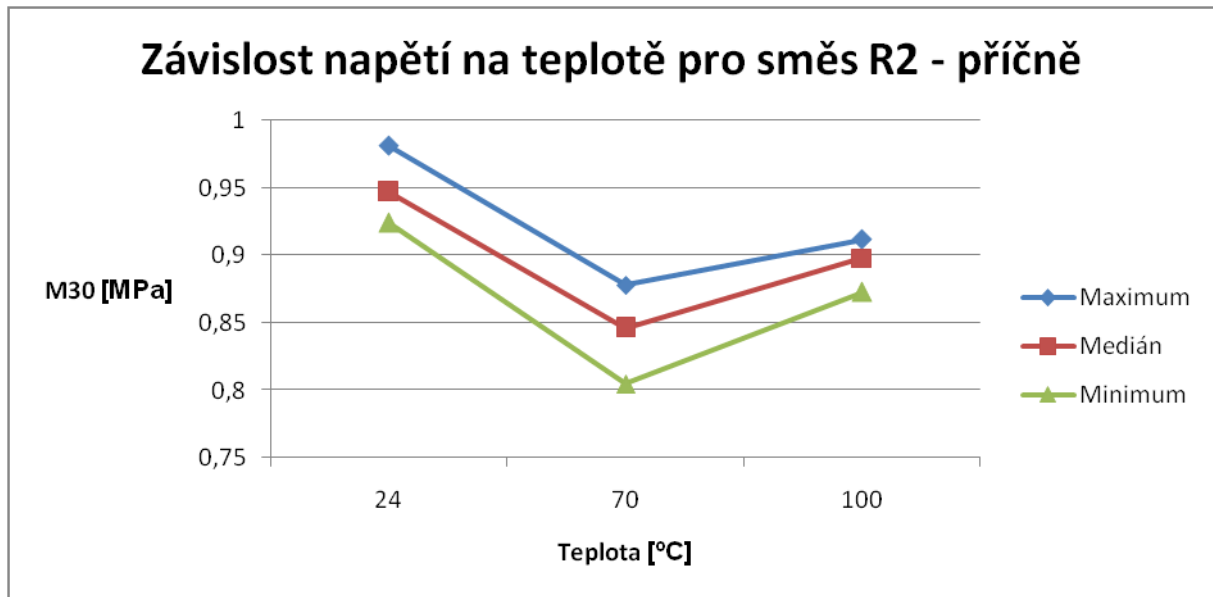
Napětí při poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
R1	1,4935	1,4251	1,1267
Napětí při poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
R1	2,7757	2,3827	2,3508

## 6.2 MATERIÁL R2

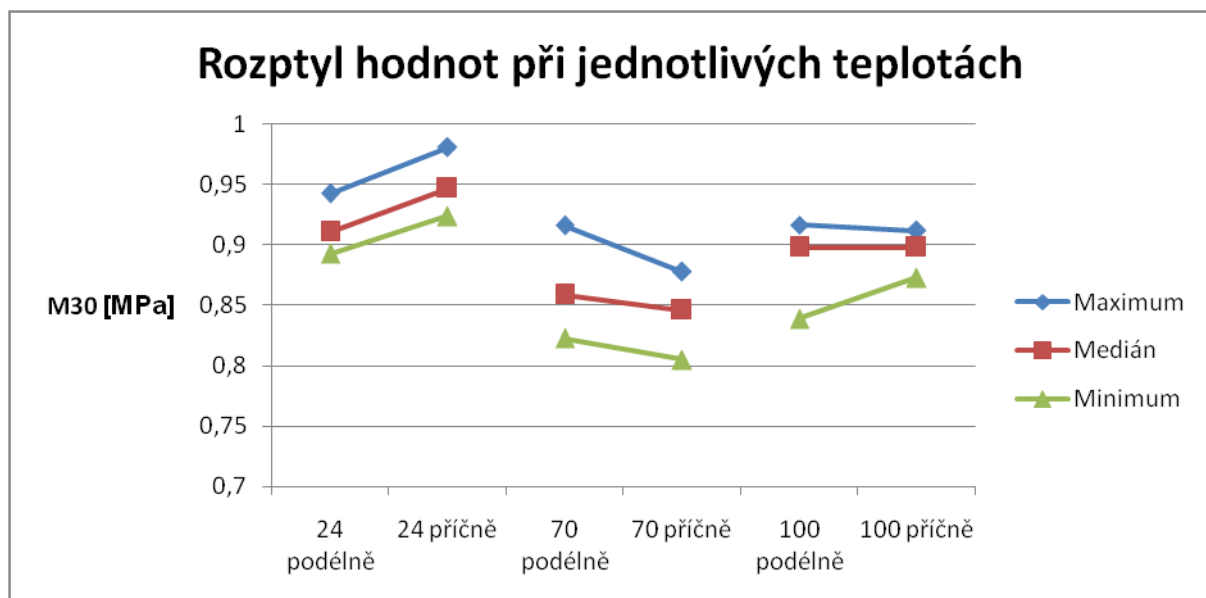
### 6.2.1 TAH



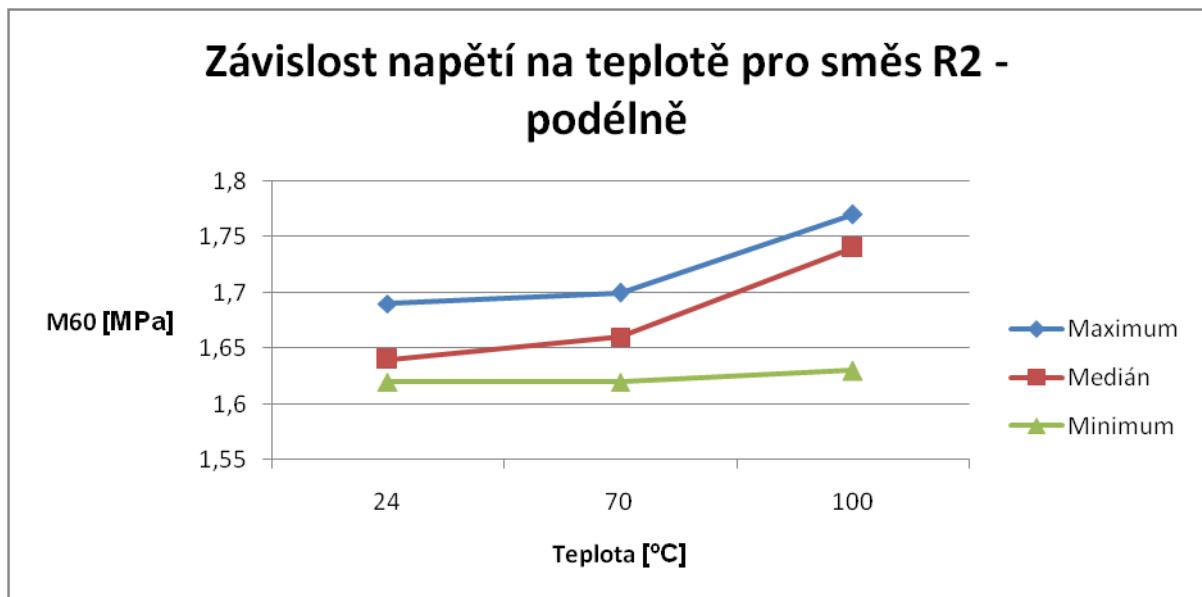
Obr. 18: Směs R2 v podélném směru při poměrném prodloužení 30 %



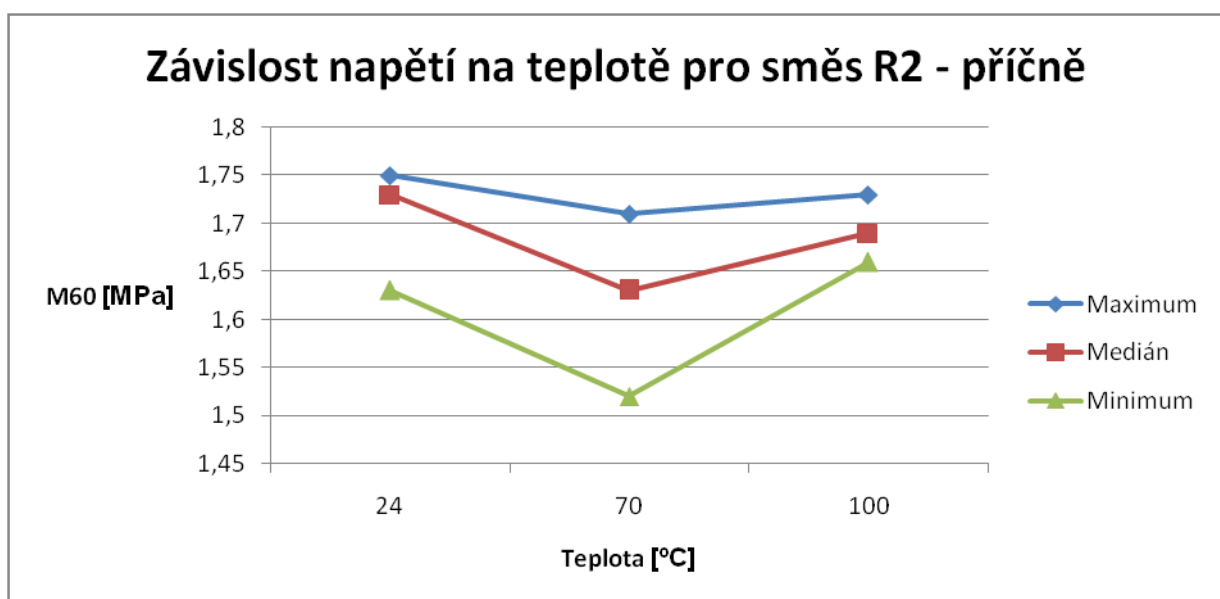
Obr. 19: Směs R2 v příčném směru při poměrném prodloužení 30 %



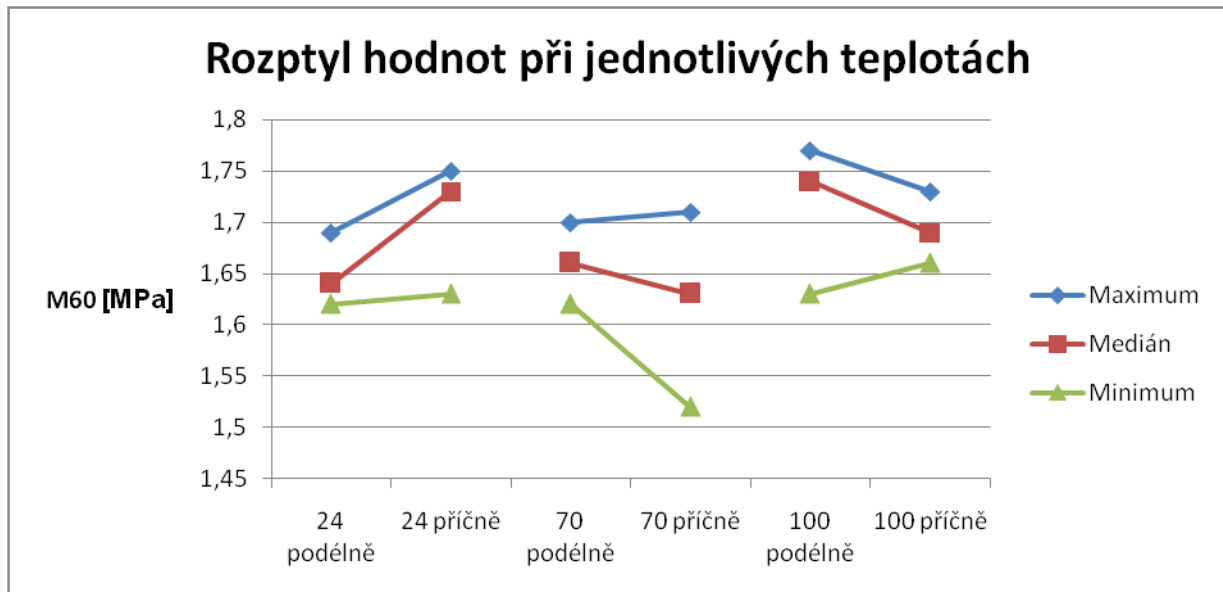
Obr. 20: Rozptyl hodnot napětí ve směsi R2 pro měřené teploty při poměrném prodloužení 30 %



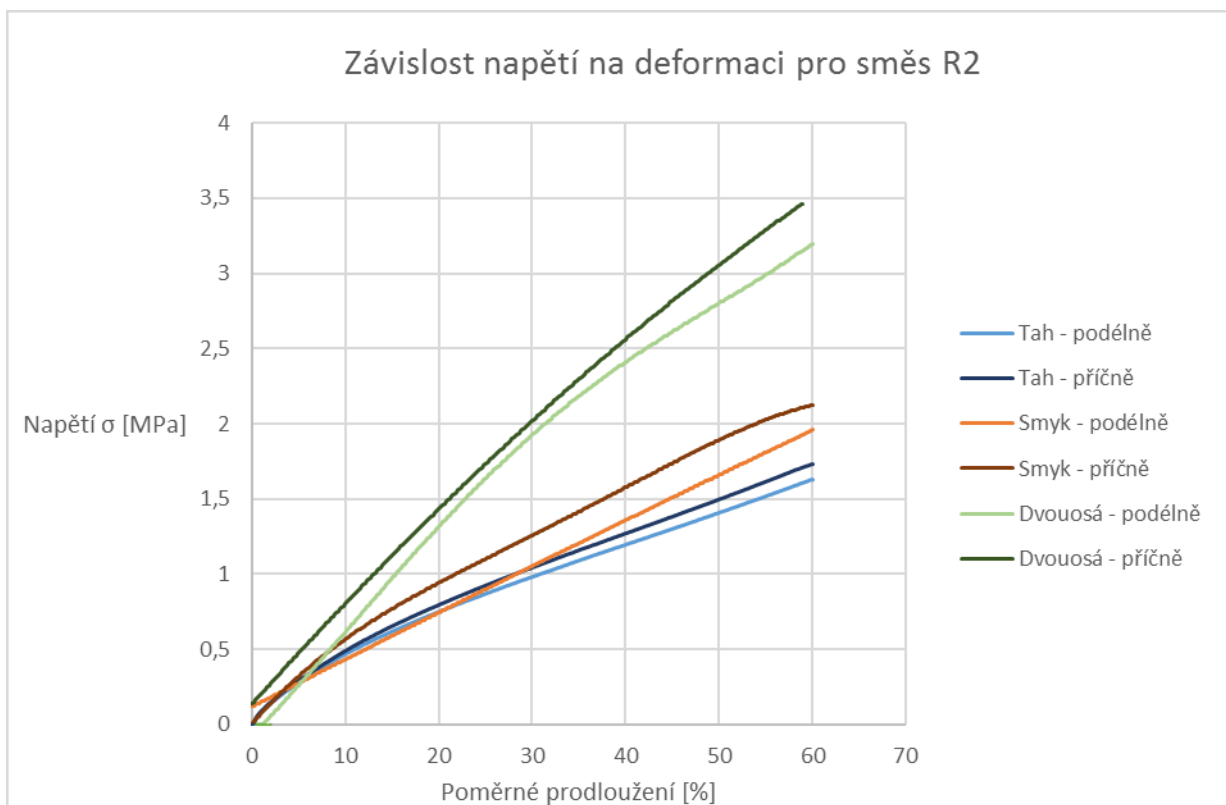
Obr. 21: Směs R2 v podélném směru při poměrném prodloužení 60 %



Obr. 22: Směs R2 v příčném směru při poměrném prodloužení 60 %



Obr. 23: Rozptyl hodnot napětí ve směsi R2 pro měřené teploty při poměrném prodloužení 60 %



Obr. 24: Závislosti napětí na poměrném prodloužení pro všechny provedené zkoušky pro směs R3

Tab. 8: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro směs R2 při poměrném prodloužení 30 %

Napětí při teplotě 24 °C a poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
R2 podélně	0,94	0,91	0,89
R2 příčně	0,98	0,95	0,92
Napětí při teplotě 70 °C a poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
R2 podélně	0,92	0,86	0,82
R2 příčně	0,88	0,85	0,80
Napětí při teplotě 100 °C a poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
R2 podélně	0,92	0,89	0,84
R2 příčně	0,91	0,90	0,87

Tab. 9: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro směs R2 při poměrném prodloužení 60 %

Napětí při teplotě 24 °C a poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
R2 podélně	1,69	1,64	1,62
R2 příčně	1,75	1,73	1,63
Napětí při teplotě 70 °C a poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
R2 podélně	1,7	1,66	1,62
R2 příčně	1,71	1,63	1,52
Napětí při teplotě 100 °C a poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
R2 podélně	1,77	1,74	1,63
R2 příčně	1,73	1,69	1,66

## 6.2.2 ČISTÝ SMYK

Tab. 10: Naměřené hodnoty napětí v čistém smyku pro směs R2

Napětí při poměrném prodloužení $\epsilon = 30 \%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
R2 podélně	1,4242	1,3667	1,1032
R2 příčně	1,5551	1,2233	1,1193
Napětí při poměrném prodloužení $\epsilon = 60 \%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
R2 podélně	2,1337	2,0261	1,9057
R2 příčně	2,3585	2,1504	1,7473

## 6.2.3 DVOUOSÁ NAPJATOST

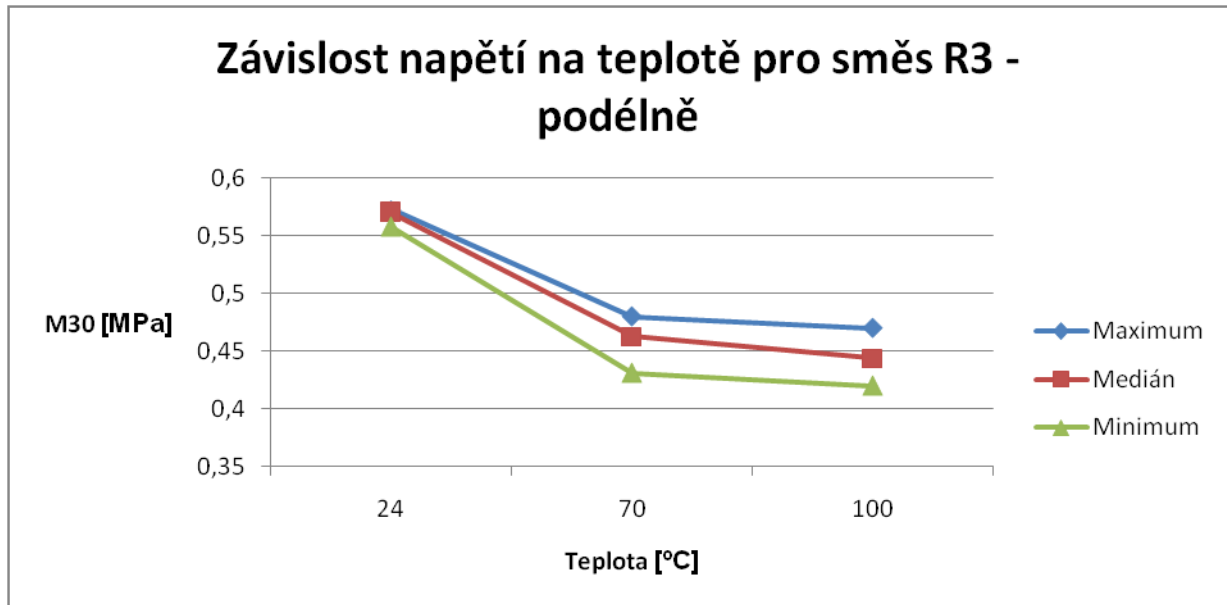
Tab. 11: Naměřené hodnoty napětí ve dvouosé napjatosti pro směs

R2

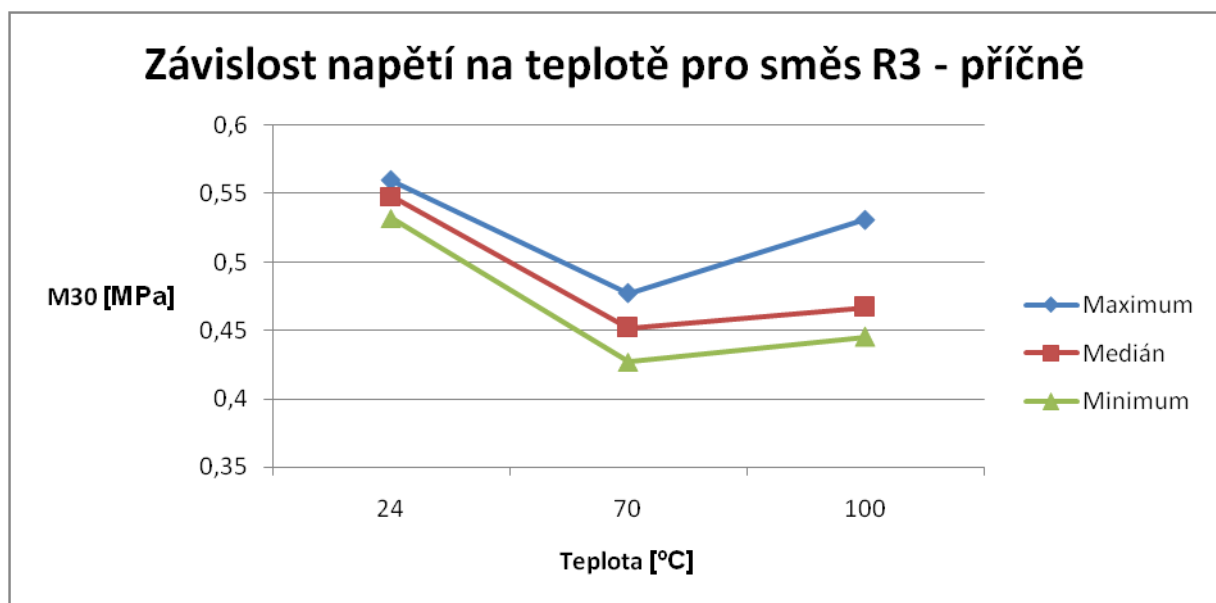
Napětí při poměrném prodloužení $\epsilon = 30 \%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
R2	2,2991	1,7785	1,5205
Napětí při poměrném prodloužení $\epsilon = 60 \%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
R2	3,9797	3,5188	3,3599

## 6.3 MATERIÁL R3

### 6.3.1 TAH

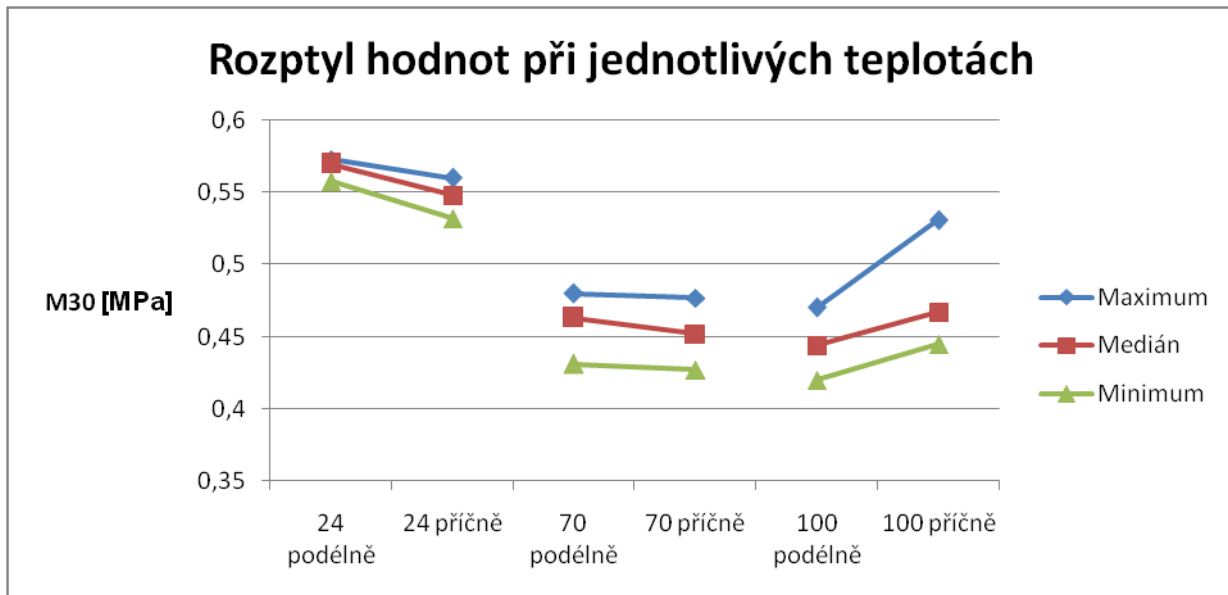


Obr. 25: Směs R3 v podélném směru při poměrném prodloužení 30 %

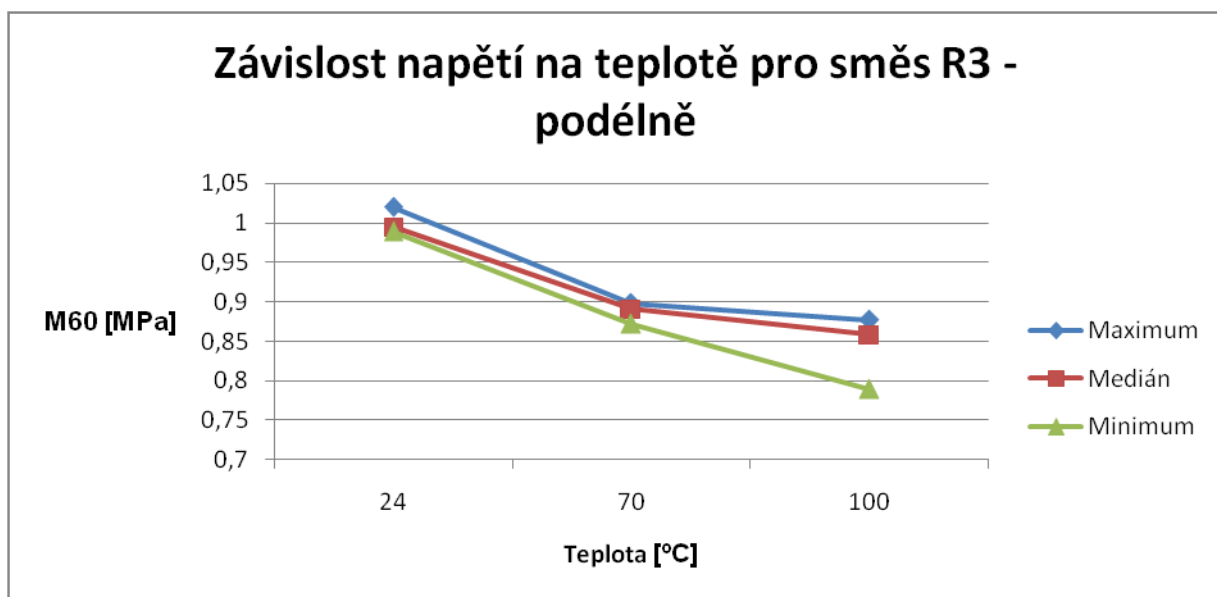


Obr. 26: Směs R3 v příčném směru při poměrném prodloužení 30 %

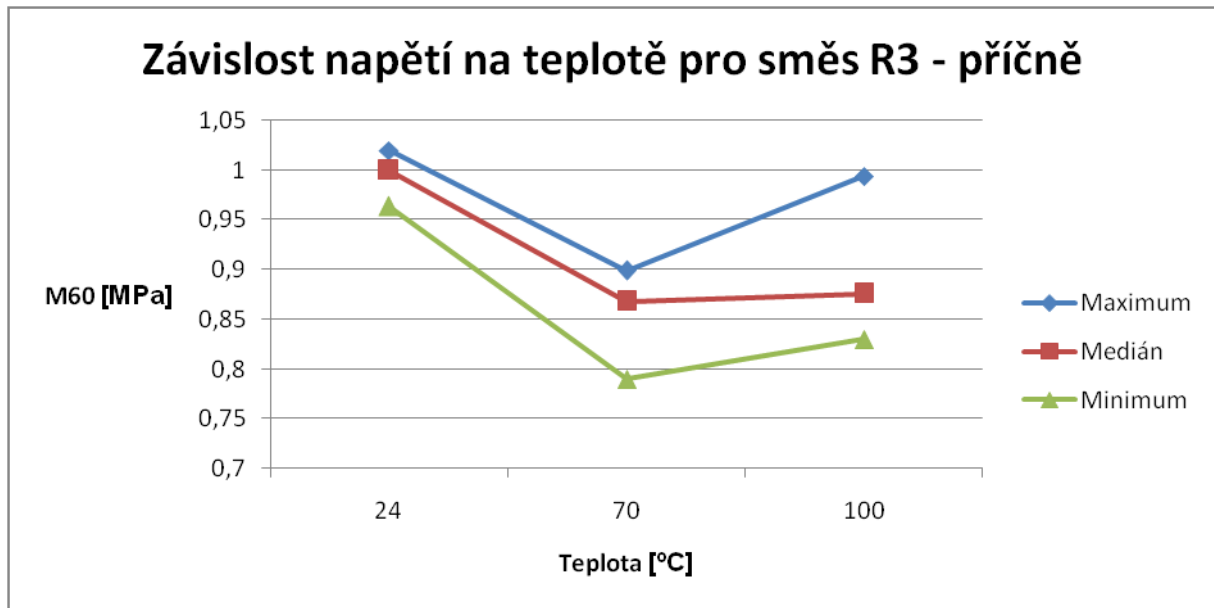




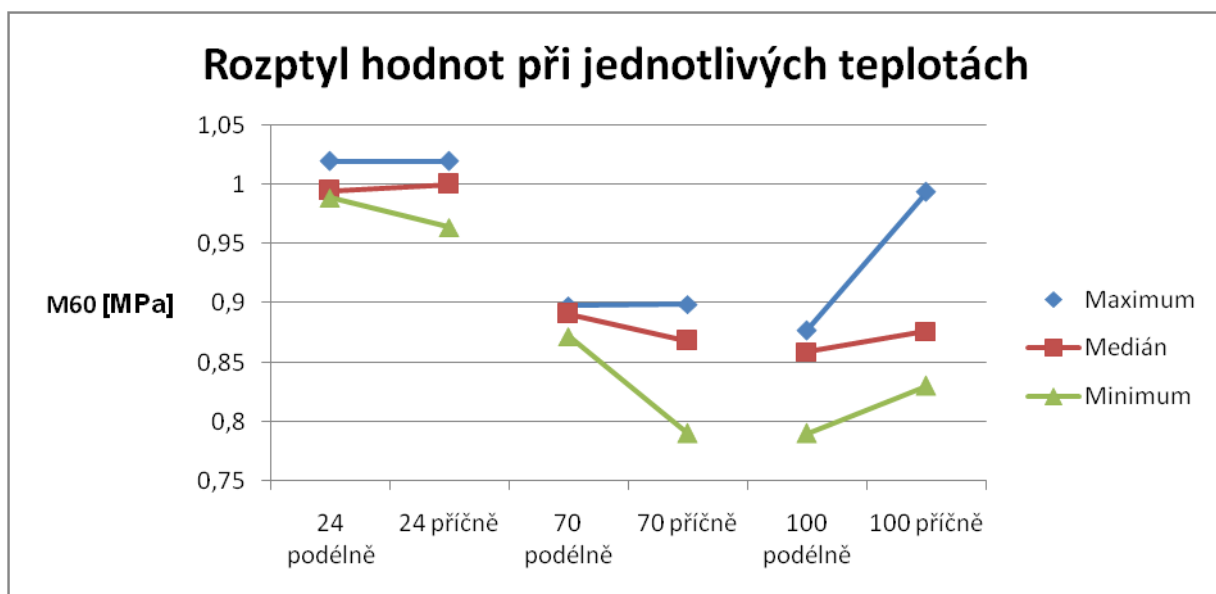
Obr. 27: Rozptyl hodnot napětí ve směsi R3 pro měřené teploty při poměrném prodloužení 30 %



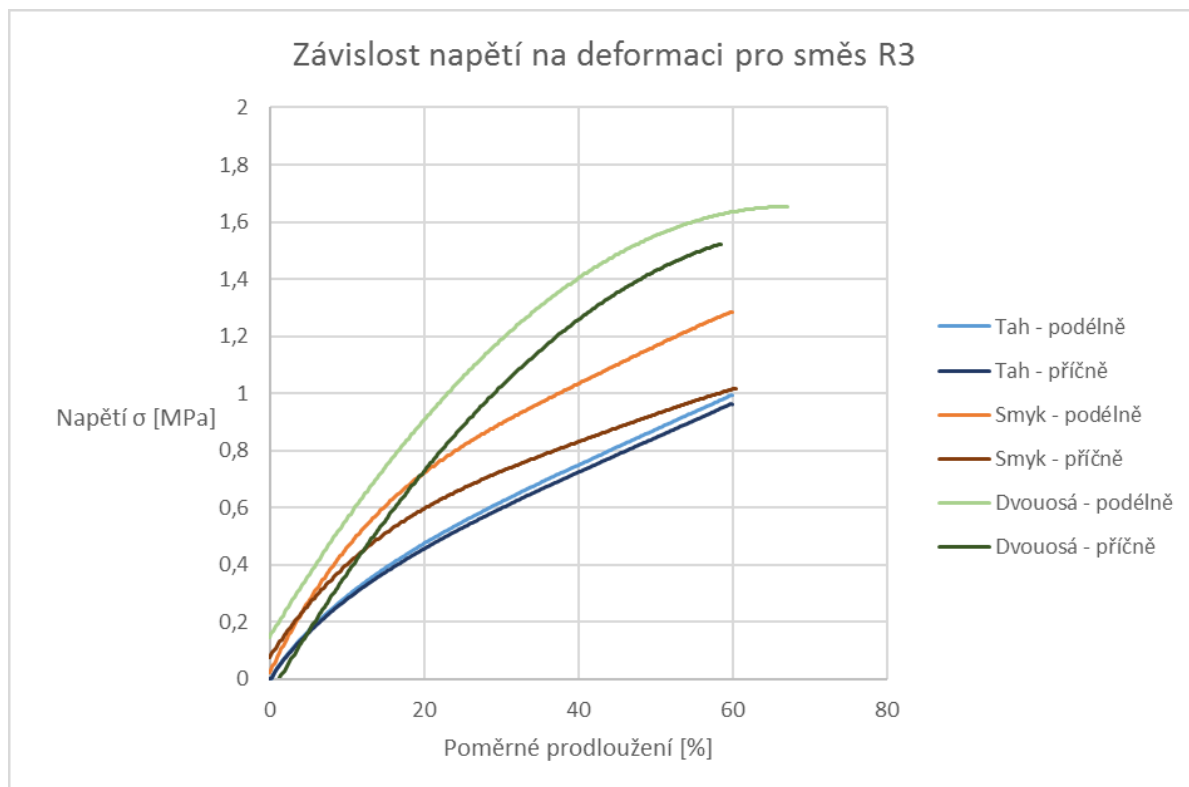
Obr. 28: Směs R3 v podélném směru při poměrném prodloužení 60 %



Obr. 29: Směs R3 v příčném směru při poměrném prodloužení 60 %



Obr. 30: Rozptyl hodnot napětí ve směsi R3 pro měřené teploty při poměrném prodloužení 60 %



*Obr. 31: Závislosti napětí na poměrném prodloužení pro všechny provedené zkoušky pro směs R3*

*Tab. 12: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro směs R3 při poměrném prodloužení 30 %*

Napětí při teplotě 24 °C a poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
R3 podélně	0,57	0,57	0,56
R3 příčně	0,56	0,55	0,53
Napětí při teplotě 70 °C a poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
R3 podélně	0,48	0,46	0,43
R3 příčně	0,48	0,45	0,43
Napětí při teplotě 100 °C a poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
R3 podélně	0,47	0,44	0,42
R3 příčně	0,53	0,47	0,45

Tab. 13: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro směs R3 při poměrném prodloužení 60 %

Napětí při teplotě 24 °C a poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
R3 podélně	1,02	0,99	0,98
R3 příčně	1,02	1,00	0,96
Napětí při teplotě 70 °C a poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
R3 podélně	0,90	0,89	0,87
R3 příčně	0,89	0,86	0,79
Napětí při teplotě 100 °C a poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
R3 podélně	0,88	0,86	0,79
R3 příčně	0,99	0,88	0,83

### 6.3.2 ČISTÝ SMYK

Tab. 14: Naměřené hodnoty napětí v čistém smyku pro směs R3

Napětí při poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
R3 podélně	0,8995	0,8977	0,8537
R3 příčně	0,8948	0,7288	0,6843
Napětí při poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
R3 podélně	1,3330	1,2918	1,2767
R3 příčně	1,2914	1,0146	0,9589

### 6.3.3 DVOUOSÁ NAPJATOST

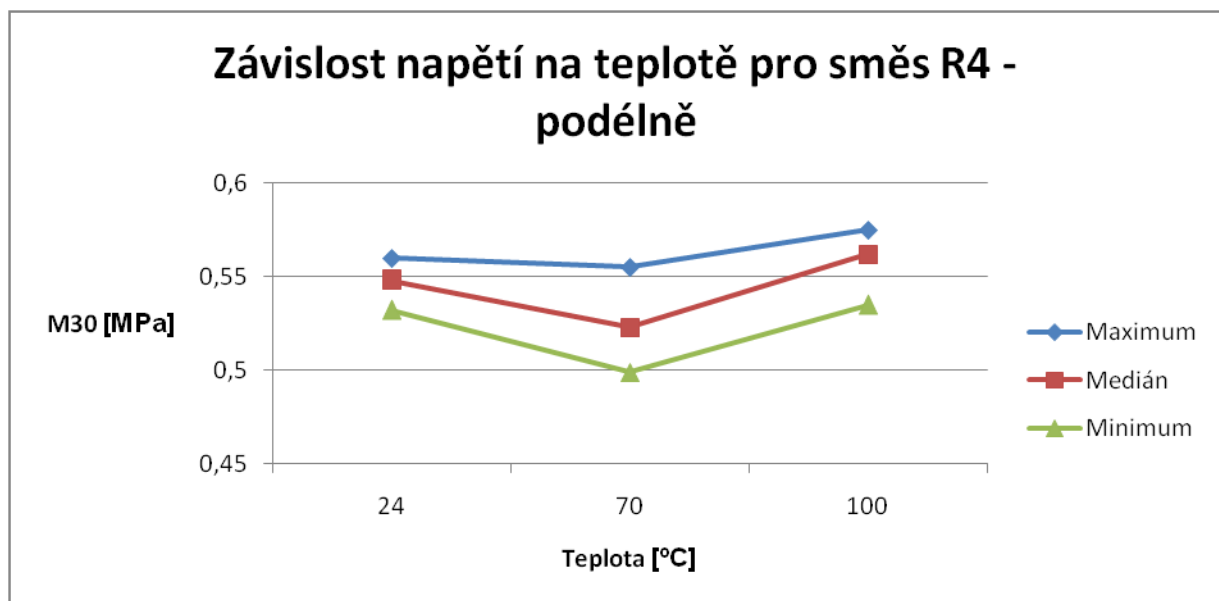
Tab. 15: Naměřené hodnoty napětí ve dvouosé napjatosti pro směs

R3

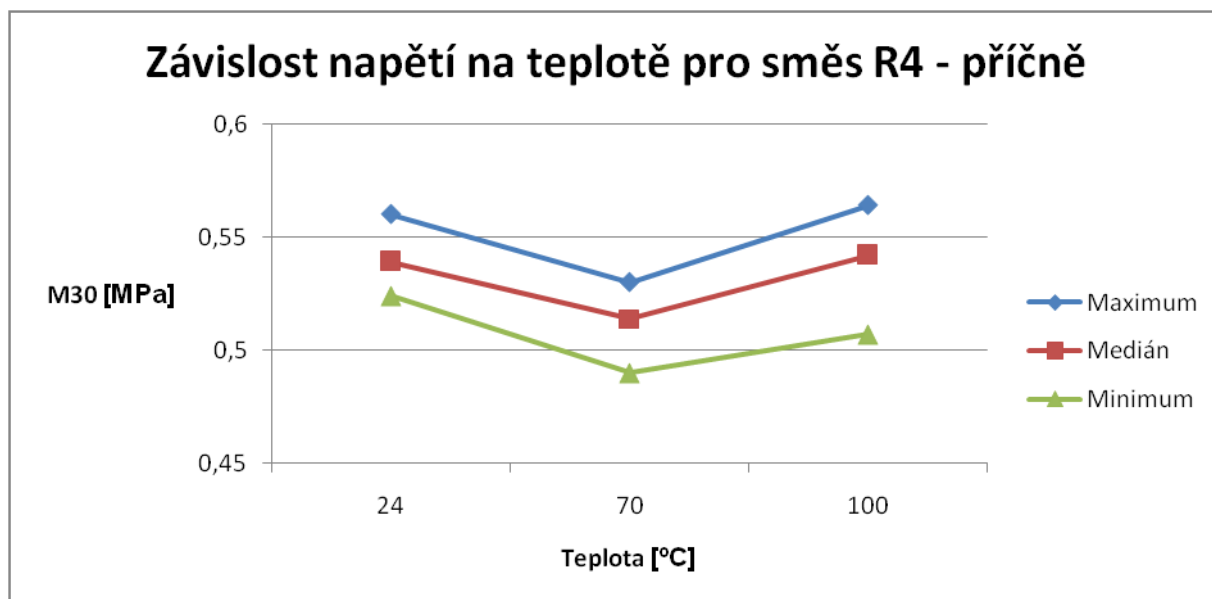
Napětí při poměrném prodloužení $\varepsilon = 30 \%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
R3	1,2460	1,2140	1,1884
Napětí při poměrném prodloužení $\varepsilon = 60 \%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
R3	2,0644	1,9710	1,7127

## 6.4 MATERIÁL R4

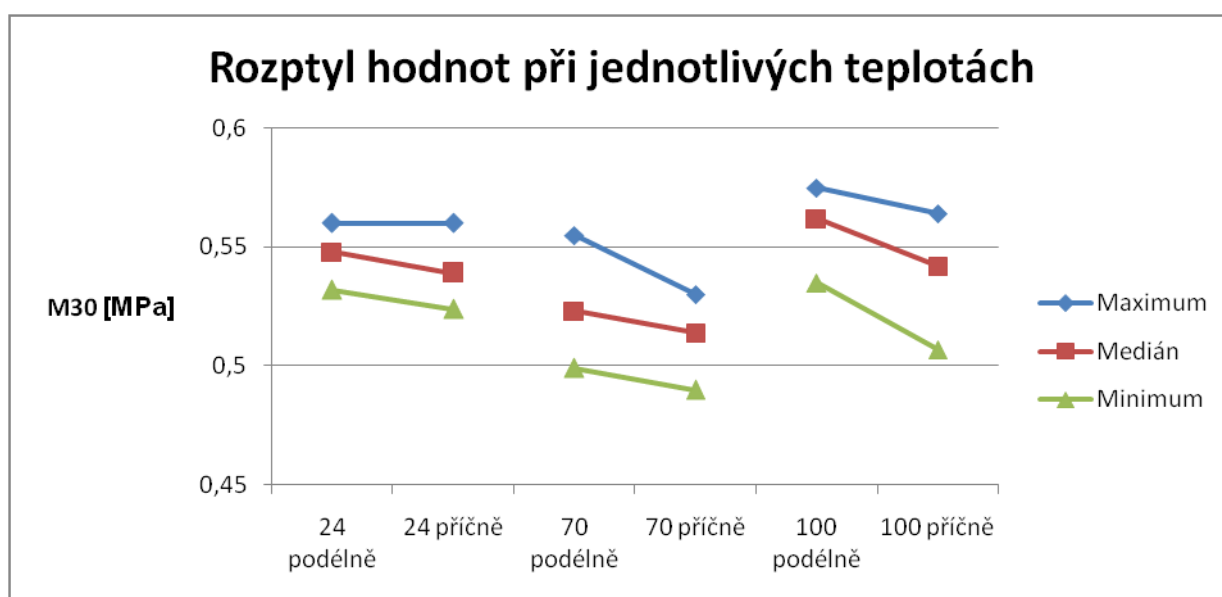
### 6.4.1 TAH



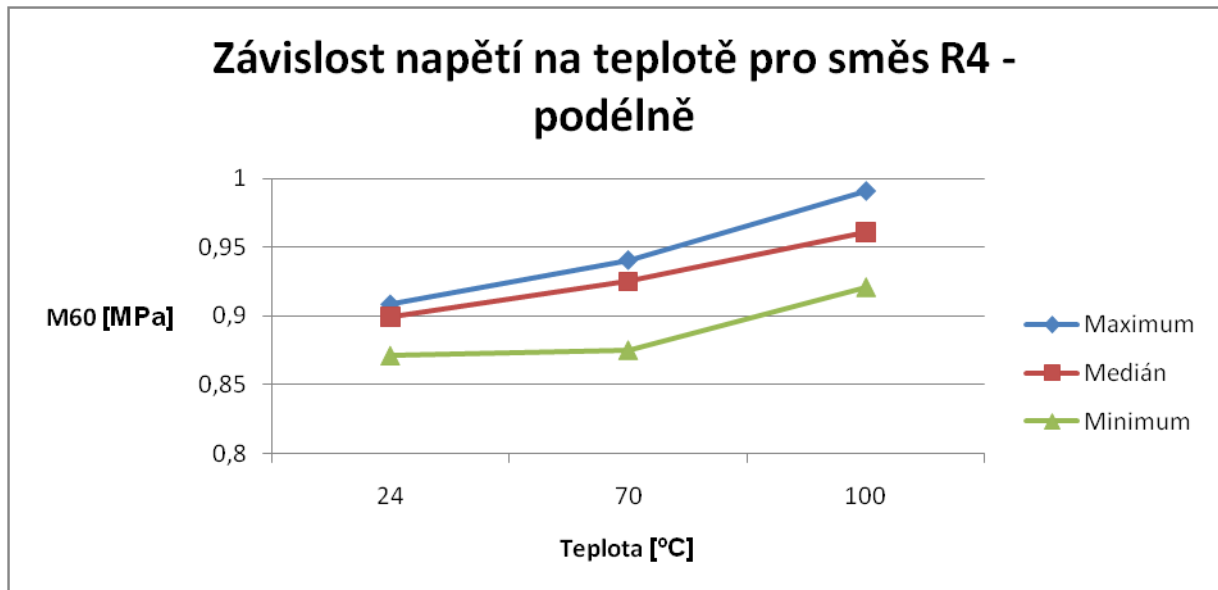
Obr. 32: Směs R4 v podélném směru při poměrném prodloužení 30 %



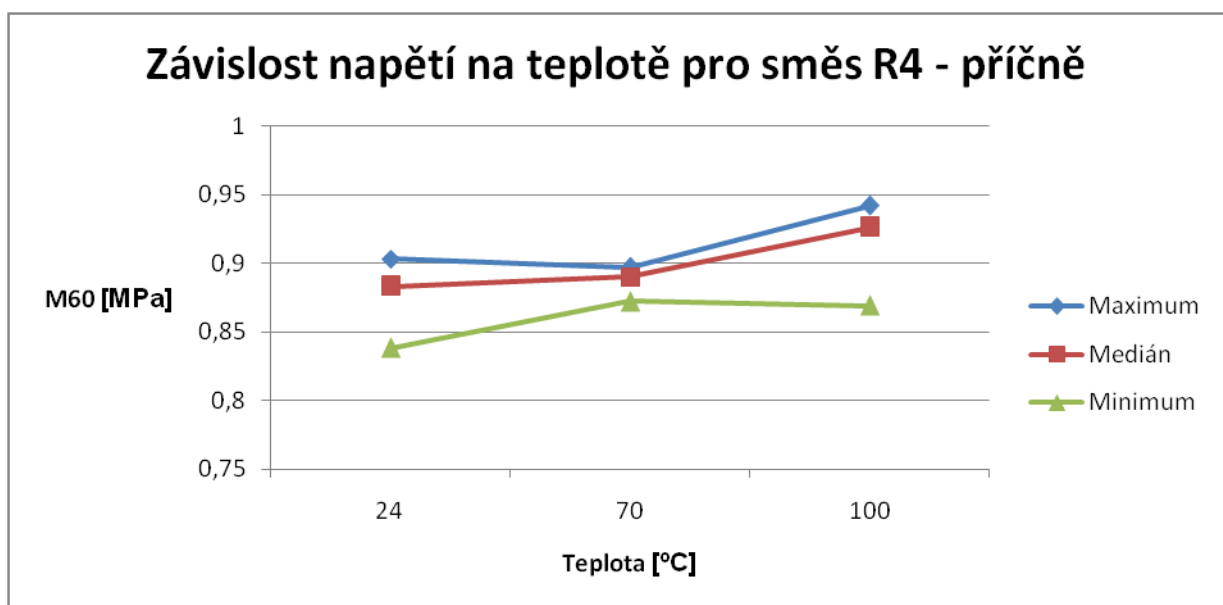
Obr. 33: Směs R4 v příčném směru při poměrném prodloužení 30 %



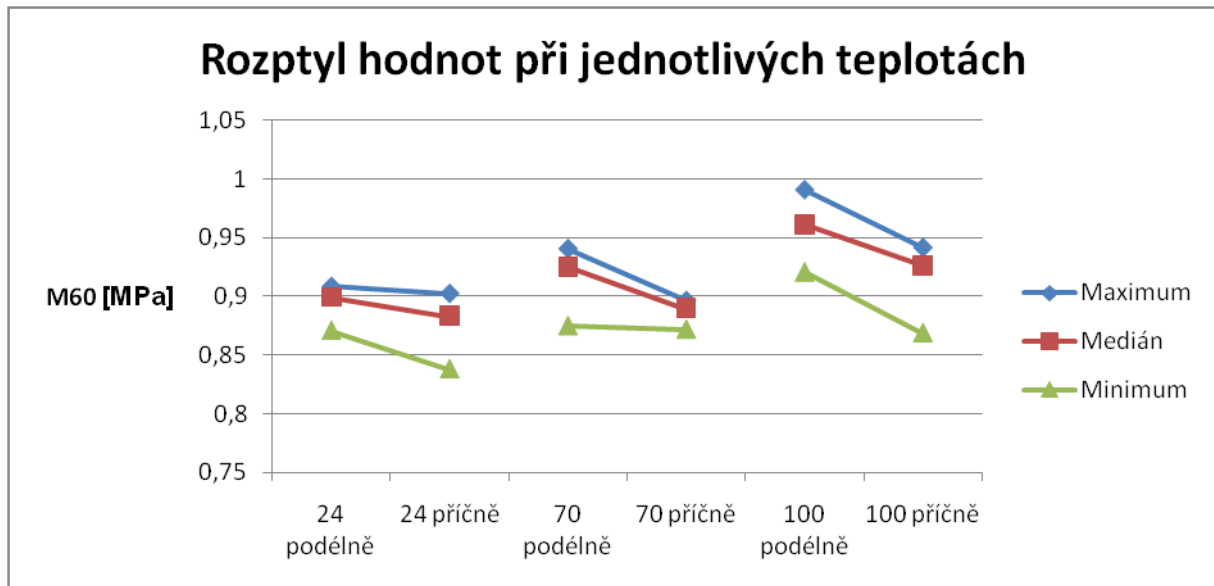
Obr. 34: Rozptyl hodnot napětí ve směsi R4 pro měřené teploty při poměrném prodloužení 30 %



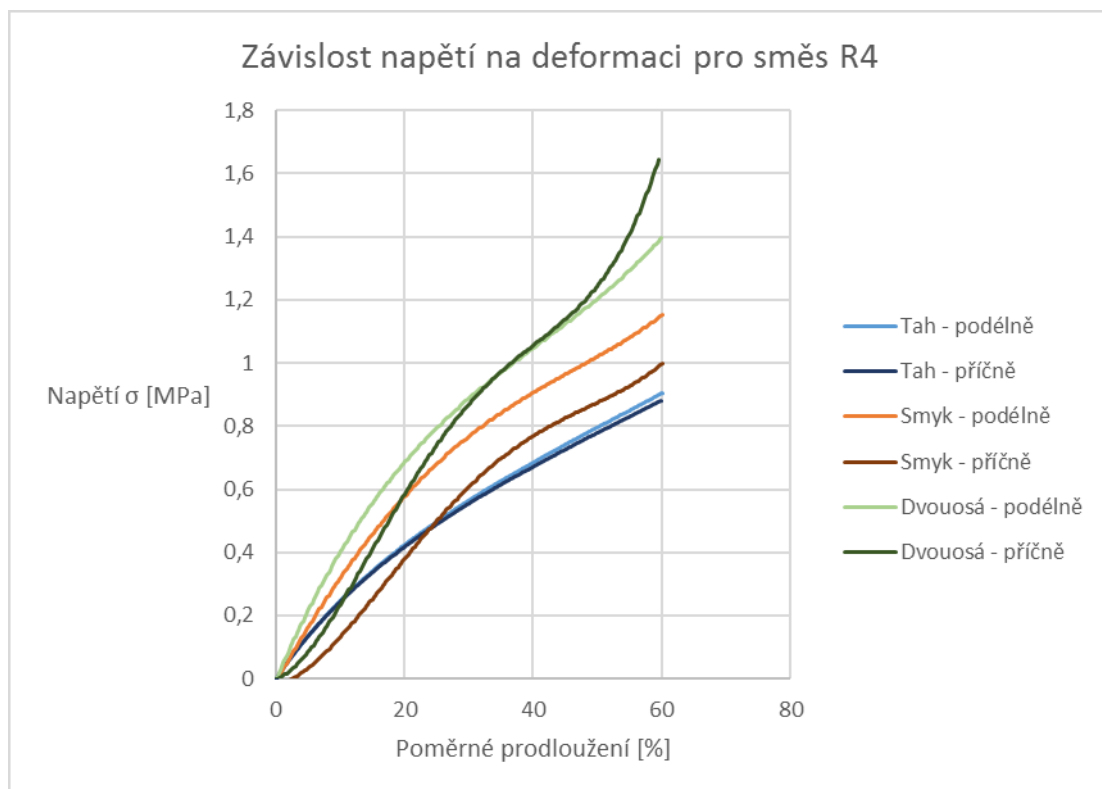
Obr. 35: Směs R4 v podélném směru při poměrném prodloužení 60 %



Obr. 36: Směs R4 v příčném směru při poměrném prodloužení 60 %



Obr. 37: Rozptyl hodnot napětí ve směsi R4 pro měřené teploty při poměrném prodloužení 60 %



Obr. 38: Závislosti napětí na poměrném prodloužení pro všechny provedené zkoušky pro směs R4



Tab. 16: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro směs R4 při poměrném prodloužení 30 %

Napětí při teplotě 24 °C a poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
R4 podélně	0,56	0,55	0,53
R4 příčně	0,56	0,54	0,52
Napětí při teplotě 70 °C a poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
R4 podélně	0,56	0,52	0,50
R4 příčně	0,53	0,51	0,49
Napětí při teplotě 100 °C a poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
R4 podélně	0,58	0,56	0,54
R4 příčně	0,56	0,54	0,51

Tab. 17: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro směs R4 při poměrném prodloužení 60 %

Napětí při teplotě 24 °C a poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
R4 podélně	0,91	0,9	0,87
R4 příčně	0,90	0,88	0,84
Napětí při teplotě 70 °C a poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
R4 podélně	0,94	0,93	0,88
R4 příčně	0,90	0,89	0,87
Napětí při teplotě 100 °C a poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
R4 podélně	0,99	0,96	0,92
R4 příčně	0,94	0,93	0,87

## 6.4.2 ČISTÝ SMYK

Tab. 18: Naměřené hodnoty napětí v čistém smyku pro směs R4

Napětí při poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
R4 podélně	0,8045	0,7637	0,5516
R4 příčně	0,8115	0,7500	0,5969
Napětí při poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
R4 podélně	1,1923	1,1353	0,9681
R4 příčně	1,1737	1,1155	0,9809

## 6.4.3 DVOUOSÁ NAPJATOST

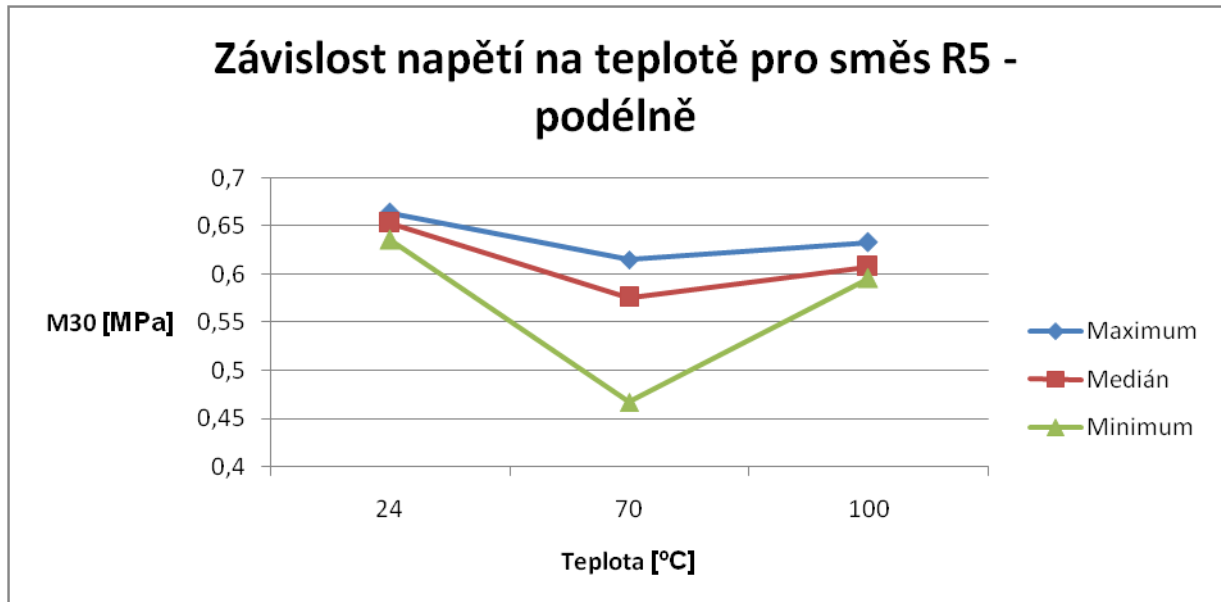
Tab. 19: Naměřené hodnoty napětí ve dvouosé napjatosti pro směs

R4

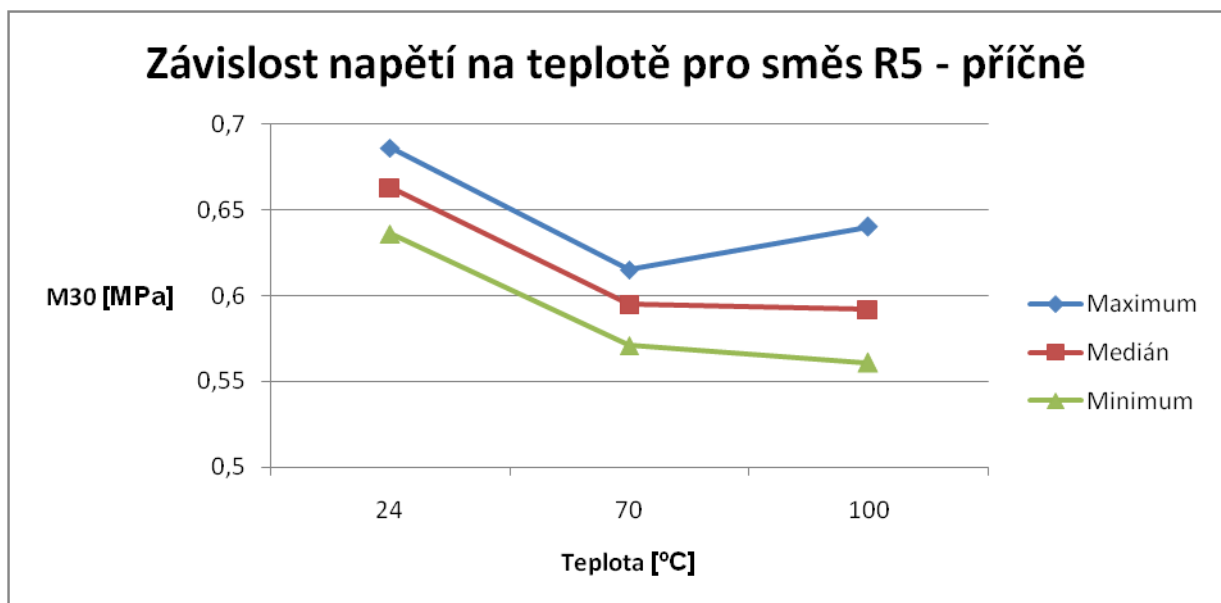
Napětí při poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
R4	1,0225	0,9078	0,8706
Napětí při poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
R4	1,4550	1,3883	1,3553

## 6.5 MATERIÁL R5

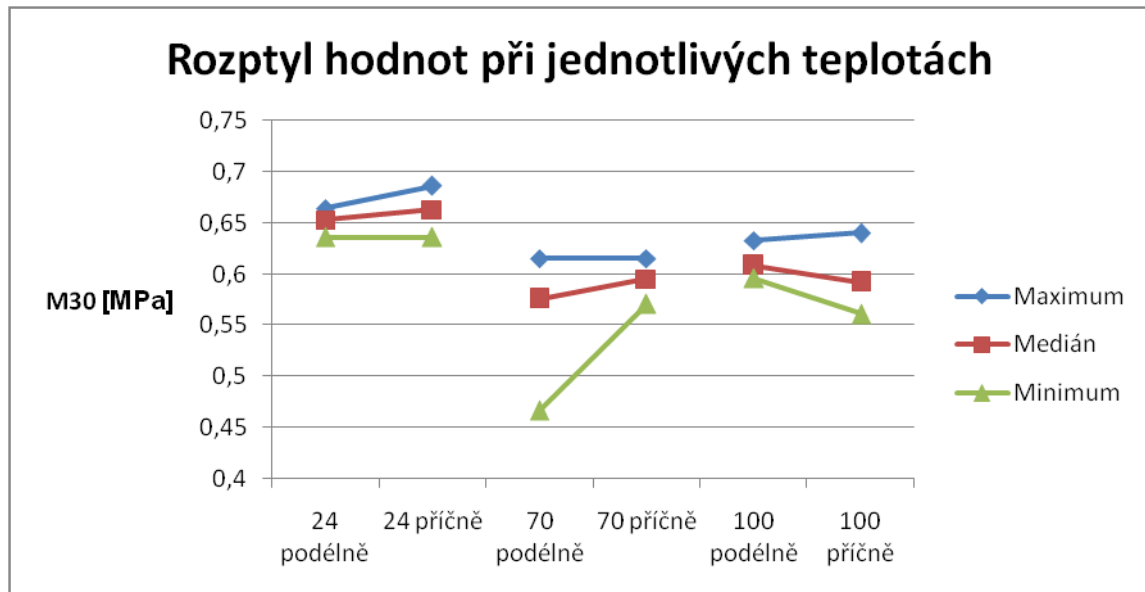
### 6.5.1 TAH



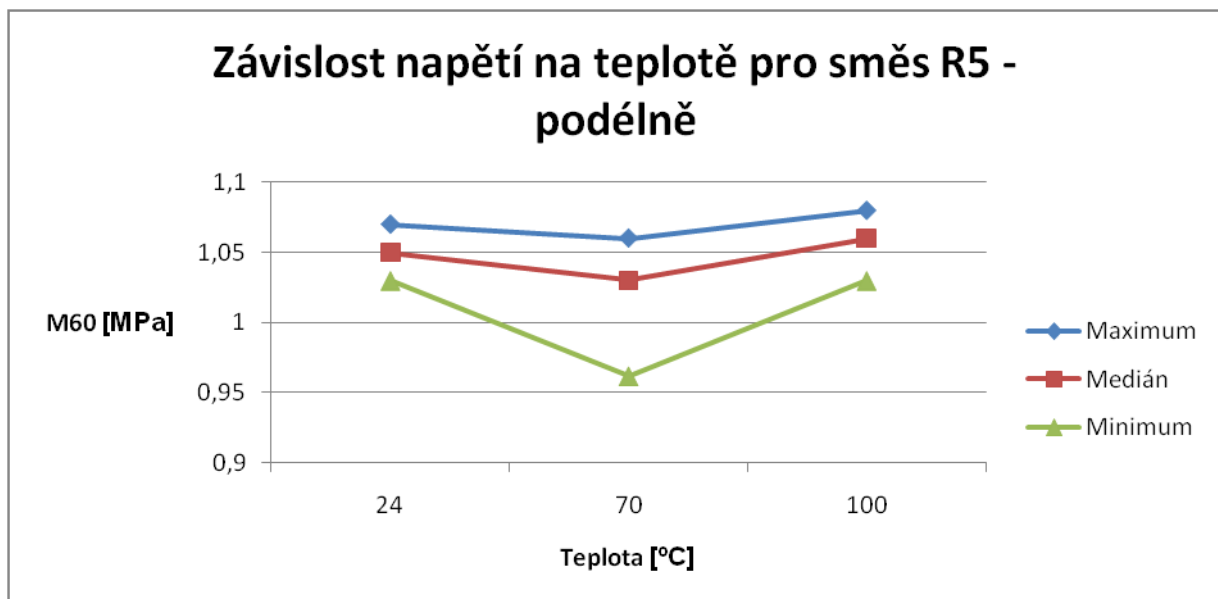
Obr. 39: Směs R5 v podélném směru při poměrném prodloužení 30 %



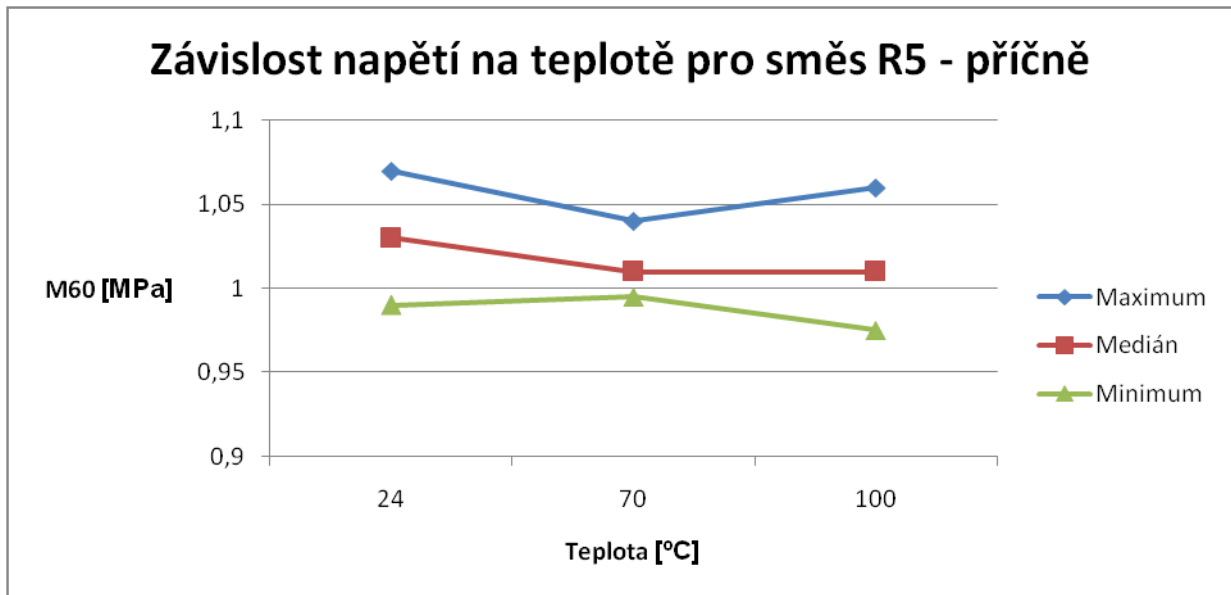
Obr. 40: Směs R5 v příčném směru při poměrném prodloužení 30 %



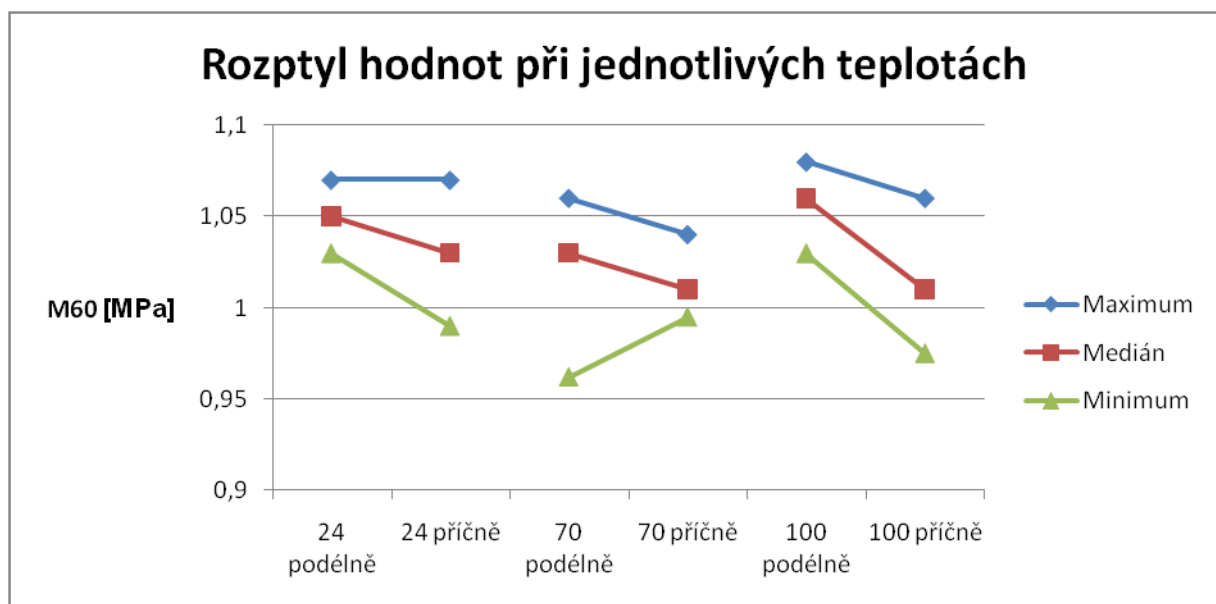
Obr. 41: Rozptyl hodnot napětí ve směsi R5 pro měřené teploty při poměrném prodloužení 30 %



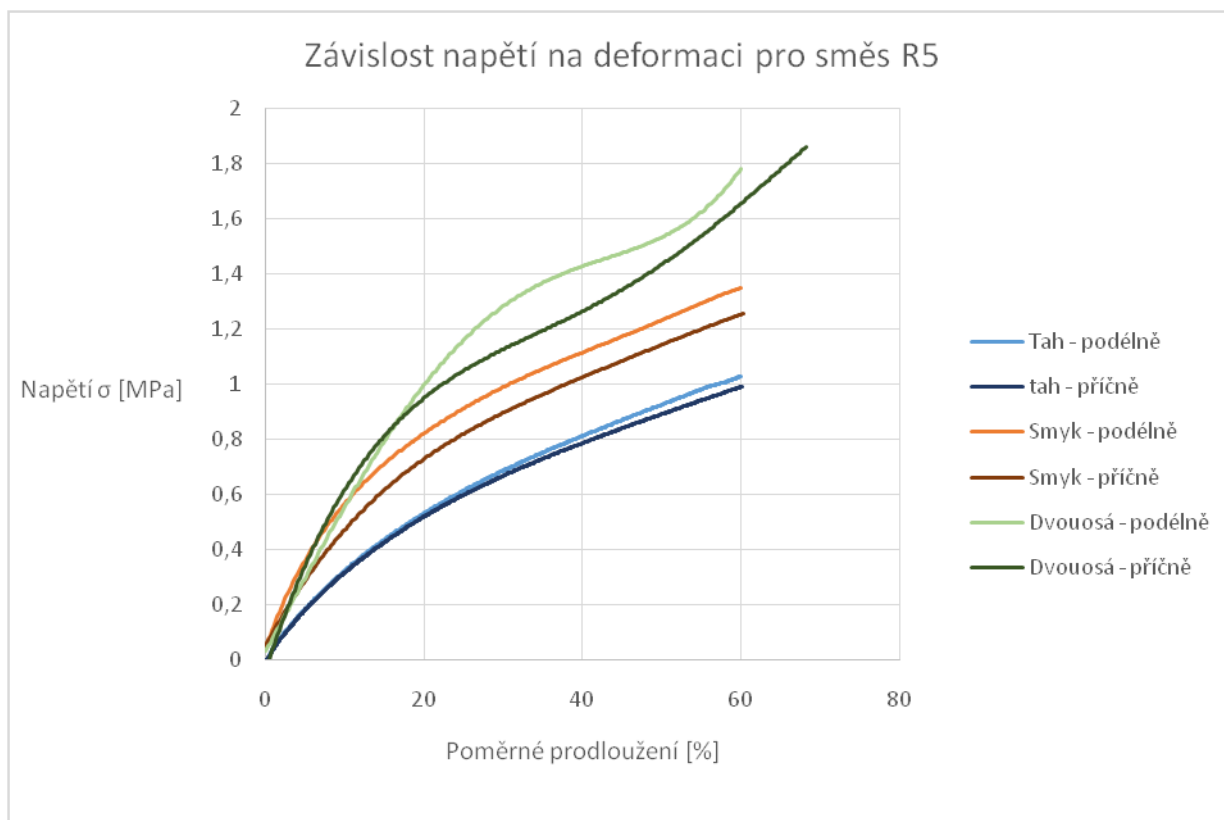
Obr. 42: Směs R5 v podélném směru při poměrném prodloužení 60 %



Obr. 43: Směs R5 v příčném směru při poměrném prodloužení 60 %



Obr. 44: Rozptyl hodnot napětí ve směsi R5 pro měřené teploty při poměrném prodloužení 60 %



*Obr. 45: Závislosti napětí na poměrném prodloužení pro všechny provedené zkoušky pro směs R5*

*Tab. 20: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro směs R5 při poměrném prodloužení  $\epsilon = 30\%$*

Napětí při teplotě 24 °C a poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
R5 podélně	0,66	0,65	0,64
R5 příčně	0,69	0,66	0,64
Napětí při teplotě 70 °C a poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
R5 podélně	0,62	0,58	0,47
R5 příčně	0,62	0,60	0,57
Napětí při teplotě 100 °C a poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
R5 podélně	0,63	0,61	0,60
R5 příčně	0,64	0,59	0,56

Tab. 21: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro směs R5 při poměrném prodloužení  $\epsilon = 60\%$

Napětí při teplotě 24 °C a poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
R5 podélně	1,07	1,05	1,03
R5 příčně	1,07	1,03	0,99
Napětí při teplotě 70 °C a poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
R5 podélně	1,06	1,03	0,96
R5 příčně	1,04	1,01	0,99
Napětí při teplotě 100 °C a poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
R5 podélně	1,08	1,06	1,03
R5 příčně	1,06	1,01	0,98

## 6.5.2 ČISTÝ SMYK

Tab. 22: Naměřené hodnoty napětí v čistém smyku pro směs R5

Napětí při poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
R5 podélně	0,9932	0,9427	0,8540
R5 příčně	0,9522	0,9244	0,8933
Napětí při poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
R5 podélně	1,3577	1,3085	1,2223
R5 příčně	1,3327	1,2919	1,2577

### 6.5.3 DVOUOSÁ NAPJATOST

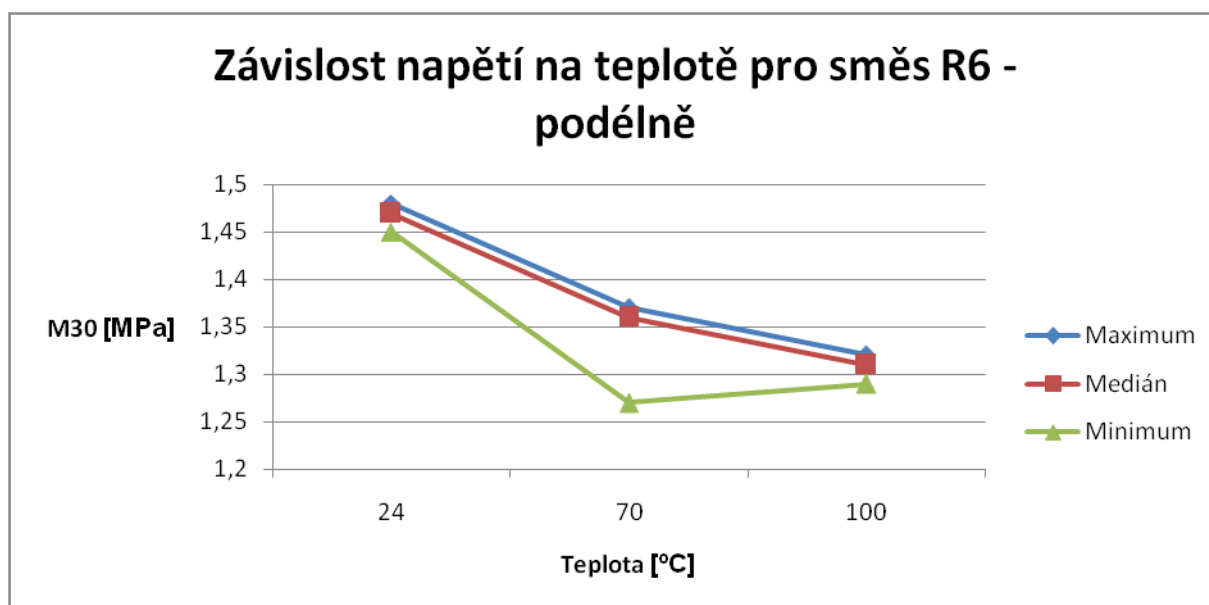
Tab. 23: Naměřené hodnoty napětí ve dvouosé napjatosti pro směs

R5

Napětí při poměrném prodloužení $\varepsilon = 30 \%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
R5	1,3266	1,2208	1,1052
Napětí při poměrném prodloužení $\varepsilon = 60 \%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
R5	1,8382	1,8217	1,7427

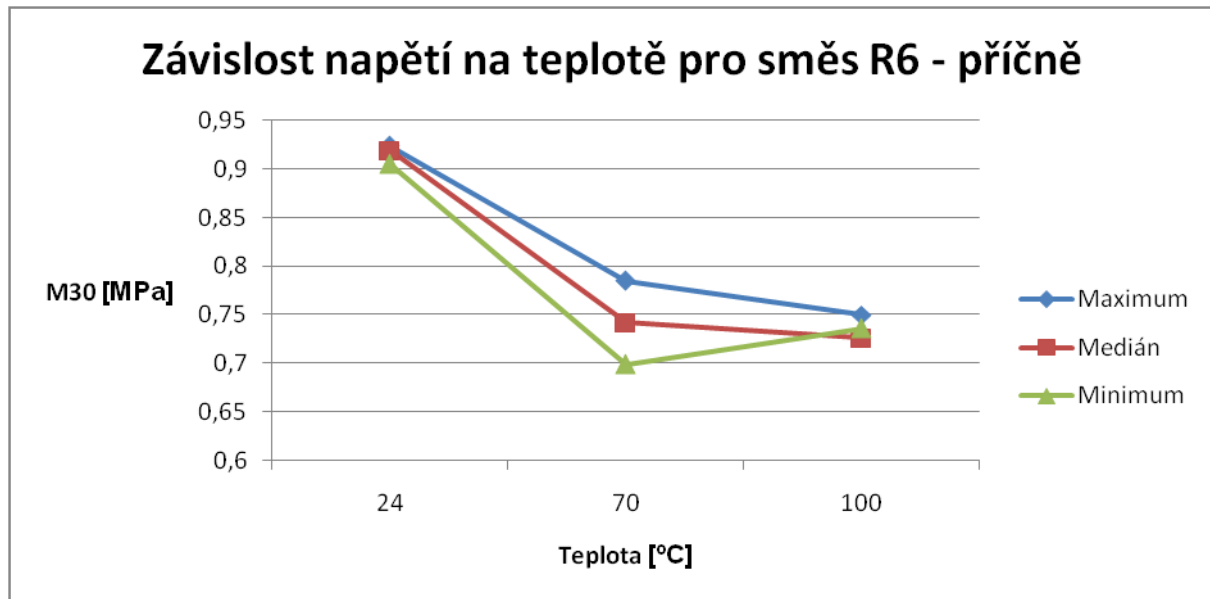
## 6.6 MATERIÁL R6

### 6.6.1 TAH

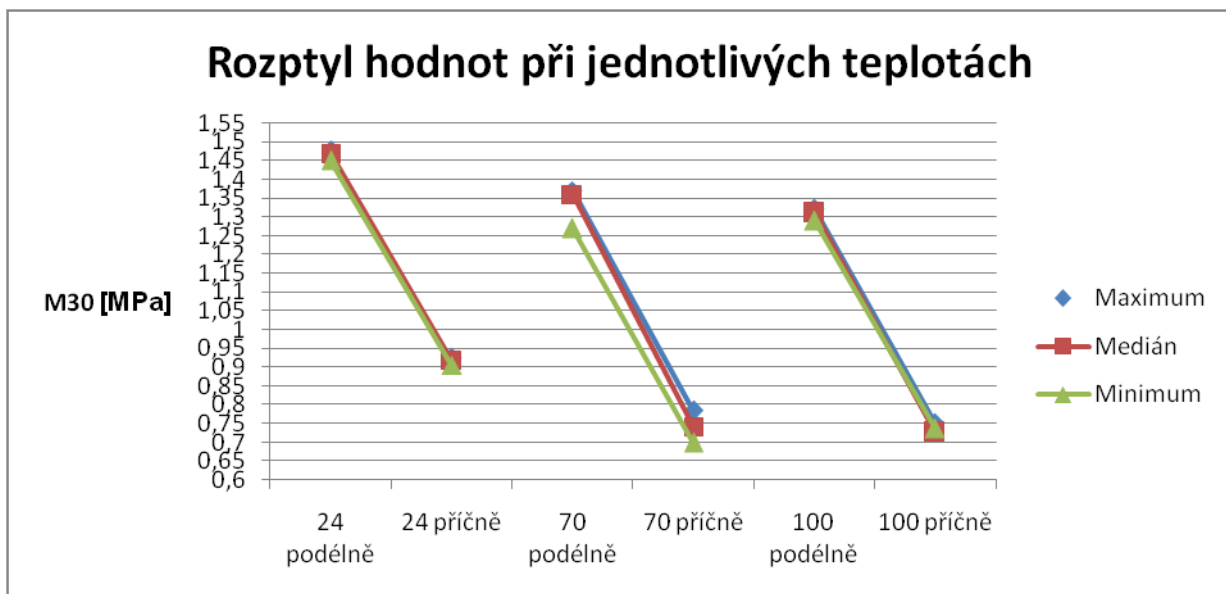


Obr. 46: Směs R6 v podélném směru při poměrném prodloužení 30 %

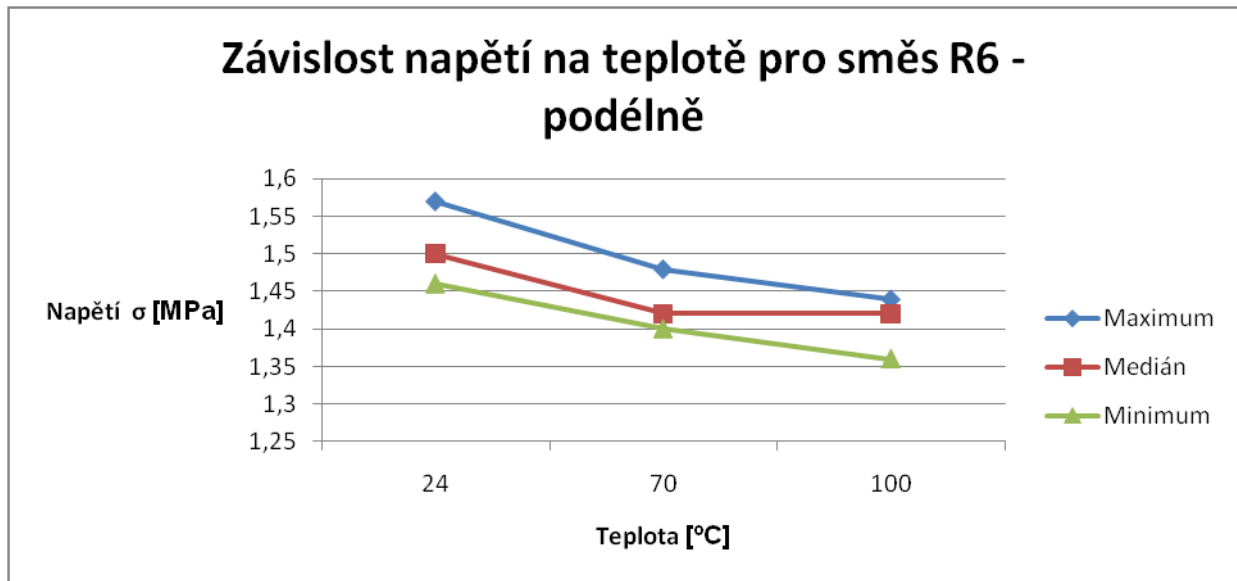




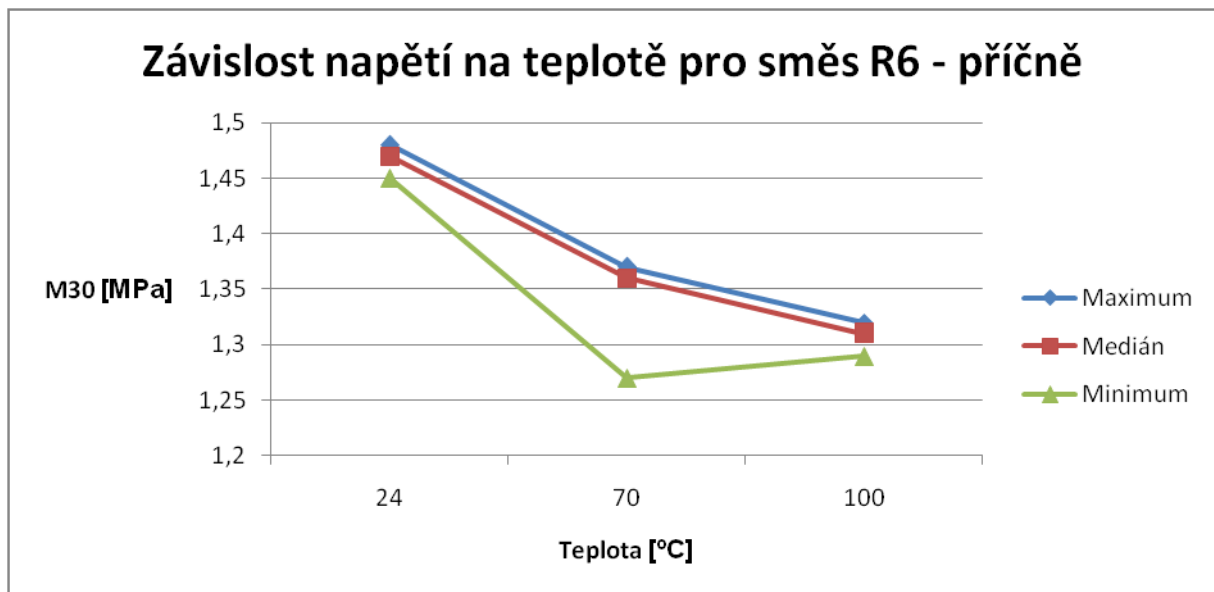
Obr. 47: Směs R6 v příčném směru při poměrném prodloužení 30 %



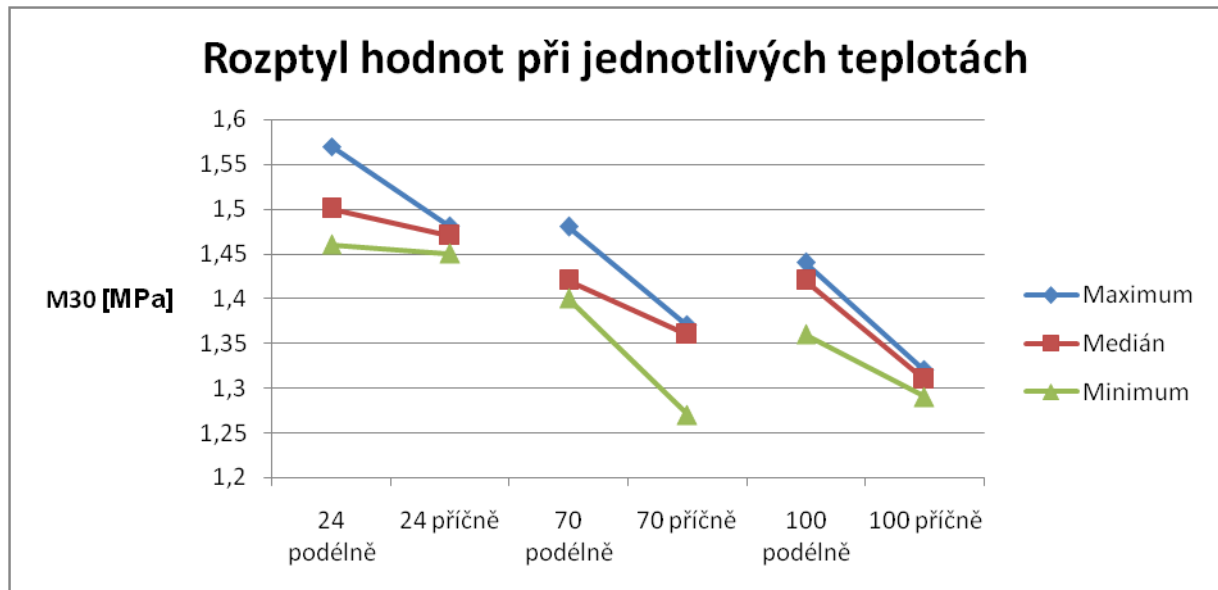
Obr. 48: Rozptyl hodnot napětí ve směsi R6 pro měřené teploty při poměrném prodloužení 30 %



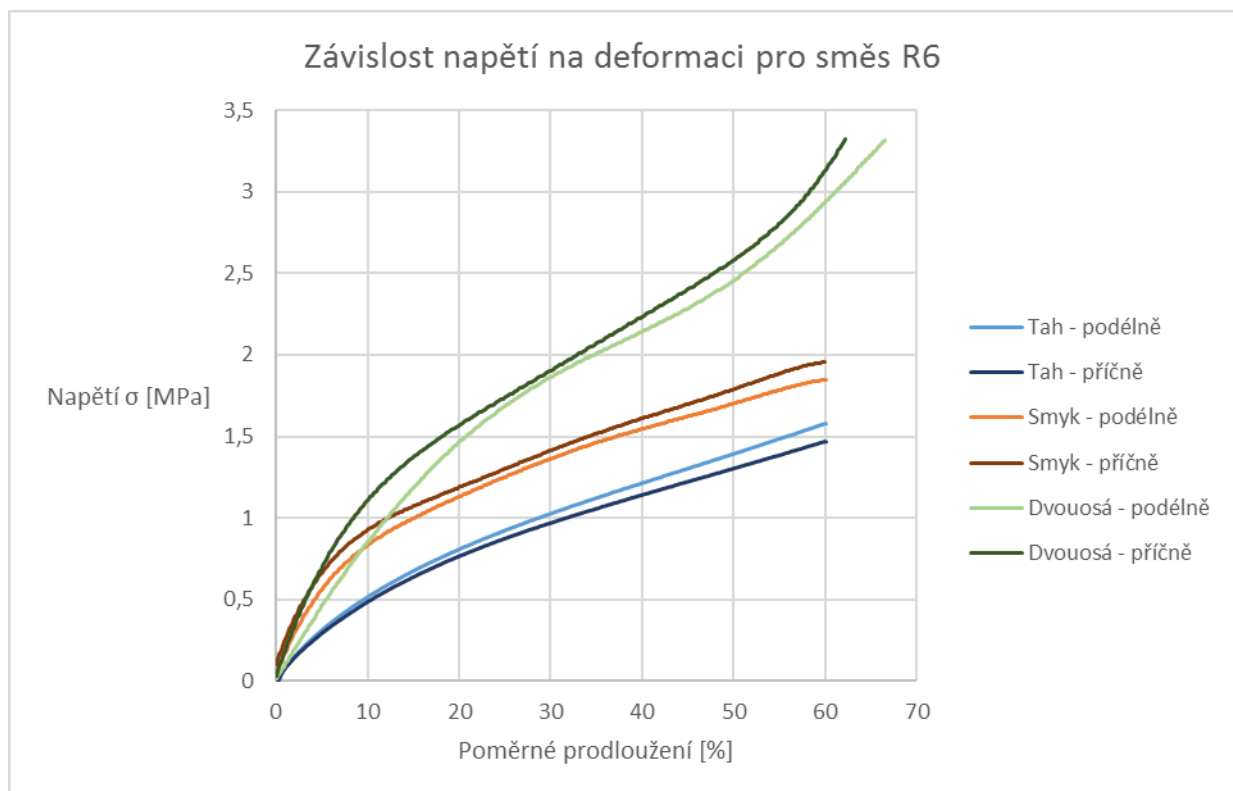
Obr. 49: Směs R6 v podélném směru při poměrném prodloužení 60 %



Obr. 50: Směs R6 v příčném směru při poměrném prodloužení 60 %



Obr. 51: Rozptyl hodnot napětí ve směsi R6 pro měřené teploty při poměrném prodloužení 60 %



Obr. 52: Závislosti napětí na poměrném prodloužení pro všechny provedené zkoušky pro směs R6

Tab. 24: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro směs R6 při poměrném prodloužení 30 %

Napětí při teplotě 24 °C a poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
R6 podélně	1,48	1,47	1,45
R6 příčně	0,92	0,92	0,91
Napětí při teplotě 70 °C a poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
R6 podélně	1,37	1,36	1,27
R6 příčně	0,79	0,74	0,70
Napětí při teplotě 100 °C a poměrném prodloužení $\epsilon = 30\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
R6 podélně	1,32	1,31	1,29
R6 příčně	0,75	0,73	0,74

Tab. 25: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro směs R6 při poměrném prodloužení 60 %

Napětí při teplotě 24 °C a poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
R6 podélně	1,57	1,50	1,46
R6 příčně	1,48	1,47	1,45
Napětí při teplotě 70 °C a poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
R6 podélně	1,48	1,42	1,40
R6 příčně	1,37	1,36	1,27
Napětí při teplotě 100 °C a poměrném prodloužení $\epsilon = 60\%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
R6 podélně	1,44	1,42	1,36
R6 příčně	1,32	1,31	1,29

### 6.6.2 ČISTÝ SMYK

Tab. 26: Naměřené hodnoty napětí v čistém smyku pro směs R6

Napětí při poměrném prodloužení $\epsilon = 30 \%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
R6 podélně	1,5059	1,4830	1,3455
R6 příčně	1,4008	1,3884	1,3611
Napětí při poměrném prodloužení $\epsilon = 60 \%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
R6 podélně	2,0277	2,0193	1,8532
R6 příčně	1,9585	1,9118	1,8667

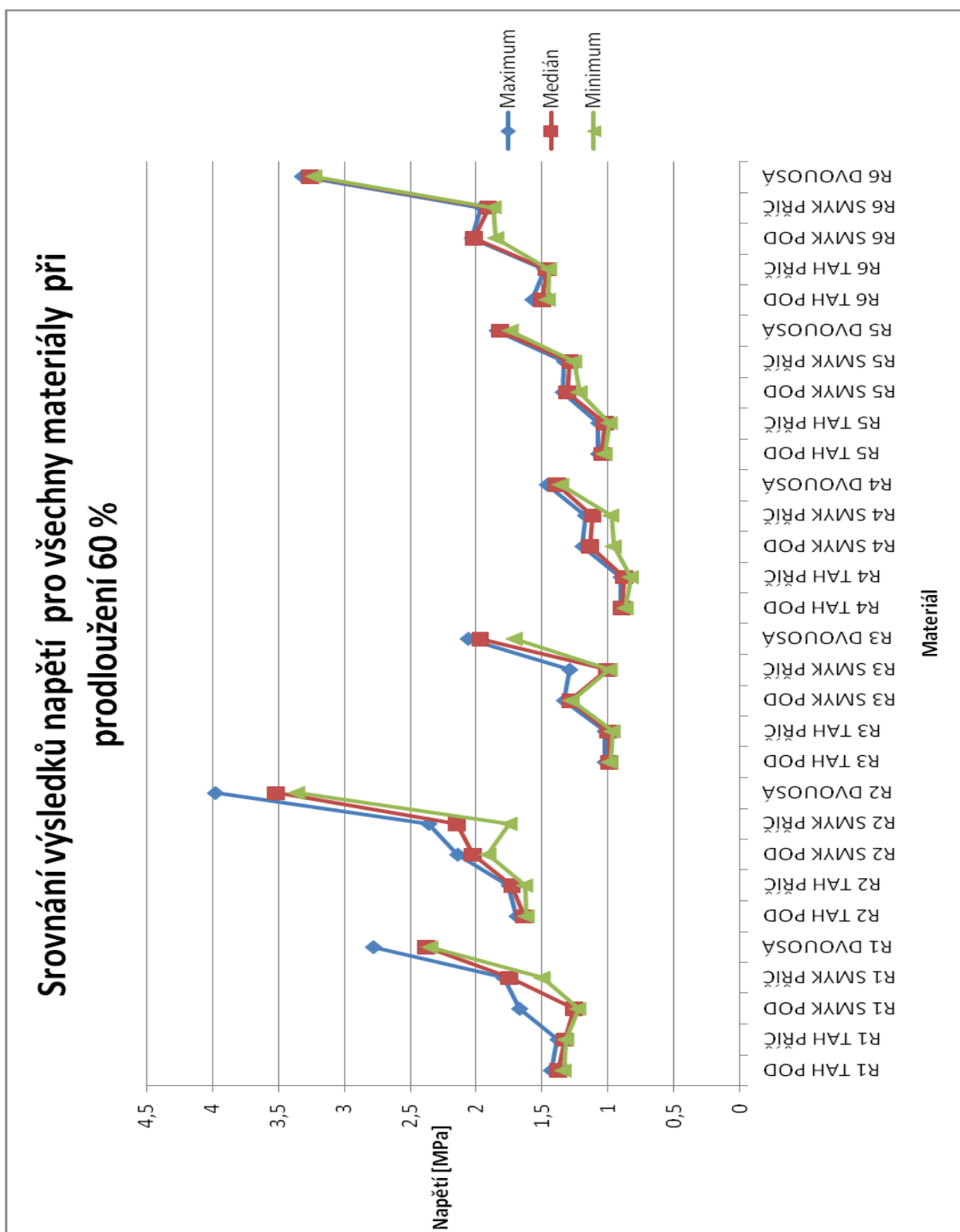
### 6.6.3 DVOUOSÁ NAPJATOST

Tab. 27: Naměřené hodnoty napětí ve dvouosé napjatosti pro směs

R6

Napětí při poměrném prodloužení $\epsilon = 30 \%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
R6	2,2597	2,2252	2,0166
Napětí při poměrném prodloužení $\epsilon = 60 \%$ [MPa]			
Název	Maximum	Medián	Minimum
R6	3,3201	3,2590	3,2315

## 6.7 Srovnání naměřených hodnot u všech materiálů



Obr. 53: Srovnání napětí při poměrném prodloužení 60 % pro jednotlivé materiály při zkoušce jednoosým tahem, čistým smykem a zkoušce dvouosé napjatosti

## DISKUZE VÝSLEDKŮ

Materiály byly podrobeny zkoušce tahem, čistým smykem a zkoušce dvouosé napjatosti. Testováním bylo zjištěno, že při zkoušce dvouosé napjatosti dosahovaly hodnoty napětí nejvyšších hodnot, naopak u zkoušky tahem byly hodnoty nejmenší. Na hodnoty napětí měl vliv i směr válcování.

Pro směs R1 při zkoušce jednoosým tahem byla zjištěna hodnota mediánu pro modul 60 %, teplotě 24 °C a podélném směru válcování 1,38 MPa, v příčném směru válcování 1,33 MPa. Dále pro teplotu 70 °C byla zjištěna hodnota mediánu v podélném směru válcování 1,31 MPa a v příčném směru válcování 1,36 MPa. Pro teplotu 100°C byla zjištěna hodnota mediánu v podélném směru válcování 1,40 MPa a v příčném směru válcování 1,34 MPa. Při zkoušce čistým smykem pro modul 60 % byla zjištěna hodnota mediánu v podélném směru válcování 1,26 MPa, v příčném směru válcování 1,75 MPa. Při zkoušce dvouosé napjatosti pro modul 60 % byla zjištěna hodnota mediánu 2,38 MPa.

Pro směs R2 při zkoušce jednoosým tahem byla zjištěna hodnota mediánu pro modul 60 %, teplotě 24 °C a podélném směru válcování 1,64 MPa, v příčném směru válcování 1,73 MPa. Dále pro teplotu 70 °C byla zjištěna hodnota mediánu v podélném směru válcování 1,66 MPa a v příčném směru válcování 1,63 MPa. Pro teplotu 100 °C byla zjištěna hodnota mediánu v podélném směru válcování 1,74 MPa a v příčném směru válcování 1,69 MPa. Při zkoušce čistým smykem pro modul 60 % byla zjištěna hodnota mediánu v podélném směru válcování 2,03 MPa, v příčném směru válcování 2,15 MPa. Při zkoušce dvouosé napjatosti pro modul 60 % byla zjištěna hodnota mediánu 3,52 MPa.

Pro směs R3 při zkoušce jednoosým tahem byla zjištěna hodnota mediánu pro modul 60 %, teplotě 24 °C a podélném směru válcování 0,99 MPa, v příčném směru válcování 1 MPa. Dále pro teplotu 70 °C byla zjištěna hodnota mediánu v podélném směru válcování 0,89 MPa a v příčném směru válcování 0,87 MPa. Pro teplotu 100 °C byla zjištěna hodnota mediánu v podélném směru válcování 0,86 MPa a v příčném směru válcování 0,88 MPa. Při zkoušce čistým smykem pro modul 60 % byla zjištěna hodnota mediánu v podélném směru válcování 1,29 MPa, v příčném směru válcování 1,01 MPa. Při zkoušce dvouosé napjatosti pro modul 60 % byla zjištěna hodnota mediánu 1,97 MPa.

Pro směs R4 při zkoušce jednoosým tahem byla zjištěna hodnota mediánu pro modul 60 %, teplotě 24 °C a podélném směru válcování 0,90 MPa, v příčném směru válcování 0,88 MPa. Dále

pro teplotu 70 °C byla zjištěna hodnota mediánu v podélném směru válcování 0,93 MPa a v příčném směru válcování 0,89 MPa. Pro teplotu 100 °C byla zjištěna hodnota mediánu v podélném směru válcování 0,96 MPa a v příčném směru válcování 0,93 MPa. Při zkoušce čistým smykem pro modul 60 % byla zjištěna hodnota mediánu v podélném směru válcování 1,14 MPa, v příčném směru válcování 1,12 MPa. Při zkoušce dvouosé napjatosti pro modul 60 % byla zjištěna hodnota mediánu 1,39 MPa.

Pro směs R5 při zkoušce jednoosým tahem byla zjištěna hodnota mediánu pro modul 60 %, teplotě 24 °C a podélném směru válcování 1,05 MPa, v příčném směru válcování 1,03 MPa. Dále pro teplotu 70 °C byla zjištěna hodnota mediánu v podélném směru válcování 1,03 MPa a v příčném směru válcování 1,01 MPa. Pro teplotu 100 °C byla zjištěna hodnota mediánu v podélném směru válcování 1,06 MPa a v příčném směru válcování 1,01 MPa. Při zkoušce čistým smykem pro modul 60 % byla zjištěna hodnota mediánu v podélném směru válcování 1,31 MPa, v příčném směru válcování 1,29 MPa. Při zkoušce dvouosé napjatosti pro modul 60 % byla zjištěna hodnota mediánu 1,82 MPa.

Pro směs R6 při zkoušce jednoosým tahem byla zjištěna hodnota mediánu pro modul 60 %, teplotě 24 °C a podélném směru válcování 1,50 MPa, v příčném směru válcování 1,47 MPa. Dále pro teplotu 70 °C byla zjištěna hodnota mediánu v podélném směru válcování 1,42 MPa a v příčném směru válcování 1,36 MPa. Pro teplotu 100 °C byla zjištěna hodnota mediánu v podélném směru válcování 1,42 MPa a v příčném směru válcování 1,31 MPa. Při zkoušce čistým smykem pro modul 60 % byla zjištěna hodnota mediánu v podélném směru válcování 2,02 MPa, v příčném směru válcování 1,91 MPa. Při zkoušce dvouosé napjatosti pro modul 60 % byla zjištěna hodnota mediánu 3,26 MPa.



## ZÁVĚR

Cílem práce bylo stanovit mechanické vlastnosti 6 různých směsí. Mechanické vlastnosti byly zjišťovány pomocí zkoušky jednoosým tahem za různých teplot, čistým smykem a zkoušky dvouosé napjatosti.

Měření bylo prováděno v laboratořích na univerzitě. Při zkoušce jednoosým tahem bylo zkušební tělísko v prvním cyklu protahováno na 60 % původní délky, poté bylo odlehčeno a následně 3x protaženo na 30 % původní délky. Zkouška tahem byla prováděna při teplotách 24 °C, 70 °C, 100°C. U zkoušky čistým smykem bylo tělísko tvaru obdélníku natahováno do poměrného prodloužení 60 %. U dvouosé napjatosti bylo tělísko ve tvaru kruhu nafukováno do poměrného prodloužení 60 %. Zkoušky čistým smykem a dvouosé napjatosti probíhaly za teploty 24 °C. U všech zkoušek bylo následně zjištěno napětí.

Výsledné hodnoty napětí byly zaneseny do tabulek a zobrazeny v grafech.

Nejmenší tuhost byla naměřena u směsi R4, největší u směsi R2. U směsí R4, R5, R6 byly hodnoty napětí v podélném i příčném směru válcování téměř totožné. U směsí R1, R2 a R3 měly hodnoty napětí v podélném i příčném směru válcování největší rozdíly.

Při jednoosém tahu se zvyšující teplotou napětí rostlo u směsí R1 a R4, naopak u směsí R5 a R6 napětí klesalo. U směsi R3 napětí v podélném směru válcování klesalo a v příčném směru byla nejmenší hodnota napětí při teplotě 70 °C. U směsi R2 byla nejmenší hodnota napětí nejčastěji při teplotě 70 °C.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] DVOŘÁK, Zdeněk a Jakub JAVOŘÍK. *Elastomerní konstrukční materiály*. Zlín: Česká společnost průmyslové chemie, místní pobočka Gumárenská skupina Zlín, 2009, 93 s. ISBN 978-80-02-02155-1.
- [2] HARPER, Charles A. *Handbook of plastics and elastomers*. New York: McGraw-Hill, 1975. ISBN 0070266816.
- [3] PREKOP, Štefan. *Gumárska technológia I*. Žilina: Žilinská univerzita, 1998, 282 s. ISBN 8071004839.
- [4] MORTON, Maurice. *Rubber technology*. 2nd ed. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1973, viii, 603 s.
- [5] GENT, Alan N. a R. P. CAMPION. *Engineering with rubber: how to design rubber components*. New York: Distributed in the United States of America and in Canada by Oxford University Press, c1992. ISBN 0195209508.
- [6] Jiří Maláč. *Gumárenská technologie II: Kaučuky* [online]. [cit. 2018-05-06].
- [7] POPA, Gabriel A. *Rubber: types, properties, and uses*. Hauppauge, N.Y.: Nova Science Publishers, c2011, xvii, 689 p. ISBN 9781617614644.
- [8] KUBÍK, Josef a Arnošt ZYTKA. *Zkušební metody v gumárenství*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1962. Gumárenská technologie.
- [9] JAVOŘÍK, Jakub. *Zkoušení rovnoměrné rovinné napjatosti elastomerů*, UTB ve Zlíně, 2005, [učební text].
- [10] VAŇHARA, Miroslav. *Stanovení mechanických vlastností vybraných elastomerů*. Zlín, 2016. Bakalářská práce. UTB.

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

$W$ [J]	Měrná deformační energie
$I_i$ [-]	Deformační invariant pro materiálové modely
$C_{ij}$ [-]	Materiálová konstanta
$E$ [MPa]	Modul pružnosti
$\mu_i$ [-]	Materiálová konstanta
$\alpha_i$ [-]	Materiálová konstanta
$\lambda_i$ [%]	Poměrné prodloužení
$\sigma_i$ [MPa]	Napětí
$E_{ij}$ [-]	Langrangeův deformační tenzor
$\epsilon_i$ [-]	Poměrná deformace
$L$ [mm]	Délka pracovní části po protažení
$L_0$ [mm]	Původní délka pracovní části
$F$ [N]	Zatěžovací síla
$s$ [mm <sup>2</sup> ]	Plocha průřezu pracovní části
$t$ [mm]	Tloušťka zkušební vzorku
$P$ [MPa]	Tlak
Dsk [-]	Díly na sto dílů kaučuku
$c_{ij}$ [-]	Složky pravého Cauchyho – Greenova deformačního tenzoru
$\epsilon$ [%]	Poměrné prodloužení
$\epsilon_p$ [%]	Tažnost
$r$ [mm]	Poloměr tělíska

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1: Jednoosá napjatost [5]</i> .....	22
<i>Obr. 2: Dvouosá napjatost [5]</i> .....	23
<i>Obr. 3: Čistý smyk [5]</i> .....	24
<i>Obr. 4: Zkouška dvouosé napjatosti</i> .....	27
<i>Obr. 5: Zkouška smykem [10]</i> .....	27
<i>Obr. 6: Tabulka s rozměry vysekávacích nožů [10]</i> .....	30
<i>Obr. 7: Vyseknuté zkušební tělísko</i> .....	30
<i>Obr. 8: Vystřižené zkušební tělísko</i> .....	32
<i>Obr. 9: Zkušební tělísko</i> .....	34
<i>Obr. 10: Zařízení pro zkoušku dvouosé napjatosti [10]</i> .....	34
<i>Obr. 11: Směs R1 v podélném směru při poměrném prodloužení 30 %</i> .....	36
<i>Obr. 12: Směs R1 v příčném směru při poměrném prodloužení 30 %</i> .....	36
<i>Obr. 13: Rozptyl hodnot napětí ve směsi R1 pro měřené teploty při poměrném prodloužení 30 %</i> .....	37
<i>Obr. 14: Směs R1 v podélném směru při poměrném prodloužení 60 %</i> .....	37
<i>Obr. 15: Směs R1 v příčném směru při poměrném prodloužení 60 %</i> .....	38
<i>Obr. 16: Rozptyl hodnot napětí pro směs R1 pro měřené teploty při poměrném prodloužení 60 %</i> .....	38
<i>Obr. 17: Závislosti napětí na poměrném prodloužení pro všechny provedené zkoušky</i> .....	39
<i>Obr. 18: Směs R2 v podélném směru při poměrném prodloužení 30 %</i> .....	41
<i>Obr. 19: Směs R2 v příčném směru při poměrném prodloužení 30 %</i> .....	42
<i>Obr. 20: Rozptyl hodnot napětí ve směsi R2 pro měřené teploty při poměrném prodloužení 30 %</i> .....	42
<i>Obr. 21: Směs R2 v podélném směru při poměrném prodloužení 60 %</i> .....	43
<i>Obr. 22: Směs R2 v příčném směru při poměrném prodloužení 60 %</i> .....	43
<i>Obr. 23: Rozptyl hodnot napětí ve směsi R2 pro měřené teploty při poměrném prodloužení 60 %</i> .....	44
<i>Obr. 24: Závislosti napětí na poměrném prodloužení pro všechny provedené zkoušky</i> .....	44
<i>Obr. 25: Směs R3 v podélném směru při poměrném prodloužení 30 %</i> .....	47
<i>Obr. 26: Směs R3 v příčném směru při poměrném prodloužení 30 %</i> .....	47

<i>Obr. 27: Rozptyl hodnot napětí ve směsi R3 pro měřené teploty při poměrném prodloužení 30 %</i> .....	48
<i>Obr. 28: Směs R3 v podélném směru při poměrném prodloužení 60 %</i> .....	48
<i>Obr. 29: Směs R3 v příčném směru při poměrném prodloužení 60 %</i> .....	49
<i>Obr. 30: Rozptyl hodnot napětí ve směsi R3 pro měřené teploty při poměrném prodloužení 60 %</i> .....	49
<i>Obr. 31: Závislosti napětí na poměrném prodloužení pro všechny provedené zkoušky</i> .....	50
<i>Obr. 32: Směs R4 v podélném směru při poměrném prodloužení 30 %</i> .....	52
<i>Obr. 33: Směs R4 v příčném směru při poměrném prodloužení 30 %</i> .....	53
<i>Obr. 34: Rozptyl hodnot napětí ve směsi R4 pro měřené teploty při poměrném prodloužení 30 %</i> .....	53
<i>Obr. 35: Směs R4 v podélném směru při poměrném prodloužení 60 %</i> .....	54
<i>Obr. 36: Směs R4 v příčném směru při poměrném prodloužení 60 %</i> .....	54
<i>Obr. 37: Rozptyl hodnot napětí ve směsi R4 pro měřené teploty při poměrném prodloužení 60 %</i> .....	55
<i>Obr. 38: Závislosti napětí na poměrném prodloužení pro všechny provedené zkoušky</i> .....	55
<i>Obr. 39: Směs R5 v podélném směru při poměrném prodloužení 30 %</i> .....	58
<i>Obr. 40: Směs R5 v příčném směru při poměrném prodloužení 30 %</i> .....	58
<i>Obr. 41: Rozptyl hodnot napětí ve směsi R5 pro měřené teploty při poměrném prodloužení 30 %</i> .....	59
<i>Obr. 42: Směs R5 v podélném směru při poměrném prodloužení 60 %</i> .....	59
<i>Obr. 43: Směs R5 v příčném směru při poměrném prodloužení 60 %</i> .....	60
<i>Obr. 44: Rozptyl hodnot napětí ve směsi R5 pro měřené teploty při poměrném prodloužení 60 %</i> .....	60
<i>Obr. 45: Závislosti napětí na poměrném prodloužení pro všechny provedené zkoušky</i> .....	61
<i>Obr. 46: Směs R6 v podélném směru při poměrném prodloužení 30 %</i> .....	63
<i>Obr. 47: Směs R6 v příčném směru při poměrném prodloužení 30 %</i> .....	64
<i>Obr. 48: Rozptyl hodnot napětí ve směsi R6 pro měřené teploty při poměrném prodloužení 30 %</i> .....	64
<i>Obr. 49: Směs R6 v podélném směru při poměrném prodloužení 60 %</i> .....	65

---

<i>Obr. 50: Směs R6 v příčném směru při poměrném prodloužení 60 %.....</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 51: Rozptyl hodnot napětí ve směsi R6 pro měřené teploty při poměrném prodloužení 60 % .....</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 52: Závislosti napětí na poměrném prodloužení pro všechny provedené zkoušky .....</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 53: Srovnání napětí při poměrném prodloužení 60 % pro jednotlivé materiály při poměrném prodloužení 60 %.....</i>	<i>69</i>

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 1: Složení jednotlivých směsí .....</i>	<i>29</i>
<i>Tab. 2: Informace o zařízení ZWICK .....</i>	<i>31</i>
<i>Tab. 3: Informace o zkušebním zařízení.....</i>	<i>32</i>
<i>Tab. 4: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro směs R1 při poměrném prodloužení 30 % ...</i>	<i>39</i>
<i>Tab. 5: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro směs R1 při poměrném prodloužení 60 % ...</i>	<i>40</i>
<i>Tab. 6: Naměřené hodnoty napětí v čistém smyku pro směs R1 .....</i>	<i>40</i>
<i>Tab. 7: Naměřené hodnoty napětí ve dvouosé napjatosti pro směs R1 .....</i>	<i>41</i>
<i>Tab. 8: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro směs R2 při poměrném prodloužení 30 % ...</i>	<i>45</i>
<i>Tab. 9: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro směs R2 při poměrném prodloužení 60 % ...</i>	<i>45</i>
<i>Tab. 10: Naměřené hodnoty napětí v čistém smyku pro směs R2 .....</i>	<i>46</i>
<i>Tab. 11: Naměřené hodnoty napětí ve dvouosé napjatosti pro směs R2.....</i>	<i>46</i>
<i>Tab. 12: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro směs R3 při poměrném prodloužení 30 % .....</i>	<i>50</i>
<i>Tab. 13: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro směs R3 při poměrném prodloužení 60 % .....</i>	<i>51</i>
<i>Tab. 14: Naměřené hodnoty napětí v čistém smyku pro směs R3 .....</i>	<i>51</i>
<i>Tab. 15: Naměřené hodnoty napětí ve dvouosé napjatosti pro směs R3.....</i>	<i>52</i>
<i>Tab. 16: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro směs R4 při poměrném prodloužení 30 % .....</i>	<i>56</i>
<i>Tab. 17: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro směs R4 při poměrném prodloužení 60 % .....</i>	<i>56</i>
<i>Tab. 18: Naměřené hodnoty napětí v čistém smyku pro směs R4 .....</i>	<i>57</i>
<i>Tab. 19: Naměřené hodnoty napětí ve dvouosé napjatosti pro směs R4.....</i>	<i>57</i>
<i>Tab. 20: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro směs R5 při poměrném prodloužení 30 % .....</i>	<i>61</i>
<i>Tab. 21: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro směs R5 při poměrném prodloužení 60 % .....</i>	<i>62</i>
<i>Tab. 22: Naměřené hodnoty napětí v čistém smyku pro směs R5 .....</i>	<i>62</i>
<i>Tab. 23: Naměřené hodnoty napětí ve dvouosé napjatosti pro směs R5.....</i>	<i>63</i>
<i>Tab. 24: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro směs R6 při poměrném prodloužení 30 % .....</i>	<i>67</i>
<i>Tab. 25: Naměřené hodnoty napětí v tahu pro směs R6 při poměrném prodloužení</i>	

60 % .....	67
<i>Tab. 26: Naměřené hodnoty napětí v čistém smyku pro směs R6 .....</i>	<i>68</i>
<i>Tab. 27: Naměřené hodnoty napětí ve dvouosé napjatosti pro směs R6.....</i>	<i>68</i>



## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha na CD:

- Bakalářská práce v elektronické podobě