

# Vliv podmínek při vytlačování na vlastnosti kaučukové směsi

Bc. Veronika Pavelková

---

Diplomová práce  
2016



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav inženýrství polymerů

akademický rok: 2015/2016

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Veronika Pavelková**  
Osobní číslo: **T13604**  
Studijní program: **N2808 Chemie a technologie materiálů**  
Studijní obor: **Inženýrství polymerů**  
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Vliv podmínek při vytlačování na vlastnosti kaučukové směsi**

Zásady pro vypracování:

Vytlačovací proces je v gumárenství stejně důležitý jako v plastikářské technologii. Cílem je kontinuálním tvářením převést kaučukovou směs do požadovaného tvaru. Podmínky při vytlačování (teplota, rychlost) mohou ovlivnit vlastnosti výsledného vulkanizátu. Tato diplomová práce bude zkoumat vliv těchto podmínek na výsledné vlastnosti připravených vzorků.

1. Vypracujte literární rešerši na dané téma
2. Připravte kaučukovou směs
3. Změřte reologické vlastnosti dané směsi
4. Připravte vzorky pomocí vytlačování při různých podmínkách, vylisujte je a změřte vlastnosti
5. Interpretujte získané výsledky a formulujte závěry

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. Databáze knihovny UTB
2. Michaeli, Walter (2004), *Extrusion Dies for Plastics and Rubber - Design and Engineering Computations* (3rd Edition), ISBN 978-3-446-22561-9
3. Ash, Michael; Ash, Irene (2013), *Handbook of Plastics and Rubber Additives, Volumes 1-2* (2nd Edition) ISBN 978-1-934764-50-3
4. Internet

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Petr Zádrapa, Ph.D.**

Ústav inženýrství polymerů

Datum zadání diplomové práce:

**15. ledna 2016**

Termín odevzdání diplomové práce:

**16. května 2016**

Ve Zlíně dne 1. března 2016



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



Ing. Lubomír Beníček, Ph.D.  
*ředitel ústavu*

Příjmení a jméno: PAVELKOVÁ VERONIKA

Obor: KCH5P1

## 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 16. 5. 2016



<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 nevydávající zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorázní 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 rigorázní 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, ušje-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>31</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). Odpirá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího 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 výdětku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložil, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přibližně k výši výdětku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce se zabývá měřením a charakterizací tokových vlastností kaučukových směsí pomocí vyhodnocení viskozity na přístroji RPA 200 a vysokotlakém kapilárním reometru, a také vlivu podmínek při vytlačování kaučukové směsi. Vliv podmínek je vyhodnocen pomocí zkoušek strukturní pevnosti a pevností v tahu. Některé výsledky mechanických zkoušek ukazují, že tyto podmínky mohou mít vliv na výsledné vlastnosti vulkanizátu.

Klíčová slova:

Kaučuková směs, vytlačovací reometr, viskozita, vytlačování, Rubber Process Analyzer RPA 2000, strukturní pevnost, tahová zkouška

## **ABSTRACT**

This Master thesis deals about the measurement and characterization of the flow properties of the natural rubber compounds. RPA 2000 and high pressure capillary rheometer were used as main device to characterize the rubber compound viscosity. Consequently, the influence of chosen extrusion conditions on the final properties of vulcanized rubber were studied. The results shows, that extrusion conditions could affected the vulcanizate properties.

Keywords:

Rubber compound, extrusion rheometer, viscosity, extrusion, Rubber Process Analyzer RPA 2000, tear strenght, tensile strenght

Chtěla bych poděkovat vedoucímu práce panu Ing. Petru Zádrapovi, Ph.D. za odborné vedení diplomové práce.

Dále chci poděkovat spolupracovníkům za trpělivost a vstřícnost a také rodině za podporu a pochopení.

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 KAUČUK A JEHO ZPRACOVÁNÍ</b> .....	<b>12</b>
1.1 DRUHY KAUČUKŮ .....	12
1.1.1 Přírodní kaučuk .....	12
1.1.2 Syntetické kaučuky .....	13
1.2 VLASTNOSTI KAUČUKOVÉ SMĚSI.....	13
1.3 PŘEMĚNA KAUČUKU NA PRYŽ .....	14
<b>2 KAUČUKOVÁ SMĚS</b> .....	<b>15</b>
2.1 SLOŽENÍ KAUČUKOVÉ SMĚSI .....	15
2.2 VLIV PŘISAD KAUČUKOVÝCH SMĚSÍ NA VYTLAČOVÁNÍ.....	16
2.2.1 Plastikační činidla .....	16
2.2.2 Vulkanizační činidla.....	16
2.2.3 Změkčovadla .....	17
2.2.4 Plniva.....	17
2.2.5 Pomocné zpracovatelské prostředky .....	18
2.3 POŽADAVKY NA KAUČUKOVÉ SMĚSI PRO VYTLAČOVÁNÍ.....	18
2.4 PŘÍPRAVA KAUČUKOVÉ SMĚSI.....	19
2.4.1 Míchání na dvouváleci .....	20
2.4.2 Míchání na hnětacím stroji.....	20
2.3 TOKOVÉ VLASTNOSTI KAUČUKOVÉ SMĚSI .....	21
2.3.1 Toková křivka .....	21
2.3.2 Smykový tok .....	23
2.3.3 Elongační tok .....	23
<b>3 VYTLAČOVÁNÍ KAUČUKOVÝCH SMĚSÍ</b> .....	<b>25</b>
3.1 VYTLAČOVACÍ STROJE PRO KAUČUKOVÉ SMĚSI .....	26
3.1.1 Simulace toku.....	27
3.1.2 Popis šnekového vytlačovacího stroje .....	27
3.2 PRŮBĚH TOKU VE VYTLAČOVACÍM STROJI.....	31
3.2.1 Parametry ovlivňující proces vytlačování kaučukových směsí .....	31
3.3 VYTLAČOVACÍ LINKA PRO KAUČUKOVÉ SMĚSI.....	33
3.4 NEGATIVNÍ JEVY PŘI VYTLAČOVÁNÍ.....	34
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>36</b>
<b>4 CÍL DIPLOMOVÉ PRÁCE</b> .....	<b>37</b>
<b>5 PŘÍPRAVA MATERIÁLU</b> .....	<b>38</b>
5.1 POUŽITÉ MATERIÁLY .....	38
5.2 MÍCHÁNÍ SMĚSÍ .....	39
5.3 VSKOZITA MOONEY .....	41
<b>6 MĚŘENÍ REOLOGICKÝCH VLASTNOSTÍ</b> .....	<b>42</b>
6.1 KAPILÁRNÍ REOMETR .....	42
6.1.1 Postup měření.....	42



6.1.2	Výsledky měření .....	42
6.1.3	Vyhodnocení výsledků .....	50
6.2	RPA – RUBBER PROCESS ANALYSER .....	51
6.2.1	Deformační test – strain sweep .....	52
6.2.2	Frekvenční test – frequency sweep .....	53
6.2.2.1	Výsledky měření .....	55
<b>7</b>	<b>VYTLAČOVÁNÍ.....</b>	<b>60</b>
7.1	VULKANIZACE.....	61
<b>8</b>	<b>MĚŘENÍ VLASTNOSTÍ PRYŽE .....</b>	<b>62</b>
8.1	TAHOVÁ ZKOUŠKA .....	62
8.2	STRUKTURNÍ PEVNOST .....	72
8.2.1	Typ č. 1 – Trouser .....	73
8.2.2	Typ č. 2 – Graves .....	78
8.2.3	Vyhodnocení výsledků .....	82
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>83</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>84</b>
	<b>SEZNAM GRAFŮ .....</b>	<b>88</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>90</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>91</b>

## ÚVOD

Tato práce se věnuje měření a vyhodnocování vlastností směsí z přírodního kaučuku. Především jde o měření tokových charakteristik. Tokové vlastnosti kaučukových směsí, jsou důležité zejména z hlediska zpracování. Dají se ovlivnit složením a přísadami, ale také podmínkami při zpracování. Je důležité vědět, jak se bude materiál při výrobě chovat a proto se měří tokové vlastnosti. I v případě, že má kaučuk stejné složení a stejnou viskozitu, může po každé potřebovat jiné podmínky při zpracování, a proto je potřeba pro samotnou výrobu znát vliv podmínek při zpracování. Podmínky při zpracování nám v konečném důsledku také ovlivňují kvalitu výsledných výrobků.

Jednou z nejčastěji používaných technologií při zpracování kaučukové směsi je technologie vytlačování. Vytlačování je kontinuální proces tváření, při němž prochází materiál přes profilovanou hlavu do volného prostoru. Při vytlačování klade směs velký odpor, proto se u technologií pro výrobu pryží, musí používat vysoké rychlosti smykové deformace. Proto byl pro měření tokových vlastností použit nejprve kapilární reometr a poté Rubber Process Analyzer RPA 2000 aby bylo dosaženo většího rozsahu průběhu toku materiálu.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

# 1 KAUČUK A JEHO ZPRACOVÁNÍ

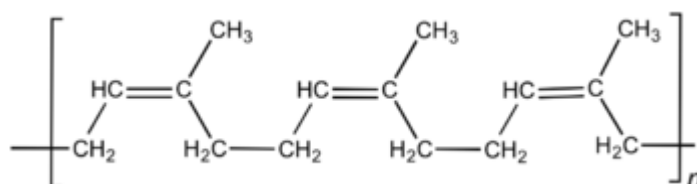
Kaučuk je hlavní surovinou gumárenského průmyslu. Tento polymerní materiál, je charakteristický vysokou pružností. Je také hlavní a nejdůležitější surovina pro přípravu gumárenských směsí, z nichž s pak vyrábí, za pomoci vulkanizace, pryž. Podle způsobu získávání tohoto materiálu máme kaučuk přírodní nebo kaučuky syntetické. Přírodní kaučuk se získává ze stromů *Hevea brasiliensis*, ve formě latexu. Kaučuků syntetických existuje velká řada, přičemž každý z nich se liší svými vlastnostmi. Vlastnosti kaučuku se dají také ovlivnit přidáním gumárenských přísad.

## 1.1 Druhy kaučuků

Použití různých druhů kaučuků nám umožňuje výrobu dílů, nebo komponentů s různými výslednými vlastnostmi, ať už jsou to fyzikální, chemické, nebo mechanické. Proto je vysoká variabilita při výběru směsi pro konečné produkty podle typu a požadovaných vlastností na výsledný výrobek.

### 1.1.1 Přírodní kaučuk

Přírodní kaučuk se značí zkratkou NR. Je to poly1,4cis isopren (Obr. 1).



Obr. 1. Přírodní kaučuk (poly1,4cis isopren)

Vyrábí se z latexu, což je koloidní disperze, v níž je kaučuk přítomen ve formě částic o průměru 0,05 – 0,5 μm. Obsah kaučuku v latexu je cca 30%, zbytek je voda a malé procento lipidů, uhlohydrátů, proteinů, a dalších látek v malém množství. Latex se po čepování ze

stromů dále zpracovává. Nejčastěji zpracovává koagulací kyselinou mravenčí, nebo octovou.

Většina typů NR má v důsledku vysoké molekulové hmotnosti vysokou viskozitu, a proto se před zpracováním musí provádět plastifikace. Poté mají NR dobré zpracovatelské vlastnosti, dobrou pevnost před vulkanizací, vysokou konfekční lepivost a vysokou rychlost vulkanizace.[1]

Vulkanizáty přírodního kaučuku pak vynikají vysokou elasticitou, vysokou mechanickou pevností, velmi dobrými dynamickými vlastnostmi a velmi dobrou odolností proti oděru. Mají vysoké pevnosti i bez přítomnosti plniv. Naopak jsou málo odolné vůči degradaci.[1]

### 1.1.2 Syntetické kaučuky

Synteticky připravených kaučuků je velké množství. Mezi sebou se liší nejen složením, ale i výrobou, zpracováním, mechanickými a chemickými vlastnostmi. Podle těchto vlastností, se dále používají v gumárenském průmyslu pro dané účely.

Při výrobě syntetický kaučuků se vychází z nízkomolekulárních látek schopných lineární polymerace, polykondenzace nebo polyadice. Nejlepší pro výrobu syntetických kaučuků jsou nenasycené uhlovodíky nebo cykloolefiny. Jednotlivé molekuly kapalného monomeru se spojí chemickými vazbami za vzniku lineárních řetězových makromolekul. Díky těmto reakcím vznikají vysokomolekulární kaučukovité látky. Při polymeraci monomeru obsahujícího dvě dvojně vazby, zůstává v polymeru na každou strukturální jednotku dienu zachována jedna dvojná vazba. Díky dvojným vazbám jsou poté schopny vulkanizovat sírou.[4]

## 1.2 Vlastnosti kaučukové směsi

Kaučuky mají velkou délku polymerních řetězců, amorfní strukturu, nízkou teplotu skelného přechodu a možnost tvořit řídké sítě.

Zlepšení vlastností kaučukových směsí, jako jsou strukturální pevnost, vratná deformace, pevnost v tahu, odolnost proti oděru, rozpustnost, tvrdost apod., se docílí pomocí vulkanizace, kdy se kaučuk změní na pryž.

### 1.3 Přeměna kaučuku na pryž

Kaučuk sám o sobě je téměř nepoužitelný na výrobky. Pouze přírodní kaučuk se používá, kvůli své dobré konfekční lepivosti na výrobu lepidel. Ostatní typy kaučuků se dále zpracovávají pouze jako směsi s dalšími přísadami.

Z kaučukové směsi se stane pryž ve chvíli, kdy proběhne vulkanizace. Vulkanizace je jev, který ve struktuře polymeru vytvoří řídkou síť. Tato změna je nevratná.

Vulkanizace většinou probíhá za zvýšené teploty a tlaku, a za přítomnosti vulkanizačních činidel. Ty se musí použít, aby k vulkanizaci materiálu došlo. Jako vulkanizační činidlo se používá především síra, dále peroxidy a reaktivní pryskyřice. Po vulkanizaci se stává materiál odolnějším, zpevní se jeho struktura, zlepší se odolnost proti trvalé deformaci, mizí rozpustnost, výrazně se zvýší mechanická pevnost, atd.

Zvulkanizované neboli pryžové výrobky mají dnes velké zastoupení ve většině průmyslových oblastí, jako jsou například automobilový, stavební, dopravní, strojní a mnoho dalších průmyslů.

#### Vytlačované pryžové výrobky

Na zákaznický požadavek se dnes dají pomocí technologie vytlačování vyrobit tvary se specifickými profily pro různé typy elastomerů, přesně tak aby odpovídaly daným požadavkům. Jsou zde možnosti výroby:

- Pevných, dutých a pěnových profilů
- Běhounů pro pneumatiky
- Těsnících profilů rozmanitých tvarů; kruhové, čtvercové, U-, D-, P-, L-, aj. dle požadavku zákazníka
- Vytlačování kaučukové směsi ve formě pásků pro další zpracování[15]

## 2 KAUČUKOVÁ SMĚS

Kaučuková směs se skládá ze čtyř základních částí:

- Kaučuk
- Vulkanizační systém
- Stabilizační systém
- Plnění a měkčení

Při vývoji kaučukové směsi se nejprve zvolí druh kaučuku. Pro modifikaci vlastností se přidávají další složky. Každá složka ve směsi má svou funkci. Ovlivňují hlavně zpracovatelnost a konečné vlastnosti výrobku.

### 2.1 Složení kaučukové směsi

Množství jednotlivých přísad se v kaučukové směsi značí buď zkratkou dsk nebo phr. Obě zkratky znamenají díly na sto dílů kaučuku. Kaučuk ve směsi tvoří 100 dílů.

#### **Kaučuk**

Základem kaučukové směsi je kaučuk. Podle typu zvoleného kaučuku se tvoří jeho název. Pro zajištění požadovaných vlastností je možno použít směsi různých kaučuků.

#### **Vulkanizační systém**

Tento systém obsahuje vulkanizační činidla - nejčastěji síra, urychlovače a aktivátory. Je to systém, který umožňuje zahájení a řízení vulkanizace.

#### **Stabilizační systém**

Systém, který zlepšuje bezpečnost směsi pomocí inhibitorů a retardérů, se nazývá stabilizační. Tento systém obsahuje také antidegradanty a antioxidanty, které zpomalují průběh stárnutí.

#### **Plnění a měkčení**

Poslední část přísad zapříčiňuje měkčení a plnění kaučukových směsí. Je to část, která pomáhá zlepšit především mechanické vlastnosti a snížit cenu kaučuků. Procento plnění je také důležité pro zpracování směsi.

## 2.2 Vliv přísad kaučukových směsí na vytlačování

Pro proces vytlačování se dá použít jakákoliv kaučuková směs, pokud je k tomuto účelu navržena. Kaučuková směs pro vytlačování by měla být navržena tak aby, byla co nejlépe zpracovatelná, měla dobré tokové vlastnosti, měla po vytlačení požadovaný tvar, výroba probíhala bez problémů a zbytečných negativních jevů při vytlačování, a výrobky z ní byly vyrobeny podle požadavků zákazníka a za co nejnižších nákladů.

Navrhování kaučukové směsi pro vytlačování není jednoduché. Kaučukové směsi mají většinou vysokou viskozitu, elasticitu a jsou hodně plněny, a to zabraňuje ideálnímu toku taveniny ve vytlačovacím stroji. Proto se do směsí přidávají zpracovatelské přísady ovlivňující vytlačování. Mezi ně patří plastikační nebo také peptizační činidla, změkčovadla a pomocné zpracovatelské prostředky.

### 2.2.1 Plastikační činidla

Usnadňují plastikaci neboli úpravu kaučuků tím že zvyšují účinnost a rychlost plastikace, usnadňují štěpení makromolekul kaučuku, způsobené hnětením, stabilizací přechodně vzniklých radikálů.[18]

### 2.2.2 Vulkanizační činidla

Na základě zkoumání efektu vulkanizačních systémů na tokové vlastnosti kaučukových směsí, byl zjištěn vliv vulkanizačních systémů při vytlačování. Směs s použitím efektivního vulkanizačního systému (EV) vykazovala nižší zdánlivou viskozitu ve srovnání se směsmi, kde byl použit běžný vulkanizační systém (CV) a systém bez síry (NS). [22]

U vytlačování stejných směsí, byly při nízkých smykových rychlostech ( $40\text{s}^{-1}$ ) znatelné drobné nerovnosti u všech třech zkoumaných směsí. Zvýšení smykových rychlostí vedlo u systému bez síry (NS) k dokonale hladkému povrchu extrudátu v důsledku thixotropního chování směsi. Avšak u směsí (CV) a (EV), kdy byla přidána vulkanizační činidla, byla s rostoucí smykovou rychlostí zaznamenána větší nepravidelnost a nestabilita.[22]



### 2.2.3 Změkčovadla

Změkčovadla vytvoří na povrchu hladký film, který umožní hladký přechod směsi hubicí. Dalšími dobrými prostředky pro vytlačování jsou přísady založené na principu regenerátů. Jsou to materiály nerozpustné a dobře mísitelné s kaučuky. Tyto materiály zabraňují deformaci výrobků a zvětšují anizotropii směsí. Tu dále podporuje také vhodně zvolený druh plniv. Výběr správného plniva hraje významnější roli u syntetických kaučuků, nežli u přírodního.[10]

### 2.2.4 Plniva

Plněné kaučukové směsi vykazují velmi odlišné tokové vlastnosti ve srovnání s neplněnými elastomery, např.:

- Vymizení viskoelastické oblasti
- Skluz na stěně
- Menší narůstání extrudátu s rostoucím obsahem plniva
- Hladší lomy taveniny s rostoucím obsahem
- Anizotropní chování při toku, atd. [23]

Plniva mají převážně ztužující účinek, ovlivňují tvrdost, pevnost, strukturní pevnost, modul a odolnost vůči oděru. Přidávají se ve formě prášků a tvoří podstatnou část přísad. V kaučukové směsi značně ovlivňují viskozitu a proto je jejich obsah důležitý při zpracování směsi. Nejčastějším plnivem kaučukových směsí jsou uhlíkové saze, uhličitan vápenatý ( $\text{CaCO}_3$ ) nebo silika ( $\text{SiO}_2$ ).

Plniva mohou ovlivnit i narůstání profilu za hubicí. Například při použití kaučukové směsi plněné  $\text{CaCO}_3$  je narůstání větší než při použití kaučukové směsi plněné saze a to zejména při vysokých rychlostech vytlačování.[22]

Dalším plnivem, které se přidává do kaučukových směsí je silika neboli srážený oxid křemičitý, a řadí se mezi minerální plniva. Do směsí se přidává za účelem snížení valivého odporu, hřetí a zlepšení chování za mokra a na sněhu. Bylo vypořádáno, že extrudáty

směsí, u nichž byly použity při plnění saze, byly vždy hladší, než v případě plnění silikou. [21]

Jako plnivo do přírodního kaučuku lze použít také slída. Slída má jako plnivo vlastnosti, které mohou podpořit zpracování kaučukové směsi. Aby však slída pomohla zdokonalit zpracování, musí být její obsah pod 20 phr. Při vyšším obsahu slídy začíná mít směs značně vyšší viskozitu. [20]

### **Saze**

Saze jsou nejpoužívanějším plnivem kaučukových směsí. Vlastnosti, které ovlivňují kaučukové směsi a pryže jsou velikost částic, struktura a chemický charakter. Chemický charakter souvisí se schopností interakce sazí s kaučukem při míchání, také více nebo méně ovlivňuje průběh vulkanizace. Velikost částic a struktura pak více ovlivňují vlastnosti pryže. [31]

#### **2.2.5 Pomocné zpracovatelské prostředky**

Jsou to přísady, které zlepšují zpracovatelnost bez negativního ovlivnění vlastností pryžového výrobku, snižují viskozitu, umožňují tváření při menším smykovém namáhání, zmenší množství štěpných reakcí při přípravě kaučukových směsí, spoří energii, atd.

Mezi pomocné zpracovatelské prostředky patří:

- **Mastné kyseliny a jejich deriváty** - jedná se o směsi mastných kyselin, jejich esterů nebo zinečnatých a vápenatých solí. Přidávají se do směsí kvůli vlastnostem podobným účinkům maziv. Používají se také jako aktivátory sirné vulkanizace.
- **Pryskyřičné produkty** – zajišťují vhodnou viskozitu směsi, což vede ke zlepšení zpracovatelnosti.[18]

### **2.3 Požadavky na kaučukové směsi pro vytlačování**

Kaučukové směsi vyžadují odlišné podmínky pro vytlačování v porovnání s plasty. Směs musí obsahovat všechny přísady, které pozitivně ovlivňují vytlačovací proces, bez toho aniž by zhoršily vlastnosti výrobku. Velkou roli zde hraje stupeň plasticity. Pokud máme směs, která je nedostatečně plastifikovaná, tak ta se kvůli své tuhosti ve stroji více zahřívá. Čím

tužší je směs, tím větší je vznikající teplo. Naopak příliš plastická směs se lehce formuje, klade malý odpor, výkon je také malý a po opuštění vytlačovacího stroje se profil deformuje. Plasticita směsi se dá ovlivnit plastifikací nebo přidáním zpracovatelských přísad.

Dalšími rozhodujícími předpoklady pro vytlačování jsou:

- viskozita kaučukové směsi
- elastický podíl
- navulkanizování
- průběh vulkanizace
- sklon k deformaci

### **Viskozita kaučukové směsi**

Viskozita charakterizuje odpor proti tečení a je jedním z hlavních faktorů ovlivňujících zpracovatelnost kaučukových směsí. Jelikož kaučukové směsi vykazují pseudoplastické nenevtonské chování, zdánlivá viskozita u nich dynamicky klesá s růstem smykové rychlosti. Nižší viskozita kaučukové směsi umožňuje lepší tváření směsi kvůli menšímu smykovému namáhání. Současně zlepšuje zpracovatelnost a umožňuje použít vyšší rychlosti tváření kaučukové směsi při vytlačování. Díky nižší viskozitě se při intenzivním tření materiálu vyvíjí ve vytlačovacím stroji méně tepla, směs má nižší teplotu, a tím je sníženo riziko předčasné vulkanizace.

Viskozita je ovlivněna také množstvím plniv a dalších přísad.

## **2.4 Příprava kaučukové směsi**

Kaučukové směsi se připravují mísením surovin, potřebných pro výrobu směsi. Podle typu kaučukové směsi se zvolí druh kaučuku, a dále se přimíchávají další suroviny, které ovlivňují vlastnosti jak kaučukové směsi, tak i výsledných pryžových výrobků. Tím vznikne polotovar – kaučuková směs, která se dále používá na výrobu nesčetné řady pryžových produktů, pomocí nejrůznějších technologií.

Příprava kaučukových směsí spočívá v první řadě v navažování jednotlivých surovin. Složky směsi se odvažují do nádob a jsou pak dále pomocí dopravníků dováženy k samotnému zamíchání. Míchání je základní proces v gumárenské technologii. Kaučuková směs

obsahuje v průměru až deset složek, z nichž každá má za úkol plnit svou specifickou funkci. Účelem míchání je zajistit co nejstejnější rozptýlení látek v kaučukové směsi. Při míchání kaučuků hraje významnou roli stupeň plasticity a dále pak typ zvolených sazí. Ty mají vliv na strukturní pevnost, pevnost v tahu a odolnost proti opotřebení vulkanizátu. Důležitá je proto jejich dobrá disperze v kaučukové směsi a existuje několik způsobů, jak ji zlepšit. Mimo jiné se dá disperze ovlivnit pořadím přidávaných přísad, což platí i pro disperzi ostatních surovin. Přestože nemáme univerzální předpis pro míchání, z obecných poznatků platí následující pořadí:

1. V prvním stádiu míchání se přidávají ztužující druhy sazí; v případě neztužujících plniv se tyto plniva přidávají až společně se změkčovadly.
2. V druhé fázi se přidávají změkčovadla.
3. Dále se přidávají prostředky proti degradaci a suroviny podporující dispergaci.
4. Jako poslední se přidávají vulkanizační činidla.

Posledním a zároveň i hlavním faktorem kvalitní dispergace je typ použitého strojního zařízení pro míchání. Pro přípravu kaučukových směsí používáme dvouválce, nebo hnětiče, případně jejich kombinaci.[6]

#### **2.4.1 Míchání na dvouválcích**

Dvouválce jsou základní stroj pro míchání a přípravu směsí. Stroj se skládá ze dvou válců umístěných horizontálně, rovnoběžně vedle sebe, které se proti sobě otáčejí různou rychlostí. Směs je míchána v mezeře mezi těmito válci působením skluzu. Důležitá je přítomnost návalku vytvářející tlak v mezeře, který strhává přísady a podporuje tak jejich dobré vmíchání do kaučuku. Dále je také důležité prořezávání a překládání vzniklého pásu směsi a to pro dobrou dispergaci surovin. Nesmí se zapomínat na chlazení válců, aby nedocházelo k předčasně navulkanizaci směsi, a to z toho důvodu, že mechanická práce se zde mění na teplo, a tím se válce zahřívají.[10]

Míchání na dvouválcích se používá spíše pro malé množství směsi, málo plněné směsi a světlé odstíny směsí.

#### **2.4.2 Míchání na hnětacím stroji**

V případě míchání na hnětacím stroji se směs míchá pod tlakem v uzavřené komoře. K míchání dochází třením mezi profilovanými rotory a stěnou komory. Výhodou hnětacího stroje

je práce v uzavřeném prostoru. Hnětací stroje mohou míchat velké množství směsi. Tyto stroje je také nutno chladit.

Hnětací stroj se používá také v kombinaci s dvouválcem, který slouží na domíchání kaučukové směsi a pro domíchání vulkanizačního systému.

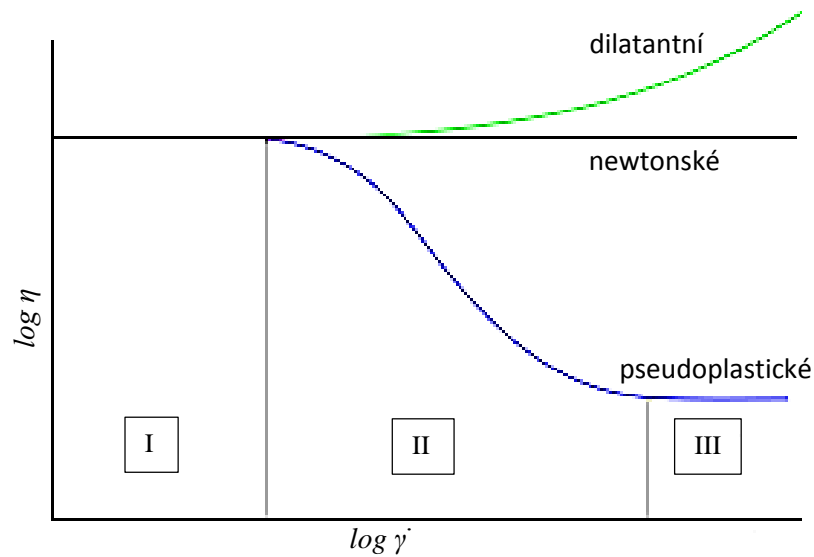
### 2.3 Tokové vlastnosti kaučukové směsi

Popis tokového chování kaučukové směsi při vytlačování není jednoduchý. Reologické chování kaučukových směsí je velmi složité v důsledku vysoké viskozity, elasticity a kvůli silným interakcím, a vykazuje různé tokové anomálie jako např. skluz na stěně, mez skluzu, atd. Největší problémy při vytlačování zapříčiňuje hlavně mez skluzu a thixotropní chování.

Tokové vlastnosti kaučukových směsí, vyplývají z jejich heterogenní podstaty a silných interakcí, které jsou vyvíjeny mezi jejich různými přísadami. Zaměření na interakce kaučuk-plnivo je očividně zanedbatelné, vezmeme-li v úvahu účinky jiných hmotnostně menších složek. Je známo, že i malé množství vhodných mísících složek jako jsou maziva, může mít vliv na tokové vlastnosti např. na skluz na stěně. V čem jsou interakce kaučuk-plnivo znepokojivé, je názor, že adsorpčně-desorpční procesy probíhají mezi povrchem částic plniv a kaučukovými segmenty. Jelikož patří kaučukové segmenty mezi makromolekuly, vyskytují se v řádech nanometrů, což má za následek modifikaci na velkou vzdálenost z hlediska mechaniky proudění. V této souvislosti se vázaný kaučuk jeví jako klíčová vlastnost plněných kaučukových směsí, v závislosti na chemické povaze elastomeru, velikosti a struktuře plniv, míchacích podmínkách, doby a teploty skladování. Při dané teplotě a při klidových podmínkách (bez smyku) je kaučuk-plnivo mezifází, jejíž dynamika dosahuje nejlepší rovnováhy mezi adsorpcí a desorpcí pryžových segmentů. To samozřejmě znamená, že pokud se teplota změní, nebo pokud je materiál podroben smyku tak je pravděpodobné, že se tato rovnováha změní. Toto poskytuje vysvětlení pro jedinečnost tokových vlastností kaučukových směsí.[23]

#### 2.3.1 Toková křivka

Kaučukové směsi jsou materiály viskoelastické. Tyto materiály vykazují tzv. neneutonské chování, kde závislost napětí na rychlosti smykové deformace není lineární (Obr. 2).



Obr. 2. Toková křivka

Toková křivka znázorňuje chování materiálů v závislosti viskozity na rychlosti smykové deformace. Křivka udává tři druhy tokového chování: dilatantní, newtonské a pseudoplastické. Dilatantní je materiál tehdy pokud viskozita se zvyšujícím se smykovým napětím roste. Newtonské, viskozita materiálů v závislosti na rychlosti smykové deformace je stále konstantní, např. voda. Pseudoplastické jsou materiály, u nichž dochází s rostoucí rychlostí smykové deformace k poklesu viskozity. Pseudoplastickou křivku pak rozdělujeme na tři oblasti.

I – je tzv. 1. newtonské plató, což je oblast maximální viskozity, zde je viskozita konstantní, protože při malých rychlostech ještě nedochází k rozpadu tzv. makromolekulárních klubek.

II – je lineární oblast, kde viskozita klesá v důsledku rozbalování klubek ve směru toku.

III – je tzv. 2. newtonské plató, zde jsou už všechna klubka rozbalena a viskozita už zde není závislá na rychlosti smykové deformace.

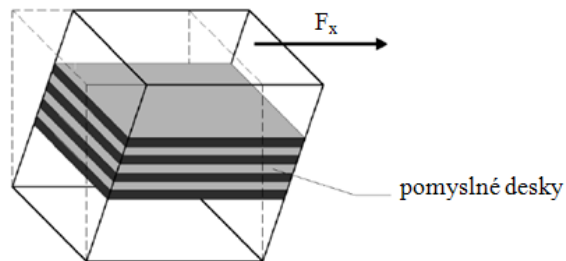
Při toku směsi pozorujeme dva děje, při kterých vznikají normálová napětí; většinou probíhající současně:

- Zmenšením průřezu dojde ke značnému urychlení toku – do materiálu se zavádí tahové deformace působící kolmo ke směru toku

- Při dobré adhezi se na stěně tvoří rychlostní profil – jednotlivé vrstvy po sobě kloužou, čímž dochází ke smykovému namáhání[19]

### 2.3.2 Smykový tok

Smykový tok vzniká ve válci vytláčovacího stroje a je kolmý k ose šneku. Je způsoben rotačním pohybem šneku, který pomáhá cirkulaci materiálu a také jej homogenizuje. Vlivem smykové deformace vznikají i normálové složky, které způsobují, že pomyslné desky se od sebe oddalují nejen ve směru  $x$ , ale i ve směru  $y$ , tím vzniká problém při zpracování.



Obr. 3. Smykový tok

Rychlost smykové deformace představuje změnu rychlosti dvou pomyslných desek ve směru kolmém k ose  $y$ .

### Smyková viskozita

Smyková viskozita je odpor kapaliny vůči smykovému toku. Viskozita kaučukových směsí se mění v závislosti na teplotě, průměrné molekulové hmotnosti a na distribuci molekulových hmotností. Viskozita také závisí na rychlosti smykové deformace a projevuje se vliv normálových napětí. S rostoucí rychlostí smykové deformace smyková viskozita klesá.

### 2.3.3 Elongační tok

Elongační jednoosý tok vzniká při protahování tělesa. Síla  $F$  působí na těleso ve směru jeho osy a tím ho protahuje. Síla působí jen ve směru osy  $x$  takže k protažení dochází jen v tomto směru. Vzniká zde tahové napětí, což je poměr síly ve směru  $x$  a plochy kolmé na osu  $x$ . Rychlost elongační deformace nám udává změnu rychlosti protahování na dané délce.

**Elongační viskozita**

Elongační viskozita je odpor taveniny vůči protahování. Uplatňuje se tam, kde dochází k rychlostnímu přerozdělení, tzn. ve zúžení ve vytlačovacích hlavách. Ovlivňuje tvorbu vírů, tloušťkovou distribuci extrudátu a folií, spojování vrstev při koextruzi a narůstání za hubicí.



### 3 VYTLAČOVÁNÍ KAUČUKOVÝCH SMĚSÍ

Vytlačování patří k jednoduchým procesům tváření materiálu. Při této technologii prochází daný materiál profilovaným otvorem do volného prostoru. Profilovaný otvor dává materiálu požadovaný tvar. Jedná se obvykle o proces kontinuální, po kterém následuje kalibrace vytlačeného polotovaru, chlazení, odtah a skladování. Tato technologie slouží buď k výrobě konečných tvarů, nebo k výrobě polotovarů. Tímto procesem tváření se dají vyrobit trubky, fólie, hadice, profily, desky, vlákna, aj.

Při procesu vytlačování se materiál nejprve zahřívá, taví a dopravuje, a poté prochází přes vytlačovací hlavu. Vytlačovat můžeme jak termoplastické směsi, tak i kaučukové směsi.

Existuje několik druhů vytlačovacích strojů. Pro vytlačování se používají stroje různé konstrukce, liší se pracovním členem v tavicí komoře. Jedná se o stroje: šnekové – které se dále dělí podle počtu šneků, pístové, diskové a speciální. Pro kaučukové směsi se ale používají převážně šnekové vytlačovací stroje.

Při vytlačování kaučukových směsí prochází předem připravená kaučuková směs přes komoru vytlačovacího stroje, ve které je poháněna pomocí tlaku vyvozeného šnekem, který pomáhá svým konstrukčním provedením dostat materiál směrem k vytlačovací hlavě. Ta udává produktům požadovaný tvar. Pro vytlačování kaučukových směsí se používají především šnekové vytlačovací stroje, které optimálním způsobem homogenizují a dopravují materiál směrem k hubici.

Tato technologie tváření kaučukových směsí se používá zejména pro:

- Vytlačování profilů přes profilovanou vytlačovací hlavu
- Pogumování kovových materiálů
- Opláštění hadic nebo kabelů
- Pasírování směsí přes speciální jemná síta umístěna na vytlačovací hlavě; jemná síta zachycují mechanické nečistoty, které by mohly způsobit problémy při dalším zpracování směsi
- Dokončovací operace míchání pro lepší homogenizaci složek kaučukové směsi

- Přípravu kaučukové směsi před dalším zpracováním pomoci tváření přes vytlačovací hlavu do požadovaného tvaru (např. forma pásky pro vstřikovací stroje)
- Kontinuální homogenizaci směsí ve strojích se speciálně konstruovanými šneky, které jsou spojeny s vytlačováním a v kombinaci s dvouválcem

Při technologii vytlačování kaučukových směsí můžeme postupovat dvěma způsoby. Mění se ve způsobu úpravy vstupující směsi. Tyto postupy se nazývají teplé a studené vytlačování.

### **Teplé vytlačování**

U teplého vytlačování se provádí nejprve plastifikace a předehřátí kaučukové směsi mimo vytlačovací stroj na dvouválci (teplota okolo 60 – 100°C). Pak je plastifikovaná směs seřezaná do formy dlouhých pásů a dodává se do vytlačovacího stroje. V jiném případě je vytlačovací stroj zásobován směsí automaticky z dvouválce přímo do plnicího otvoru. Dvouválec je tak součástí vytlačovací linky. Při tomto vytlačování se používají šneky krátké o délce 4-6D.[6]

### **Studené vytlačování**

V případě studeného vytlačování se ohřev i plastifikace materiálu provádí až ve vytlačovacím stroji. Pro tento druh vytlačování se používají šneky dlouhé 8-15D, ve kterých jsou míchací a hnětací elementy. Předem zamíchaná a ochlazená směs na bezpečnou teplotu, se přivádí opět ve formě pásů, nebo granulí. Jelikož se směs dávkuje rovnou do vytlačovacího stroje, ušetří se tím ohřívání směsi.[6]

## **3.1 Vytlačovací stroje pro kaučukové směsi**

Vytlačovací stroje se skládají ze tří základních sekcí. První je vstupní sekce, zde dochází k plnění stroje daným materiálem. Kanál je v těchto místech hluboký a to proto, aby mohl pojmout co nejvíce materiálu. Pak následuje kompresní sekce, to je oblast, kde dochází především k homogenizaci a zároveň se zde stává směs viskóznější. Po té přechází materiál do třetí zóny, která je výstupní. Výstupní zónu zakončuje vytlačovací hlava, a skrz ni opouští vytvarovaný materiál vytlačovací stroj.

Požadavky, kladené na vytlačovací stroje jsou následující:

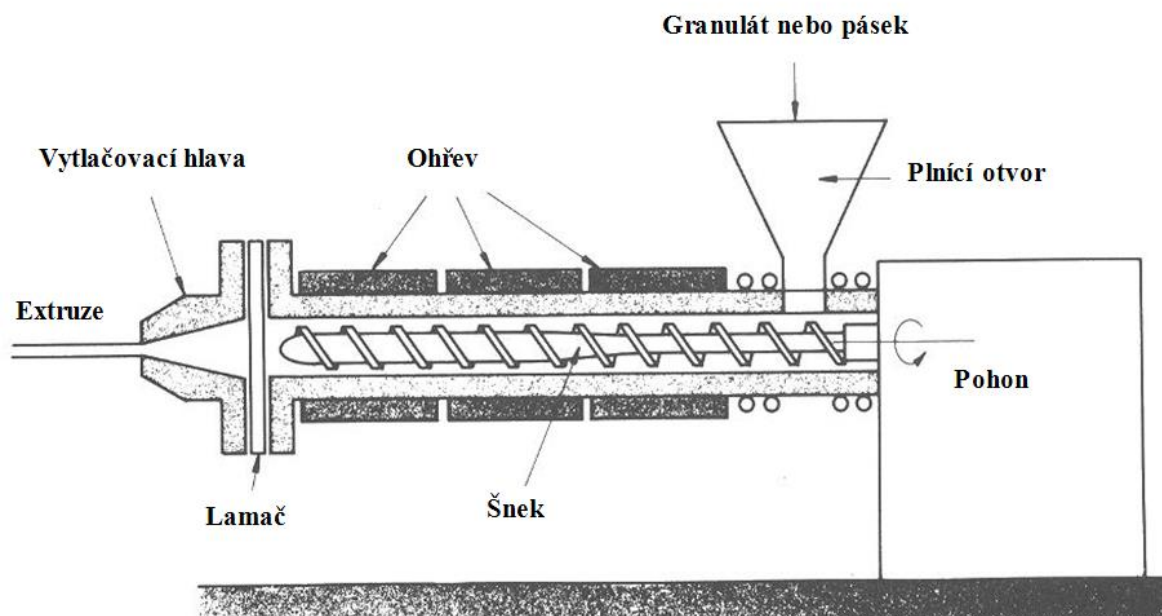
- vysoký vytlačovací výkon úměrný otáčkám šneku s co nejmenší závislostí na protitlaku
- rovnoměrná doprava taveniny bez pulzací
- vytlačování taveniny bez orientace
- homogenní zamíchání polymeru se všemi přidanými aditivami bez těkavých podílů
- místně a časově rovnoměrná teplota taveniny, která je optimální z hlediska výkonu stroje, zpracovaného polymeru a kvality vytlačovaného výrobku [2]

### 3.1.1 Simulace toku

Pro představu o průběhu toku kaučukového materiálu ve vytlačovacím stroji se používají softwarové programy. Principy modelace procesu vytlačování kaučukových směsí, byly převzaty z termoplastických procesů. Zavedený model znázorňuje, že proudění materiálu probíhá hlavním směrem v oblasti šneku a komory. Ovšem tyto simulace jsou náchylné na chyby. Proto jsou experimentální testy v porovnání se softwarovými simulacemi spolehlivější pro hodnocení průběhu toku. Nedostatky modelu jsou s největší pravděpodobností spojeny s nedostatečným popisem reologie kaučukových směsí a dále nedokonalosti při dávkování materiálu.[16]

### 3.1.2 Popis šnekového vytlačovacího stroje

Pro vytlačování kaučukových směsí se používají výhradně šnekové vytlačovací stroje. V závislosti na typu výsledného produktu se používají různé typy vytlačovacích hlav. Šnekový vytlačovací stroj se skládá z násypky (plnicího otvoru), komory, šneku a vytlačovací hlavy (Obr. 4).



Obr. 4. Šnekový vytlačovací stroj

### Plnicí otvor (násypka)

Plnicí otvor slouží k dávkování materiálu do vytlačovacího stroje. Kaučuková směs zde přichází většinou ve formě pásku, případně ve formě granulí (studené vytlačování). Činnost stroje hodně závisí na úpravě tohoto otvoru. Otvor je konstruován podle toho v jaké formě přichází materiál do vytlačovacího stroje.

### Šnek

Šnek je nejdůležitější částí šnekového vytlačovacího stroje. Má válcovitý nebo také kuželovitý tvar. Vyrábí se z velmi pevných ušlechtilých ocelí a jejich povrch je vysoce leštěn. Šnek se otáčí v komoře vytlačovacího stroje a zajišťuje dopravu a zároveň i homogenizaci materiálu. Charakterizuje se poměrem  $L/D$  což je poměr délky k průměru a hloubkou drážky. Pro vytlačování kaučukových směsí se používají především jednochodé nebo dvouchodé šneky.

Funkce šneku je taková, že zachycuje pomocí drážek, svým vlastním otáčením materiál u plnicího otvoru, hněte jej a dopravuje k hubici. Závitová drážka může mít stejnou nebo různou hloubku. Pokud se hloubka závitové drážky šneku mění, jedná se o šneky diferenciální a udává se u nich kompresní poměr, což je poměr objemu závitové drážky na vstupu a výstupu šneku. Na zpracování kaučukových směsí se používají hlubší šneky s užší závitovou drážkou s menší frekvencí otáček. Odpozem vznikajícím v drážce šneku a také odpozem v

hlavě vytlačovacího stroje, vzniká v drážce, resp. v hlavě stroje tlak, jenž má významný vliv na výkon a kvalitu vytlačovaného profilu.[6,7]

Důležitým faktorem šneku je teplota. Ta musí být nižší než teplota komory stroje. Proto se musí šneky temperovat, tzn. stále udržovat na teplotě nižší než je teplota komory.

Co se týká pohonu šneku je ho potřeba správně navrhnout tak, aby mohl spolehlivě pracovat při všech podmínkách vytlačování. Příkon šneku je dán násobkem krouticího momentu a úhlové rychlosti šneku. Obě tyto veličiny závisí na druhu zpracovaného materiálu. Zvyšováním otáček šneku se zvyšuje vývin tepla ve zpracovávaném materiálu na úkor přiváděné mechanické energie. Proto obvodové rychlosti při zpracování kaučukových směsí, nesmí překročit jistou hranici, aby nedošlo k znehodnocení materiálu.[13]

### **Komora**

Komora je část stroje, ve které je umístěn šnek. Na jednom konci komory se nachází násypka a na druhém je připevněna vytlačovací hlava, která se dá podle potřeby vyměňovat. Komora je opatřena temperačními systémy, které slouží pro ohřev nebo pro chlazení. To se děje pomocí kanálků a komůrek, které jsou umístěny v pouzdře komory a ve kterých protéká voda, pára, vzduch nebo olej. Teplota u násypky je nejnižší, a směrem k vytlačovací hlavě se zvyšuje.[7]

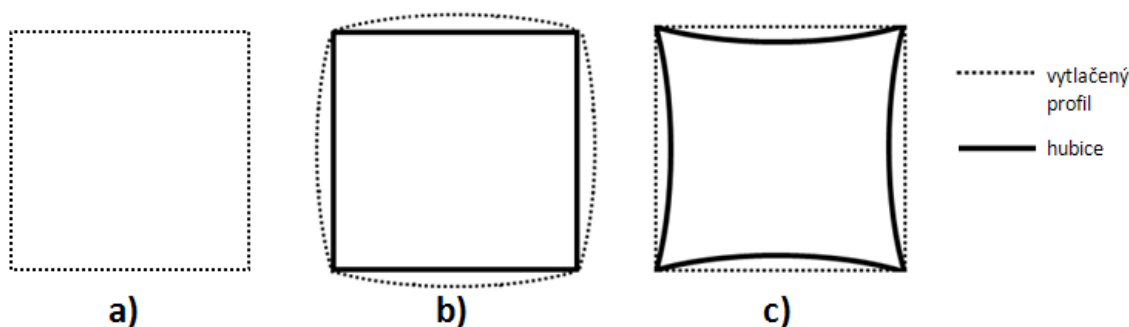
### **Vytlačovací hlava**

Vytlačovací hlava formuje materiál do požadovaného tvaru. Máme hlavy přímé – vytváří profil ve směru osy, šikmé a příčné – používají se na opláštění, a hlavy pro vytlačování koextruzí.

Do hlavy je vložena šablona, která vytváří požadovaný profil extrudátu. Vytlačený profil bývá větší než profil vytlačovací hlavy z důvodu narůstání materiálu. Při vytlačování elastomerních materiálů jsou rozměry výrobku téměř určeny geometrií vytlačovací hubice. Pouze v případě, kdy teprve po vytlačování následuje vulkanizace, může dojít k některým geometrickým změnám v důsledku zesílení materiálu, a to zejména ke smrštění. [3]

I když není narůstání materiálu za hubicí tak velké jako u termoplastických materiálů, musí být tvar šablony také upraven (Obr. 5) a to z důvodu aby profil odpovídal požadovaným

rozměrům. Navrhnout šablonu tak, aby profil přesně odpovídal daným rozměrům, není jednoduché, protože každá směs narůstá jinak, a výpočet není přesný. Narůstání je způsobeno viskoelastickým chováním směsi. Může ho ovlivňovat složení a příprava směsi, podmínky při zpracování nebo zařízení. [3]



Obr. 5. Úprava hubice – a) požadovaný profil, b) vytlačný profil bez úpravy hubice, c) vytlačný profil po úpravě hubice

Vytlačování elastomerů se od vytlačování termoplastů liší také hmotnostním průtokem taveniny, přiváděné do extrudéru. U elastomerů je průtok taveniny rychlejší, a navíc musí být v rozsahu teplot, které umožňují bezpečné zpracování, to znamená, že musí být v oblasti teplot, kdy nesmí dojít k předčasné vulkanizaci (navulkanizování). V této oblasti teplot se vyskytuje směs ve vytlačovací stroji nebo ve vytlačovací hlavě. [3]

### Navrhování vytlačovací hlavy

Vytlačovací hlava a kalibrační zařízení určují rozměry polotovaru. V této souvislosti je třeba vzít v úvahu, že reologické a termodynamické procesy ve vytlačovací hlavě a kalibračním zařízení, jakož i veškeré dlouhí procesy, které mohou být přítomny mezi hubicí a kalibračním zařízením, nebo jejich spojení, mohou mít rozhodující vliv na kvalitu vytlačovaných polotovarů, jako jsou např. povrch a mechanické vlastnosti. Při navrhování vytlačovací hlavy a kalibrační jednotky musíme vzít v úvahu tok materiálu, deformaci a teplotní vztahy v obou těchto částech výrobní linky.[3]

Vytlačovací hlava musí být navržena tak, aby se v ní nenacházela mrtvá místa.

### 3.2 Průběh toku ve vytlačovacím stroji

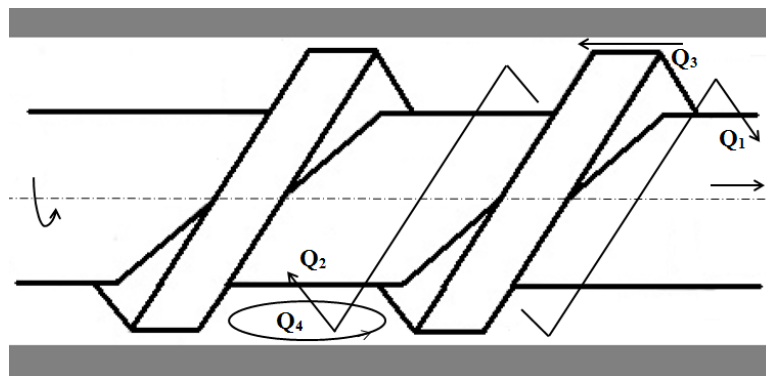
Jelikož jsou kaučukové směsi výrazně nenevtonovské materiály, tak jejich vlastností je také to, že s rychlostí namáhání rychle stoupá odpor. Při daném zatížení dále s teplotou stoupá i rychlost deformace. Tok materiálu je závislý na čase, a kaučuk jeví tixotropii (s dobou působení napětí klesá viskozita). Pohyb materiálu ve vytlačovacím stroji je určen výslednicí čtyř tokových pochodů (Obr. 6). [6]

$Q_1$  - Posuvný výtlačný tok, ten je způsoben dopravou materiálu směrem k hlavě.

$Q_2$  - Zpětný tlakový tok, zapříčiněný odporem v hlavě, a působící proti výtlačnému toku.

$Q_3$  - Zpětný tok, je způsoben vůlí mezi šnekem a povrchem pláště; (je možné ho zrychlit otáčením šneku).

$Q_4$  - Příčný tok, probíhá přibližně v rovině kolmé na osu šneku; neovlivňuje postupný tok v plášti, ale zato způsobuje cirkulační vratný pohyb nezbytný pro míchání a vyrovnání teplot. [6]



Obr. 6. Tlaky ve šnekovém vytlačovacím stroji

#### 3.2.1 Parametry ovlivňující proces vytlačování kaučukových směsí

Z technologického hlediska je největším problémem dosáhnout stejnoměrného a rychlého vytlačování výrobků s hladkým povrchem, bez bublin a pórů, a s tvarem a rozměry odpovídajícím přesně daným požadavkům. Je zde několik věcí, které je pro kvalitní výrobu řešit. Jedná se jak o konstrukční tak i provozní problémy. Co se týká provozních problémů, tak ty se dají upravit pomocí některých parametrů. Parametry ovlivňující vytlačování směsí významně ovlivňují tento proces. Mimo složení a vlastností směsi je to teplota, tlak, otáčky šneku (rychlost vytlačování), zásobování stroje.

## Teplota

Vytlačovací hlava i hubice musejí být před začátkem práce ohřáty na požadovanou teplotu. V průběhu vytlačování si udržují tyto části správnou teplotu sdílením tepla z procházející směsi. Teplota ovlivňuje jednotlivé části vytlačovacího stroje (od násypky směrem k hlavě narůstá), a také i výkon. Nejdůležitější je zamezit přílišnému zahřátí stroje, aby nedošlo k předčasné navulkanizaci směsi. Směs by se tímto znehodnotila a zhoršil by se její průtok vytlačovací hlavou, a extrudát by byl znehodnocen.[8]

Teplota se dále reguluje pomocí temperačních zařízení. Ty slouží buďto podle potřeby k chlazení nebo ohřevu jak šneku, tak i komory. Obecně platí, že šnek musí mít menší teplotu než je teplota komory, aby mohlo zpracování hmoty probíhat za optimálních podmínek.

## Tlak

Tlak se spolu s dopravovaným množstvím hmoty podílí na výkonnosti stroje. Obě tyto veličiny jsou závislé:

- Na průměru, stoupání a tvaru šneku
- Na velikosti povrchu
- Na povrchové teplotě válce a šneku
- Na tvaru vytlačovací hlavy

Při vytlačování je mnohdy důležitější, zvláště u vytlačování malých profilů, dosáhnout vysokého tlaku před hubicí, než množství vytlačené hmoty. V opačném případě by mohlo dojít k zpětnému proudění směsi ve šneku.[8]

Během vytlačování polymerní taveniny je vytlačovaný materiál formován díky své viskoelasticitě a sbíhajícímu kanálu podle profilu vytlačovací hlavy. V důsledku toho je za daných podmínek vyprodukován také velký pokles tlaku. Obecně se hodnoty poklesu tlaku týkají nejen viskoelasticity taveniny ale také podmínek vytlačování (např. teploty a průtoku), geometrie kanálu, jako je poměrné zmenšení délka/ průměr a výstupního úhlu vytlačovací hlavy. Pro krátké vytlačovací hlavy je vliv vstupujícího toku taveniny na celkových tlakových ztrátách poměrně důležitý. Proto je vliv úhlu vytlačovací hlavy na tlakových ztrátách významný.[18]



### **Zásobování stroje**

Zásobování vytlačovacího stroje také ovlivňuje kvalitu extrudátu. Při nestejném zásobování stroje se může objevit nesouměrnost vytlačeného tvaru. Tento problém vzniká v důsledku nepravidelného zásobování. Proto je důležité zajistit pravidelné kontinuální zásobování směsi ke šneku.

### **Otáčky šneku**

Otáčky šneku se dají měnit ale podmínkou je, že musí být v souladu s rychlostí navazujících zařízení ve výrobní lince. Rychlost vytlačování má vliv na kvalitu výrobků.

Změnou otáček šneku se také mění tlak ve vytlačovací hlavě. Touto změnou se dají do jisté míry regulovat rozměrové úchyly, je-li správná vytlačovací tvárnice. Tato regulace je omezená kvůli již zmíněnému narůstání tlaku ve vytlačovací hlavě.[8]

## **3.3 Vytlačovací linka pro kaučukové směsi**

Proces vytlačování probíhající na vytlačovacím stroji je pouze část celé vytlačovací linky. V některých závodech tyto vytlačovací linky jsou velmi dlouhé s několika operacemi pro dosažení požadovaného kvalitního finálního produktu. Je-li teplotní profil extrudéru nesprávně nastaven, ingredience produktu nejsou správně namíchané, teplota taveniny na konci extruderu je špatná, chladicí teplota lázně není správně nastavena, stahovák na konci linky běží špatnou rychlostí, nebo je-li jakékoliv další provozní nastavení nesprávně nastaveno, pak je s největší možností pravděpodobné, že výrobek nebude splňovat požadované specifikace zákazníka. Každý krok v tomto procesu má zde přidanou hodnotu, v důsledku toho výrobek dosahuje na konci linky svých maximálních hodnot. Nesprávné nastavení hned na začátku linky může způsobit, že na konci linky je výrobek zcela neodpovídající.[9]

Vytlačování předchází operace míchání. Ta se většinou nachází mimo linku. Vytlačovací linka může obsahovat plastifikační jednotku (teplé vytlačování), kde je směs do vytlačovacího stroje dávkována přímo z dvouválce. Po vstupu směsi do stroje probíhá proces, kdy se zvýší viskozita materiálu a směs je vytlačována přes vytlačovací hlavu. Po vytlačení kaučukové směsi z extrudéru se směs buďto vulkanizuje, nebo jen ochlazuje. Pokud se směs pouze

chladí, znamená to, že je určena pro další zpracování. Aby nedocházelo ke slepování neztvrděného materiálu, opatřuje se směs klouzkem, nebo se do chladicí lázně za hubicí přidávají přísady zamezující lepení. Vulkanizace se provádí v případě, jedná-li se o hotové výrobky, a jejich tvar má být po vytlačení neměnný. Dříve byl extrudát vulkanizován diskontinuálně v autoklávu, v poslední době se však přešlo na kontinuální vulkanizaci. Co se týká ohřevu je možno kontinuální vulkanizaci rozdělit na dva způsoby:

- Ohřev směsi na vulkanizační teplotu (i nad 180 °C)
- Udržování materiálu na vulkanizační teplotě po dobu vulkanizace (vulk. dráhy mohou být až několik desítek metrů dlouhé)

Je několik možností vulkanizace po vytlačení kaučukové směsi. Například zavedení smykové hlavy, kdy je materiál při výstupu částečně navulkanizovaný a zkrátí se tím vulkanizační dráhy. Další možností je solná lázeň, zde je extrudát intenzivně ohříván kapalným médiem což zaručuje velmi dobrý přestup tepla. Dále je to mikrovlnný ohřev (UHF), ten využívá střídavého elektrického pole (pro polární směsi), nebo také tzv. fluidní lázeň, kde je teplo na extrudát přenášeno pomocí vyhřátých skleněných kuliček udržovaných ve vznosu. Vulkanizovat lze i pomocí horkovzdušného ohřevu. Ten je ale pomalý a nejčastěji se kombinuje se smykovou hlavou nebo UHF. Dále můžeme vulkanizovat kaučukovou směs ionizačním zářením, kde se pomocí proudu elektronů v kaučukové směsi tvoří volné radikály a ty mají za následek zesíťování řetězců.[12]

Po vulkanizaci se výrobky ochladí na pokojovou teplotu, kontroluje se jejich kvalita, a dále jsou stohovány řezány a skladovány dle požadavků a potřeb zákazníka.

### 3.4 Negativní jevy při vytlačování

Hlavním problémem u vytlačování je dosažení hladkého, stejnoměrného povrchu bez pórovitosti a vzdušných bublinek, dále pak přesně odpovídajícím požadovaným tvarům a rozměrům, a to všechno za rychlého a stejnoměrného vytlačování. Splnění těchto podmínek se provádí konstrukčními úpravami a také úpravou podmínek při provozu.

### Narůstání profilu za hubicí

Narůstání profilu za hubicí je jev, při němž dojde ke zvětšení průměru vytlačeného profilu při vytlačování. Hlavní faktory, které ovlivňují vytlačování:

- rychlostní přerozdělení
- paměť (závisí na délce šterbiny – čím je kratší, tím je větší narůstání)
- elasticita a elongační viskozita
- teplota (při chlazení stěny – vyšší narůstání)

Narůstání směsi za hubicí je různé a mění se podle provozní teploty, složení směsi, tloušťky průřezu, poměru plochy průřezu k profilu vytlačovací hlavy a rozložení průřezu vzhledem k vytlačovací hlavě a rychlosti vytlačování. Podle měnících se podmínek při vytlačování může narůstání kolísat od 5 % až po 100 %. [8]

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 4 CÍL DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem práce je připravit kaučukové směsi, změřit jejich tokové vlastnosti a vulkanizační charakteristiky. Poté směsi vytlačit při různých rychlostech otáček šneku, vylisovat destičky a změřit vlastnosti v kolmém a podélném toku materiálu.

Z hodnot pak zjistit, jaký vliv má složení materiálu a podmínky při vytlačování, na vlastnosti kaučukové směsi a jejího vulkanizátu.

## 5 PŘÍPRAVA MATERIÁLU

Pro zkoumání vlivu podmínek při vytlačování byly nejprve připraveny tři směsi podle níže uvedených receptur (Tab. 1). Základem směsí byl přírodní kaučuk a k němu se přidávaly další složky a zkoumal se jejich vliv na sledované vlastnosti.

### 5.1 Použité materiály

Pro přípravu směsi byly použity tyto látky:

**NR SVR3L** - přírodní vysokojakostní kaučuk, zkratka SVR označuje původ, tzn., že pocházejí Vietnamu (Standard Vietnam Rubber), 3 znamená, že jde o nejčistší kaučuk a L popisuje jeho světlé zbarvení

**Saze N550** - retortové saze, které dodávají pryžím průměrnou tvrdost a elasticitu, měrný povrch je  $42 \pm 5 \text{ m}^2/\text{g}$ , absorpční číslo oleje  $114 \pm 5 \text{ cm}^3/100\text{g}$ ; působí ve směsi jako především jako plnivo [29]

**Olej nytex** - naftenický olej se zvýšeným podílem aromatické složky, působí jako změkčovač, má vysoké rozpouštěcí schopnosti a vynikající nízkoteplotní chování; zlepšuje zpracovatelské vlastnosti, snižuje viskozitu a zvyšuje plasticitu kaučukové směsi

**Vulkanox 4020** - 1,2-dihydro-2,2,4-trimethylchinolin, černé pecičky; působí jako antidegradant, pomáhá zabraňovat stárnutí

**ZnO** - oxid zinečnatý, bílá práškovitá látka; reaguje se stearinem a vzniká stearan zinečnatý, působí jako aktivátor vulkanizace – zvyšuje účinnost síťování

**Stearin** - směs kyseliny stearové a kyseliny palmitové, reaguje s ZnO a vzniká stearan zinečnatý, působí jako aktivátor vulkanizace – zvyšuje účinnost síťování

**Síra** - nekovový chemický prvek žluté barvy, působí jako vulkanizační činidlo pro nenasycené druhy kaučuků, reakcí řetězců nenasycených kaučuků se sírou vznikají sírné můstky, které způsobí síťování kaučukových směsí (vulkanizaci)

**MBTS80** – urychlovač sírné vulkanizace nenasycených kaučuků

**Duslin** – působí jako inhibitor vulkanizace, prodlužuje zpracovatelskou bezpečnost

**Antonox Fi65** - působí jako inhibitor navulkanizace, zároveň zajišťuje vysokou odolnost proti teplotnímu stárnutí

*Tab. 1. Receptury připravených kaučukových směsí*

	<b>Směs č. 1 S1 – NR+N550</b>	<b>Směs č. 2 S1 – NR+N550+olej</b>	<b>Směs č. 3 S3 – NR</b>
složka	DSK	DSK	DSK
<b>NR</b>	100,00	100,00	100,00
<b>N550</b>	50,00	50,00	0,00
<b>Olej nytex</b>	0,00	10,00	0,00
<b>Vulkanox 4020</b>	1,00	1,00	1,00
<b>ZnO</b>	3,00	3,00	3,00
<b>Stearin</b>	2,00	2,00	2,00
<b>Antonox Fi65</b>	0,65	0,65	0,65
<b>Duslin P OTP</b>	0,65	0,65	0,65
<b>MBTS80</b>	0,75	0,75	0,75
<b>Síra</b>	2,50	2,50	2,50
<b>celkem</b>	160,55	170,55	110,55

## 5.2 Míchání směsí

Míchání kaučukové směsi probíhalo ve dvou krocích. Nejprve byla připravena základní část směsi bez vulkanizačního systému v hnětiči Pomini Farrel. Objem hnětiče je 0,41 l a plnicí faktor byl 0,7. Míchání probíhalo při teplotě 70 °C a rychlosti otáček 111 za minutu. Poté se směs ještě homogenizovala na dvouválci Farrel 150 x 330 mm. Teplota, při které probíhalo míchání cca 1 minutu na dvouválci, byla 60 °C. Poté se směs stáhla a nechala ochladit. Potřebné množství směsi bylo stanoveno přibližně na 2 kg, proto se toto množství směsi míchalo v pěti dávkách. Ty se následně homogenizovaly na dvouválci. Tato směs bez urychlovačů a síry se použila na měření tokových křivek daných směsí. Pro přípravu extrudátu se ve druhém kroku přidal urychlovač, retardér vulkanizace a síra.

Tab. 2. Časový záznam směs č. 1 – NR+N550

	složka	čas [min]
míchání - Hnětič Pominy Farrel	NR	0:00
	Vulkanox 4020	1:00
	ZnO	
	stearin	
	saze 1/2	2:00
	saze 1/2	4:30
	celkem	7:00

Tab. 3. Časový záznam směs č. 2 – NR+N550+olej

	složka	čas [min]
míchání - Hnětič Pominy Farrel	NR	0:00
	Vulkanox 4020	1:00
	ZnO	
	stearin	
	saze 1/2	2:00
	saze 1/4 + 1/2 oleje	3:00
	saze 1/4 + 1/2 oleje	3:30
	celkem	7:00

Tab. 4. Časový záznam směs č. 3 – NR

	složka	čas [min]
míchání - Hnětič Pominy Farrel	NR	0:00
	Vulkanox 4020	1:00
	ZnO	
	stearin	
	celkem	7:00

Tab. 5. Časový záznam domíchání směsi na dvouválcí; u všech směsí stejný

míchání - Dvouválec Farrel	Duslin P OTP	0:00
	Antonox Fi65	
	MBTS80	2:00
	síra	3:00
	celkem	8:00



### 5.3 Viskozita Mooney

Viskozita Mooney je hodnota krouticího momentu po dané době otáčení. Zkouška probíhala tak, že se do temperované komory vložila mezi rotor kaučuková směs ve formě koleček o průměru cca 5 mm a tloušťce cca 6 mm. Poté došlo k uzavření stroje a po předehřevu, který byl 1 min, se začal rotor v materiálu otáčet a začalo samotné měření. Hodnota viskozity Mooney se odečítá po čtyřech minutách od začátku otáčení rotoru. Viskozita se značí v jednotkách ML, kde M je označení Money a L (nebo S) označuje velký nebo malý rotor. [28]

Měření probíhalo na přístroji Mooney 1500S, kde byly z grafů odečteny hodnoty viskozity po čtyřech minutách od začátku měření (Tab. 6)

*Tab. 6. Naměřená viskozita Mooney*

<b>směs</b>	<b>viskozita [ML]</b>
s1 - NR+N550	53
s2 - NR+N550+olej	49
s3 - NR	32

Směs S1 má nejvyšší viskozitu, kvůli svému složení, tzn. Velké procento sazí bez změkčovadel, S2 má viskozitu o něco nižší, obsahuje sice stejné procento sazí jako směs S1, ale navíc obsahuje i olej, který působí jako změkčovadlo, a tím snižuje viskozitu. Nejnižší hodnotu má pochopitelně S3, který neobsahuje žádné saze.

## 6 MĚŘENÍ REOLOGICKÝCH VLASTNOSTÍ

### 6.1 Kapilární reometr

Pro měření byl použit kapilární reometr Rheofliker s tlakovým čidlem HAAKE které mělo tlakový rozsah do 140 MPa. Z připravených kaučukových směsí byly vychystány vzorečky pro měření tokových vlastností. Všechny tři druhy směsí se měřily na dvou kapilárách s poměrem 1/10 a 1/30 a při třech teplotách 110 °C, 120 °C a 150 °C.

#### 6.1.1 Postup měření

Nejdříve se na přístroji navolily požadované smykové rychlosti, které zůstaly stejné pro všechny materiály, kapiláry i teploty, nastavila se požadovaná teplota, a upevnila se kapilára a tlakové čidlo. Jakmile přístroj dosáhl zvolené teploty, byl naplněn kousky kaučukové směsi, připevnil se píst a spustilo se měření. Samotnému měření předcházela předehřev vzorku (4 min), komprese (1 min) a dekomprese (1 min). Po té začalo vlastní měření. Píst stlačoval materiál nastavenou smykovou rychlostí. Sledovaly se hodnoty tlaku za daných smykových rychlostí. Po ukončení zkoušky se celý proces opakoval pro ostatní materiály, teploty a kapiláry.

#### 6.1.2 Výsledky měření

Při měření byly naměřeny hodnoty tlaku, z nichž byly vypočítány hodnoty skutečné viskozity a hodnoty skutečných rychlostí smykové deformace a smykového napětí.

Zdánlivé smykové napětí:

$$\tau_a = \frac{p_k \cdot R}{2 \cdot L} \quad (1)$$

Skutečné smykové napětí:

$$\tau_c = \frac{(p_k - p_z) \cdot R}{2 \cdot L} \quad (2)$$

Index neneutonského chování:

$$n = y' \quad (3)$$

Skutečná rychlost smykové deformace:

$$\dot{\gamma}_c = \dot{\gamma}_a \frac{3n + 1}{4n} \quad (4)$$

Skutečná viskozita:

$$\eta_c = \frac{\tau_c}{\dot{\gamma}_c} \quad (5)$$

$\tau_a$  [Pa] – zdánlivé smykové napětí

$\tau_c$  [Pa] – skutečné smykové napětí

$\dot{\gamma}_a$  [s<sup>-1</sup>] – zdánlivá rychlost smykové deformace

$\dot{\gamma}_c$  [s<sup>-1</sup>] – skutečná rychlost smykové deformace

$p_k$  [Pa] – tlak v kapiláře

$p_z$  [Pa] – tlaková ztráta

$R$  [m] – poloměr kapiláry

$L$  [m] – délka kapiláry

$\eta$  [Pa.s] – skutečná smyková viskozita

### Směs č. 1 – NR+N550

V následujících tabulkách jsou uvedeny výsledky pro směs S1 a teploty měření 110, 120 a 150 °C. Při vyšších teplotách měření jsou výsledky uvedeny do vyšších smykových rychlostí z důvodu, že při nižší teplotě se mnohem dříve dosáhlo limitu tlakového čidla.

Tab. 7. Směs č. 1 – NR+N550 – naměřené a vypočtené hodnoty pro teplotu 110 °C

$\dot{\gamma}_a$ [s <sup>-1</sup> ]	$p$ (L-10) [Pa]	$p$ (L-30) [Pa]	$p_z$ [Pa]	$\tau_a$ [Pa]	$\tau_c$ [Pa]	$n$	$\dot{\gamma}_c$ [s <sup>-1</sup> ]	$\eta_c$ [Pa.s]
51	11590000	32330000	1220000	289750	259250	0,2	100,5	2580,2
71	12950000	35440000	1705000	323750	281125	0,2	140,7	1998,4
100	14370000	38800000	2155000	359250	305375	0,2	199,3	1532,1
158	16060000	42250000	2965000	401500	327375	0,2	317,5	1031,2
251	17720000	45950000	3605000	443000	352875	0,2	508,6	693,9
398	19920000	51790000	3985000	498000	398375	0,2	813,2	489,9

Tab. 8. Směs č. 1 – NR+N550 – naměřené a vypočtené hodnoty pro teplotu 120 °C

$\dot{\gamma}_a$ [s <sup>-1</sup> ]	p (L-10) [Pa]	p (L-30) [Pa]	p <sub>z</sub> [Pa]	$\tau_a$ [Pa]	$\tau_c$ [Pa]	n	$\dot{\gamma}_c$ [s <sup>-1</sup> ]	$\eta_c$ [Pa.s]
51	10420000	26870000	2195000	260500	205625	0,3	78,9	2605,1
71	11380000	29560000	2290000	284500	227250	0,3	112,1	2026,3
100	12950000	33870000	2490000	323750	261500	0,3	161,5	1618,8
158	14480000	38320000	2560000	362000	298000	0,3	263,6	1130,6
251	16040000	42360000	2880000	401000	329000	0,3	433,9	758,2
398	17680000	46110000	3465000	442000	355375	0,2	715,5	496,7
631	19560000	51290000	3695000	489000	396625	0,2	1184,3	334,9

Tab. 9. Směs č. 1 – NR+N550 – naměřené a vypočtené hodnoty pro teplotu 150 °C

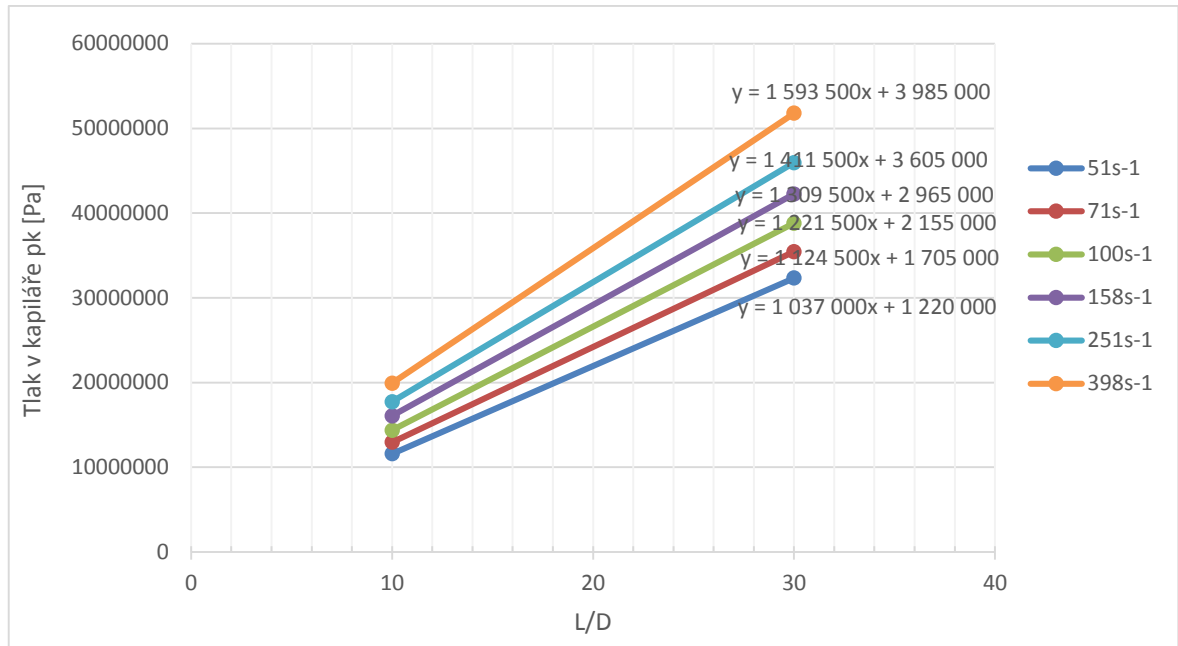
$\dot{\gamma}_a$ [s <sup>-1</sup> ]	p (L-10) [Pa]	p (L-30) [Pa]	p <sub>z</sub> [Pa]	$\tau_a$ [Pa]	$\tau_c$ [Pa]	n	$\dot{\gamma}_c$ [s <sup>-1</sup> ]	$\eta_c$ [Pa.s]
51	7660000	21620000	680000	191500	174500	0,4	70,1	2490,2
71	8930000	25390000	700000	223250	205750	0,4	101,8	2021,2
100	10500000	29520000	990000	262500	237750	0,3	150,9	1575,6
158	12050000	34050000	1050000	301250	275000	0,3	259,1	1061,5
251	13950000	39150000	1350000	348750	315000	0,2	458,7	686,8
398	16080000	42410000	2915000	402000	329125	0,2	841,4	391,2
631	17700000	44910000	4095000	442500	340125	0,1	1646,0	206,6
1000	18850000	47450000	4550000	471250	357500	0,1	3663,8	97,6
1585	20650000	51020000	5465000	516250	379625	0,0	11877,2	32,0

**Příklad výpočtu S1 pro teplotu 110 °C, korekce podle Rabinowitsche:**

Zdánlivé smykové napětí:

$$\tau_a = \frac{p_{k,R}}{2.L} = \frac{11590000.0,0005}{2.0,01} = 289750 \text{ Pa} \quad (6)$$

Tlaková ztráta v kapiláře p<sub>z</sub> byla určena pomocí Bragleyho křivek.

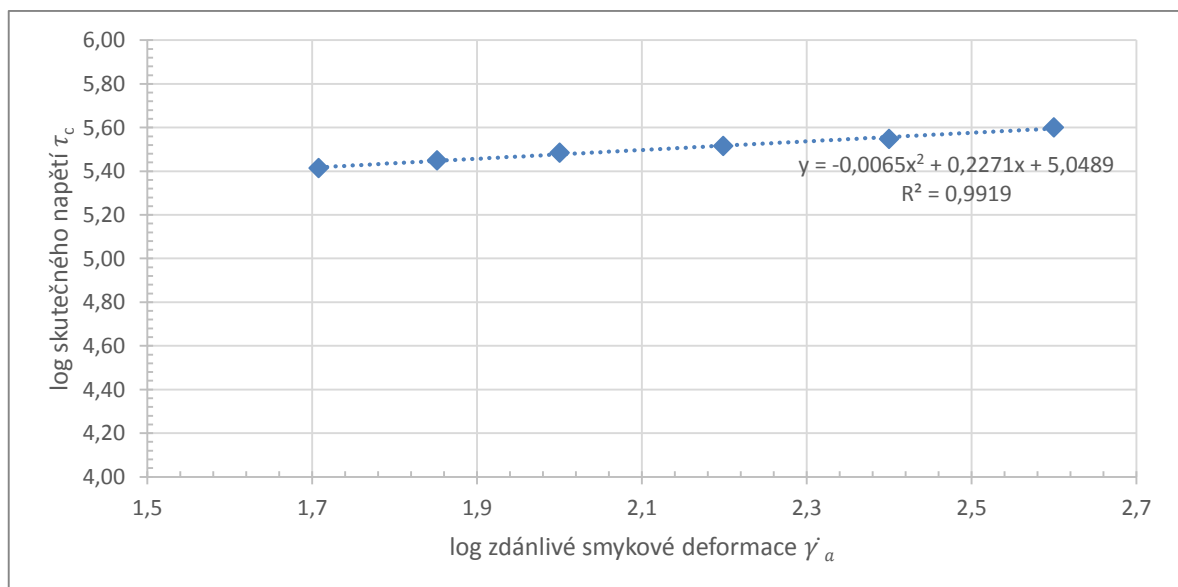


Graf 1. Korekce na tlakovou ztrátu v kapiláře – Bragleyho křivky směs č. 1 - 110 °C

Skutečné smykové napětí:

$$\tau_c = \frac{(p_k - p_z) \cdot R}{2 \cdot L} = \frac{(11590000 - 1220000) \cdot 0,0005}{2 \cdot 0,01} = 259250 \text{ Pa} \quad (7)$$

Následně byla do grafu vynesena závislost logaritmu zdánlivé rychlosti smykové deformace a logaritmu skutečného smykového napětí (Graf 2). Tato závislost byla proložena polynomem druhého stupně a zderivována.



Graf 2. Stanovení indexu n pro S1 - 110 °C

Index neneutonského chování:

$$n = y' = -0,013x + 0,2271 \quad (8)$$

$$\text{kde } x = \ln \dot{\gamma}_a \quad (9)$$

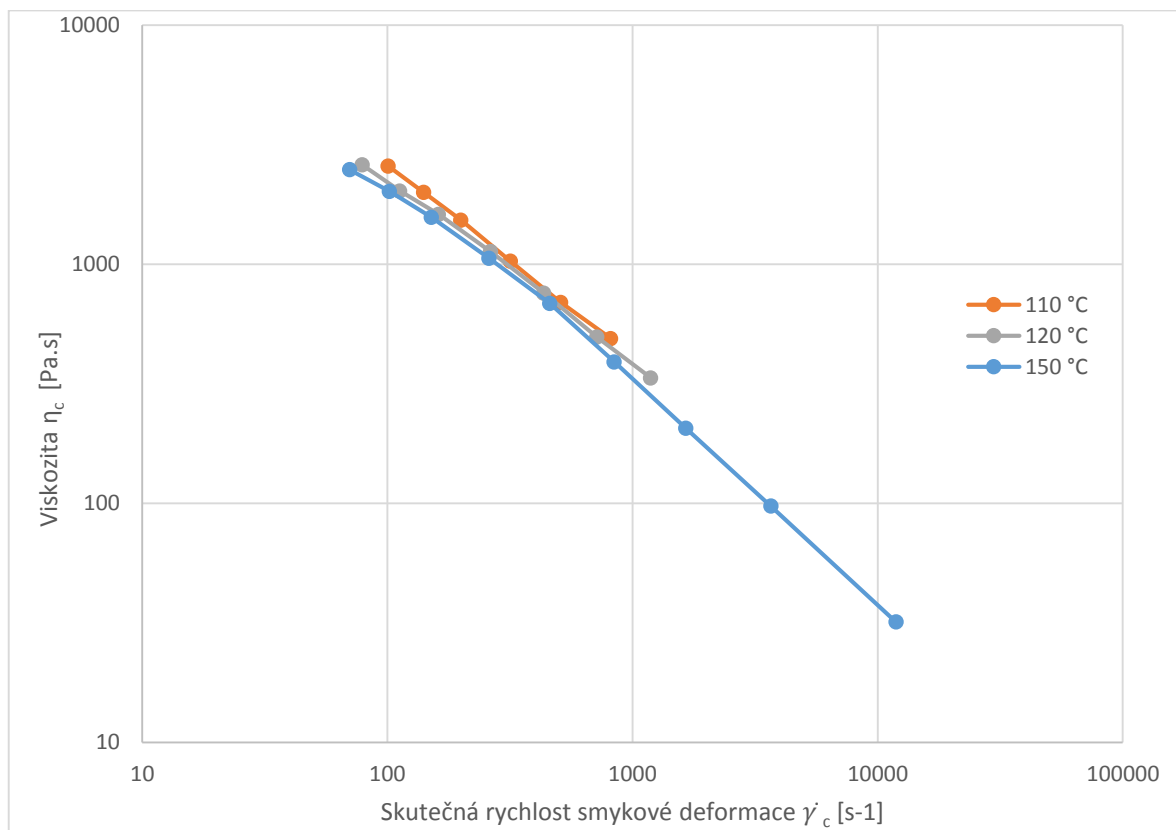
Skutečná rychlost smykové deformace:

$$\dot{\gamma}_c = \dot{\gamma}_a \frac{3n+1}{4n} = 51 \frac{3(-0,013 \cdot \ln 51 + 0,2271) + 1}{4(-0,013 \cdot \ln 51 + 0,2271)} = 100,5 \text{ s}^{-1} \quad (10)$$

Skutečná viskozita:

$$\eta = \frac{\tau_c}{\dot{\gamma}_c} = \frac{259250}{100,5} = 2580,2 \text{ Pa}\cdot\text{s} \quad (11)$$

### Tokové křivky S1-NR+N550



Graf 3. Závislost viskozity na rychlosti smykové deformace u směsi S1

Z grafu je patrné, že závislost viskozity na rychlosti smykové deformace dosahuje nejvyšších hodnot u směsi při 110 °C. Pohyb segmentů není tak velký, dochází k odporu vůči tečení, a proto při teplotě 110 °C je viskozita nejvyšší. Přesně naopak je to u teploty 150 °C, kde je viskozita nejnižší.

## Směs č. 2 – NR+N550 + olej

V následujících tabulkách jsou uvedeny výsledky pro směs S2 a teploty měření 110, 120 a 150 °C.

Tab. 10. Směs č. 2 – NR+N550+olej – naměřené a vypočtené hodnoty pro teplotu 110 °C

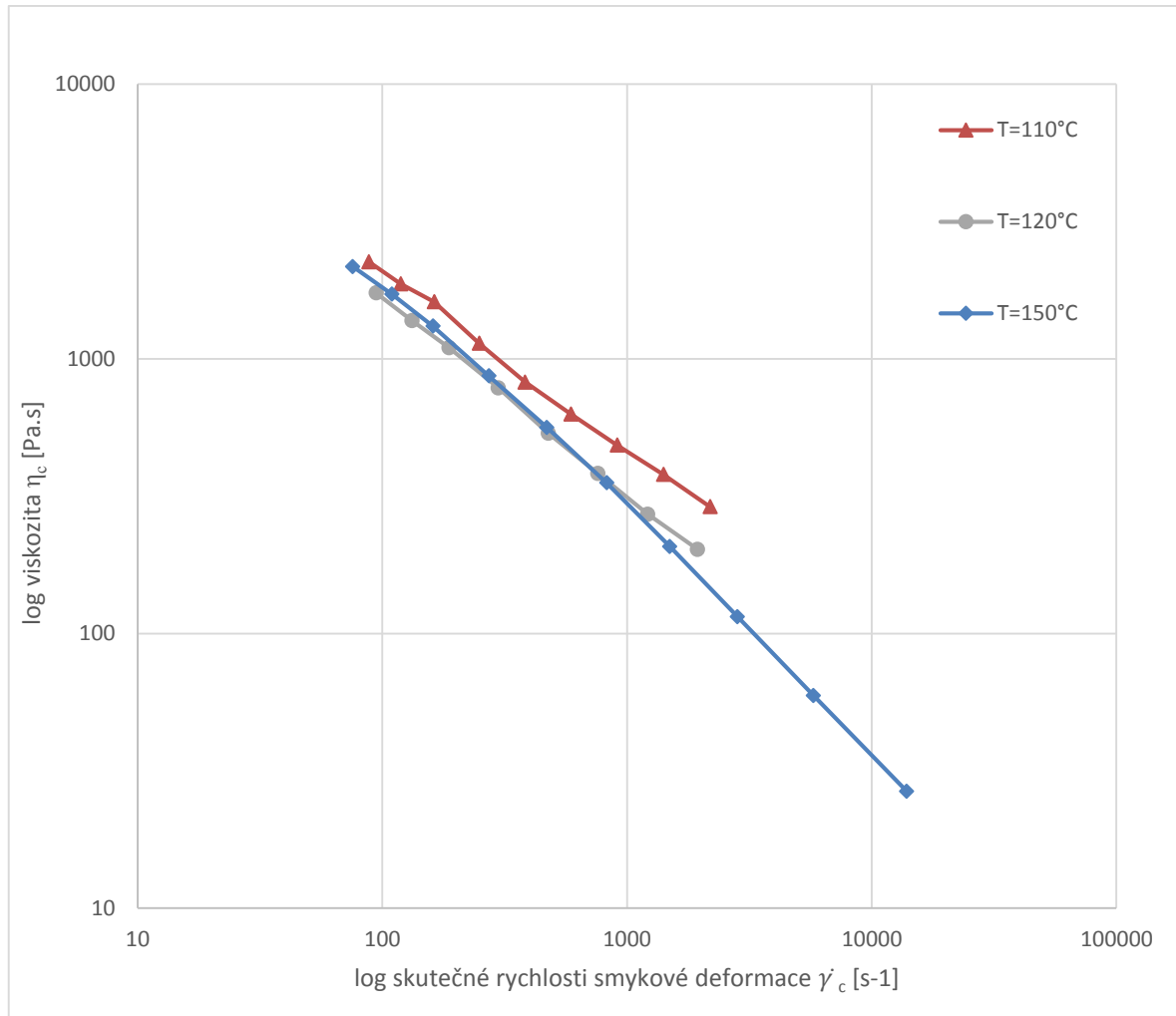
$\dot{\gamma}_a$ [s <sup>-1</sup> ]	p (L-10) [Pa]	p (L-30) [Pa]	p <sub>z</sub> [Pa]	$\tau_a$ [Pa]	$\tau_c$ [Pa]	n	$\dot{\gamma}_c$ [s <sup>-1</sup> ]	$\eta_c$ [Pa.s]
51	11020000	26900000	3080000	275500	198500	0,3	88,0	2255,9
71	12090000	29920000	3175000	302250	222875	0,3	119,0	1872,9
100	13850000	34870000	3340000	346250	262750	0,3	163,0	1612,0
158	14780000	37450000	3445000	369500	283375	0,3	248,9	1138,6
251	16720000	41920000	4120000	418000	315000	0,3	383,1	822,3
398	19190000	48890000	4340000	479750	371250	0,3	590,2	629,0
631	23800000	59150000	6125000	595000	441875	0,4	911,3	484,9
1000	29140000	71930000	7745000	728500	534875	0,4	1409,5	379,5
1585	38570000	89180000	13265000	964250	632625	0,4	2184,1	289,7

Tab. 11. Směs č. 2 – NR+N550+olej – naměřené a vypočtené hodnoty pro teplotu 120 °C

$\dot{\gamma}_a$ [s <sup>-1</sup> ]	p (L-10) [Pa]	p (L-30) [Pa]	p <sub>z</sub> [Pa]	$\tau_a$ [Pa]	$\tau_c$ [Pa]	n	$\dot{\gamma}_c$ [s <sup>-1</sup> ]	$\eta_c$ [Pa.s]
51	10430000	23550000	3870000	260750	164000	0,2	94,4	1737,7
71	11510000	26070000	4230000	287750	182000	0,2	132,0	1378,3
100	12640000	29070000	4425000	316000	205375	0,2	187,0	1098,5
158	13870000	32520000	4545000	346750	233125	0,2	297,5	783,6
251	15260000	35690000	5045000	381500	255375	0,2	476,1	536,4
398	16850000	40110000	5220000	421250	290750	0,2	760,5	382,3
631	18830000	45240000	5625000	470750	330125	0,2	1214,8	271,8
1000	21380000	52800000	5670000	534500	392750	0,2	1939,9	202,5

Tab. 12. Směs č. 2 – NR+N550+olej – naměřené a vypočtené hodnoty pro teplotu 150 °C

ya	10	30	p <sub>z</sub>	Ta	Tc	n	yc	nc
51	8870000	21990000	2310000	221750	164000	0,3	75,7	2167,3
71	9840000	24890000	2315000	246000	188125	0,3	109,4	1720,0
100	10990000	27920000	2525000	274750	211625	0,3	160,9	1314,9
158	12020000	30900000	2580000	300500	236000	0,3	272,2	867,1
251	13240000	34390000	2665000	331000	264375	0,2	469,9	562,6
398	14510000	37880000	2825000	362750	292125	0,2	825,8	353,7
631	15780000	40560000	3390000	394500	309750	0,2	1493,8	207,4
1000	17510000	43540000	4495000	437750	325375	0,1	2824,7	115,2
1585	19700000	47180000	5960000	492500	343500	0,1	5774,2	59,5
2512	22540000	52170000	7725000	563500	370375	0,1	13883,2	26,7



Graf 4. závislost viskozity na rychlosti smykové deformace u směsi S2

Tokové charakteristiky S2 podobně jako při měření S1 dokazují, že závislost viskozity na rychlosti smykové deformace se s teplotou mění – klesá.

### Směs č. 3 – NR

V následujících tabulkách jsou uvedeny výsledky měření pro směs S3 a teploty měření 110, 120 a 150 °C.



Tab. 13. Směs č. 3 – NR - naměřené a vypočtené hodnoty pro teplotu 110 °C

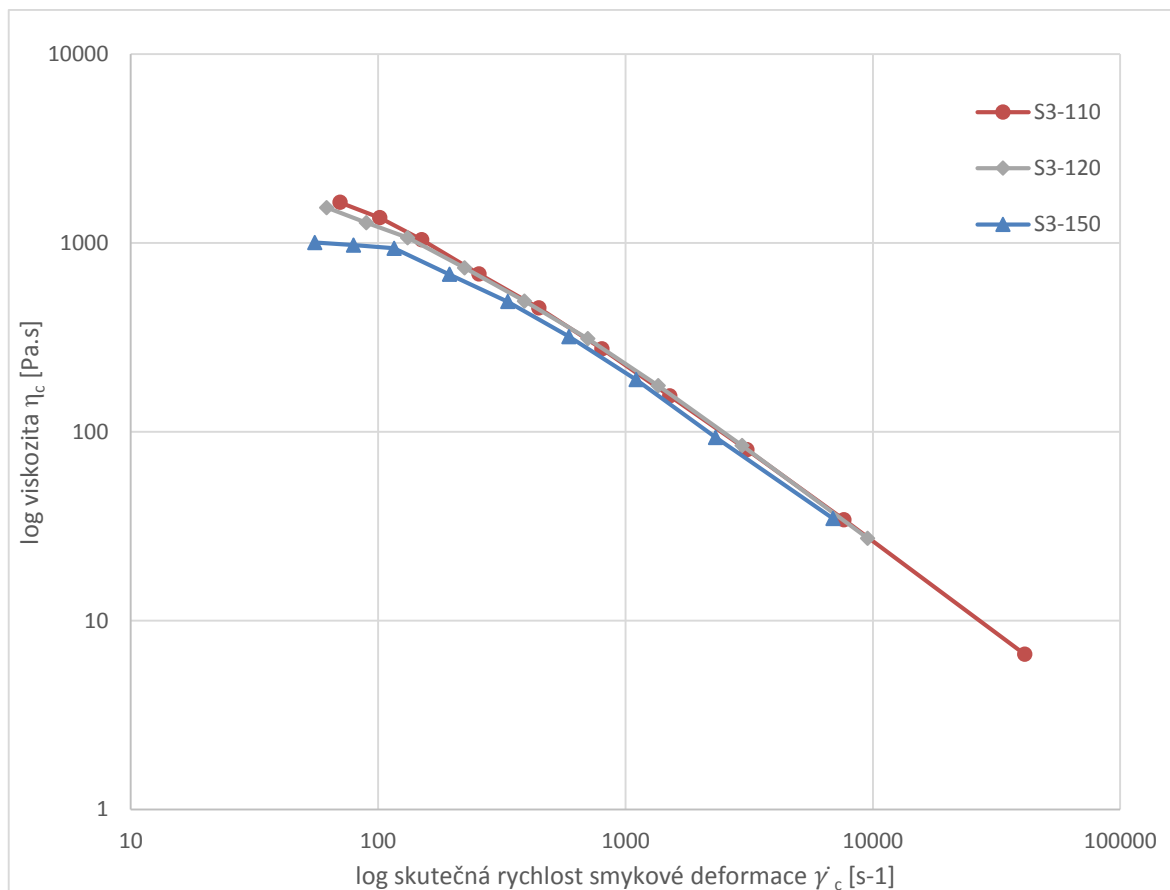
$\dot{\gamma}_a$ [s <sup>-1</sup> ]	p (L-10) [Pa]	p (L-30) [Pa]	p <sub>z</sub> [Pa]	$\tau_a$ [Pa]	$\tau_c$ [Pa]	n	$\dot{\gamma}_c$ [s <sup>-1</sup> ]	$\eta_c$ [Pa.s]
51	7080000	16290000	2475000	177000	115125	0,4	70,1	1642,0
71	8060000	19120000	2530000	201500	138250	0,4	101,5	1361,5
100	8880000	21360000	2640000	222000	156000	0,3	149,9	1040,7
158	9810000	23820000	2805000	245250	175125	0,3	255,3	685,9
251	10930000	27100000	2845000	273250	202125	0,2	446,4	452,8
398	12180000	29830000	3355000	304500	220625	0,2	802,0	275,1
631	13550000	32230000	4210000	338750	233500	0,2	1509,8	154,7
1000	15090000	34990000	5140000	377250	248750	0,1	3090,8	80,5
1585	16990000	37930000	6520000	424750	261750	0,1	7643,0	34,2
2512	19770000	41620000	8845000	494250	273125	0,0	41144,9	6,6

Tab. 14. Směs č. 3 – NR - naměřené a vypočtené hodnoty pro teplotu 120 °C

$\dot{\gamma}_a$ [s <sup>-1</sup> ]	p (L-10) [Pa]	p (L-30) [Pa]	p <sub>z</sub> [Pa]	$\tau_a$ [Pa]	$\tau_c$ [Pa]	n	$\dot{\gamma}_c$ [s <sup>-1</sup> ]	$\eta_c$ [Pa.s]
51	6090000	13720000	2275000	152250	95375	0,5	61,9	1539,6
71	7070000	16230000	2490000	176750	114500	0,5	89,4	1280,5
100	8290000	19510000	2680000	207250	140250	0,4	131,6	1065,9
158	9310000	22500000	2715000	232750	164875	0,4	223,4	738,1
251	10540000	25900000	2860000	263500	192000	0,3	390,3	491,9
398	11560000	29120000	2780000	289000	219500	0,2	705,0	311,4
631	12790000	31840000	3265000	319750	238125	0,2	1354,5	175,8
1000	14080000	34120000	4060000	352000	250500	0,1	2956,5	84,7
1585	15650000	36460000	5245000	391250	260125	0,0	9518,5	27,3

Tab. 15. Směs č. 3 – NR - naměřené a vypočtené hodnoty pro teplotu 150 °C

$\dot{\gamma}_a$ [s <sup>-1</sup> ]	p (L-10) [Pa]	p (L-30) [Pa]	p <sub>z</sub> [Pa]	$\tau_a$ [Pa]	$\tau_c$ [Pa]	n	$\dot{\gamma}_c$ [s <sup>-1</sup> ]	$\eta_c$ [Pa.s]
51	4770000	9230000	2540000	119250	55750	0,7	55,4	1006,2
71	5830000	12020000	2735000	145750	77375	0,7	79,4	974,3
100	7290000	15980000	2945000	182250	108625	0,6	115,9	937,2
158	8510000	19110000	3210000	212750	132500	0,5	194,2	682,1
251	9770000	22840000	3235000	244250	163375	0,4	333,9	489,3
398	10830000	25920000	3285000	270750	188625	0,3	590,8	319,3
631	11840000	28520000	3500000	296000	208500	0,3	1104,1	188,8
1000	12950000	30240000	4305000	323750	216125	0,2	2314,5	93,4
1585	13860000	33040000	4270000	346500	239750	0,1	6889,6	34,8



Graf 5. Závislost viskozity na rychlosti smykové deformace u směsi S3

U posledního grafu se opět potvrzuje pravidlo závislosti viskozity na rychlosti smykové deformace. Zde není rozdíl mezi jednotlivými měřeními tak výrazný z toho důvodu, že směs neobsahuje plniva, a proto odpor proti tečení není tak velký jako u směsí plněnými sazemi.

### 6.1.3 Vyhodnocení výsledků

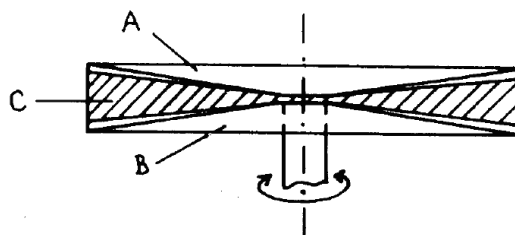
Při měření tokových vlastností při zadaných rychlostech smykové deformace bylo zjištěno, že s rostoucí teplotou klesá viskozita kaučukové směsi. Zároveň také s rostoucí teplotou klesá tlak.

Co se týče porovnání tokových vlastností jednotlivých směsí, tak u S1 – NR+N550 byla naměřena nejvyšší viskozita v závislosti na rychlostech smykové deformace. U směsi S1 – NR zase nejnižší, což bylo způsobeno složením směsi. S3 totiž neobsahovala žádné plniva, a proto neměla tak velký odpor proti tečení, jako ostatní směsi a tím pádem měla i nejnižší hodnoty naměřeného tlaku.

## 6.2 RPA – Rubber Process Analyser

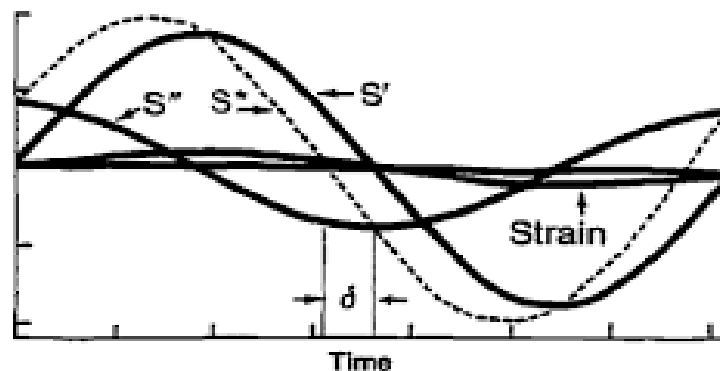
Pro stanovení většího rozsahu průběhu toku materiálu byly vzorky změřeny na vulkometru RPA.

RPA je bezrotorový vulkometr pro měření viskoelastických a dynamických vlastností kaučuků, kaučukových směsí a pryží. Jeho konstrukce je typu „kužel-kužel“ (Obr. 7), to znamená, že po celém povrchu vzorku je zaručeno stejné smykové namáhání. Zkouška se provádí při velmi vysokých hodnotách úhlu deformace, s vysokými hodnotami oscilace, které odpovídají hodnotám technologií při zpracování směsi. [25]



Obr. 7. RPA - konstrukce typu „kužel-kužel“

Na obrázku (Obr. 8) je graficky znázorněn sinusoidní pohyb spodní části formy s odpovědí komplexního točivého momentu ( $S^*$ ), který je měřen čidlem umístěným v horní části formy. Odpověď modulu je měřena přes čidlo mimo fázi s fázovým posunutím o úhel  $\delta$ , a to z důvodu viskoelastických napětí v kaučuku. [30]



Obr. 8. Aplikace sinusoidní deformace sloužící k rozdělení krouticího momentu  $S^*$  na elastickou ( $S'$ ) a viskózní složku ( $S''$ ) [30]

Měření se provádělo na přístroji Rubber Process Analyzer 2000 (RPA 2000) v laboratoři AlfaTechnologies.

### 6.2.1 Deformační test – strain sweep

Nejprve se měřil deformační test – strain sweep při konstantní frekvenci 0,1 Hz se měřila různá deformace při daných teplotách 110, 120 a 150 °C. Podmínky testu byly následující:

- Timed01 – ustálení podmínek (teploty vzorku) pro měření po dobu 3 minut, deformaci 1 % a frekvenci 0,1 Hz.
- Strain02 – deformační test měřen pro frekvenci 0,1 Hz a deformaci 0,01 – 10 %
- Strain03 – deformační test měřen pro frekvenci 0,1 Hz a deformaci 10 – 200 %

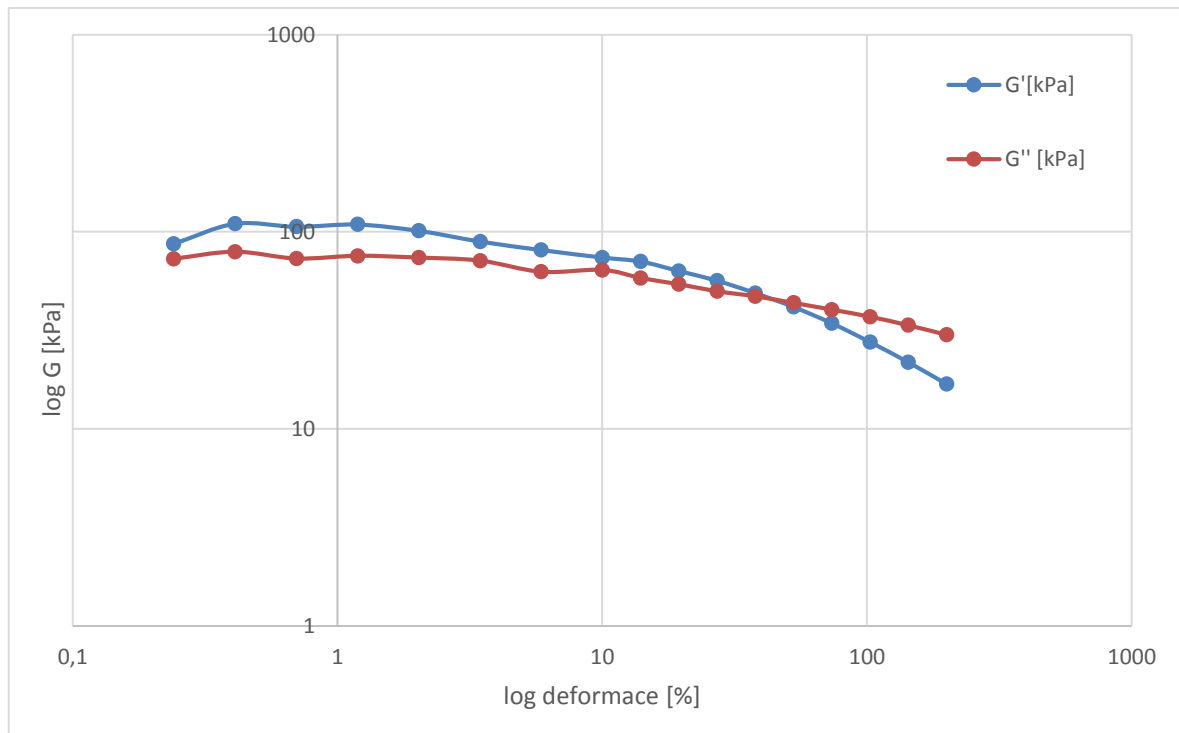
Sleduje se závislost  $G'$  a  $G''$  na % deformace. Kde  $G'$  je souřazový dynamický modul (elastická složka) a  $G''$  je ztrátový dynamický modul (viskózní složka).

#### Vzorový příklad pro směs č. 1 – NR+N550

V následující tabulce a grafu jsou uvedeny výsledky měření deformačního testu  $G'$ ,  $G''$ .

Tab. 16. Hodnoty deformačního testu SI-NR+550

deformace [%]	$G'$ [kPa]	$G''$ [kPa]
0,24	86,84	72,90
0,41	109,96	79,15
0,70	106,18	73,13
1,19	108,98	75,51
2,03	101,18	73,91
3,46	89,30	71,37
5,88	80,89	62,67
10,00	74,11	64,07
13,95	70,75	58,27
19,46	63,28	54,21
27,14	56,50	49,92
37,86	48,87	47,09
52,82	41,54	43,59
73,68	34,34	40,29
102,78	27,55	37,10
143,37	21,76	33,57
200,00	16,86	30,03



Graf 6. závislost deformace na smykovém modulu pro S1 – 110 °C

Z grafu je patrné, že z důvodu poklesu  $G'$  a  $G''$  s rostoucí deformací probíhal test i nelineární viskoelastické oblasti.

### 6.2.2 Frekvenční test – frequency sweep

Následně se ze zkoumaných směsí měřil frekvenční test pro teploty 110, 120 a 150 °C za následujících podmínek:

- Timed01 – ustálení podmínek po dobu 3 minut, frekvenci 0,1 Hz a deformaci 1 %
- Freq02 – frekvenční test měřen při deformaci 10 % a frekvenci 0,01 – 50 Hz.

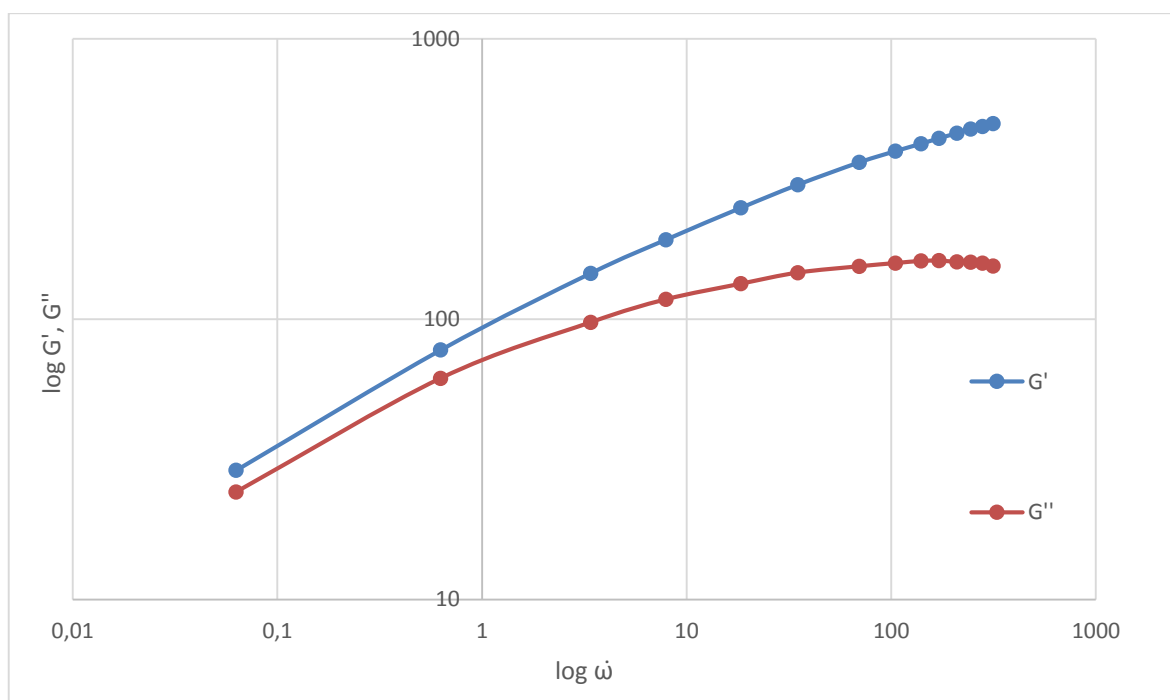
Frekvenční test sleduje závislost smykového modulu, jeho elastické, reálné složky  $G'$  a viskózní, imaginární složky  $G''$  na úhlové rychlosti. Dále byly také díky tomuto testu změřeny tokové křivky, závislost viskozity na úhlové rychlosti.

### Vzorový příklad pro směs č. 1 – NR+N550

Z naměřených hodnot (Tab. 17) byla stanovena závislost smykového modulu na úhlové rychlosti u směsi S1 při teplotě 110 °C.

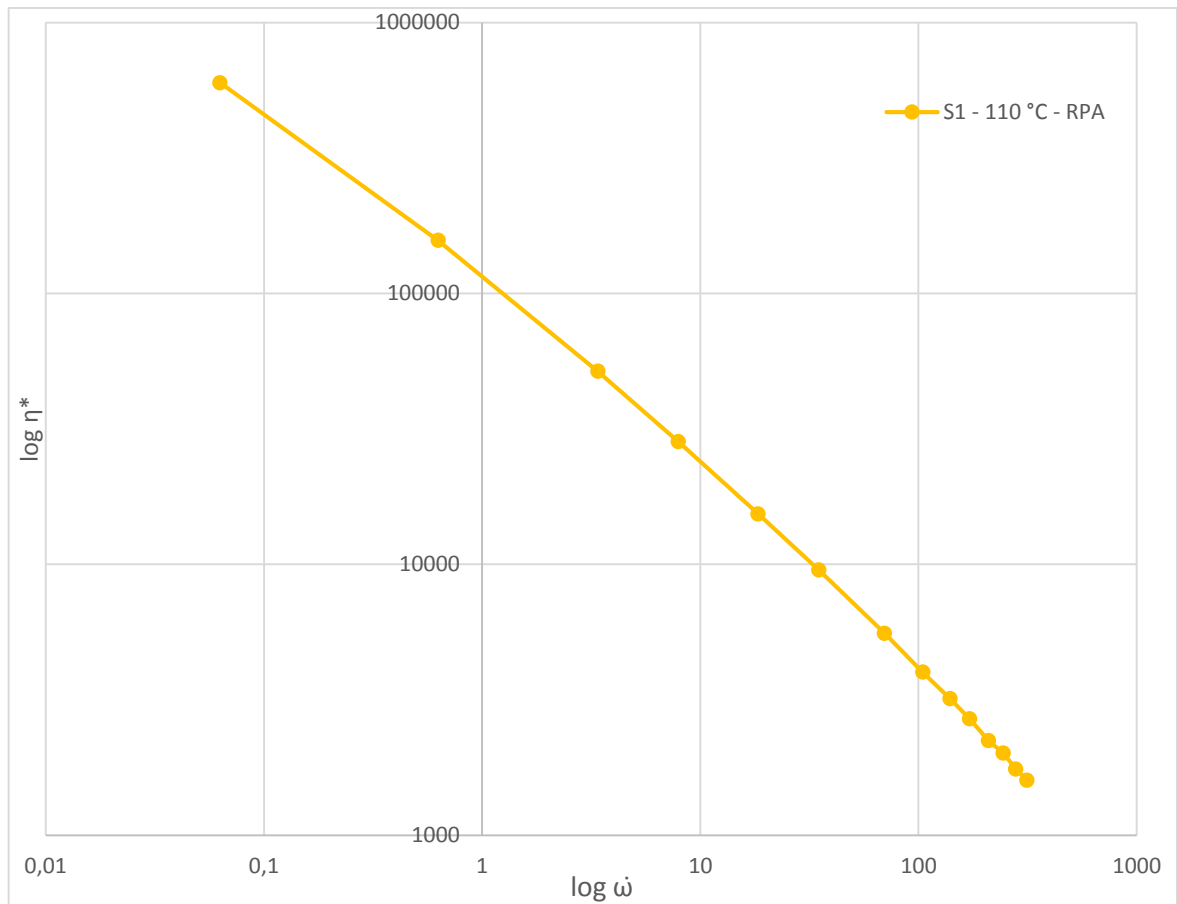
Tab. 17. Hodnoty frekvenčního testu S1-NR+550

frekvence [hz]	$\dot{\omega}$ [ $s^{-1}$ ]	$G'$ [kPa]	$G''$ [kPa]	$\eta^*$ [Pa.s]
0,01	0,063	599039	28,87	24,17
0,1	0,63	156914	77,56	61,5
0,54	3,39	51595	145,55	97,31
1,26	7,91	28399	191,84	117,5
2,93	18,4	15338	249,23	133,59
5,56	34,9	9531	301,27	146,35
11,12	69,8	5563	362,18	154,18
16,67	105	3998	396,87	158,26
22,23	140	3191	421,8	161,1
27,28	171	2692	441,29	161,49
33,34	209	2233	460,18	159,88
38,89	244	2012	475,51	159,62
44,45	279	1756	485,62	158,31
50	314	1595	498,41	154,56

Graf 7. RPA - Závislost  $G'$   $G''$  na úhlové rychlosti u směsi s1-110 °C

Na grafu je vynesena závislost smykového modulu na úhlové rychlosti.

Poté byla z naměřených hodnot úhlové rychlosti a viskozity sestavena toková křivka pro směs S1 - NR+N550 při teplotě 110 °C.

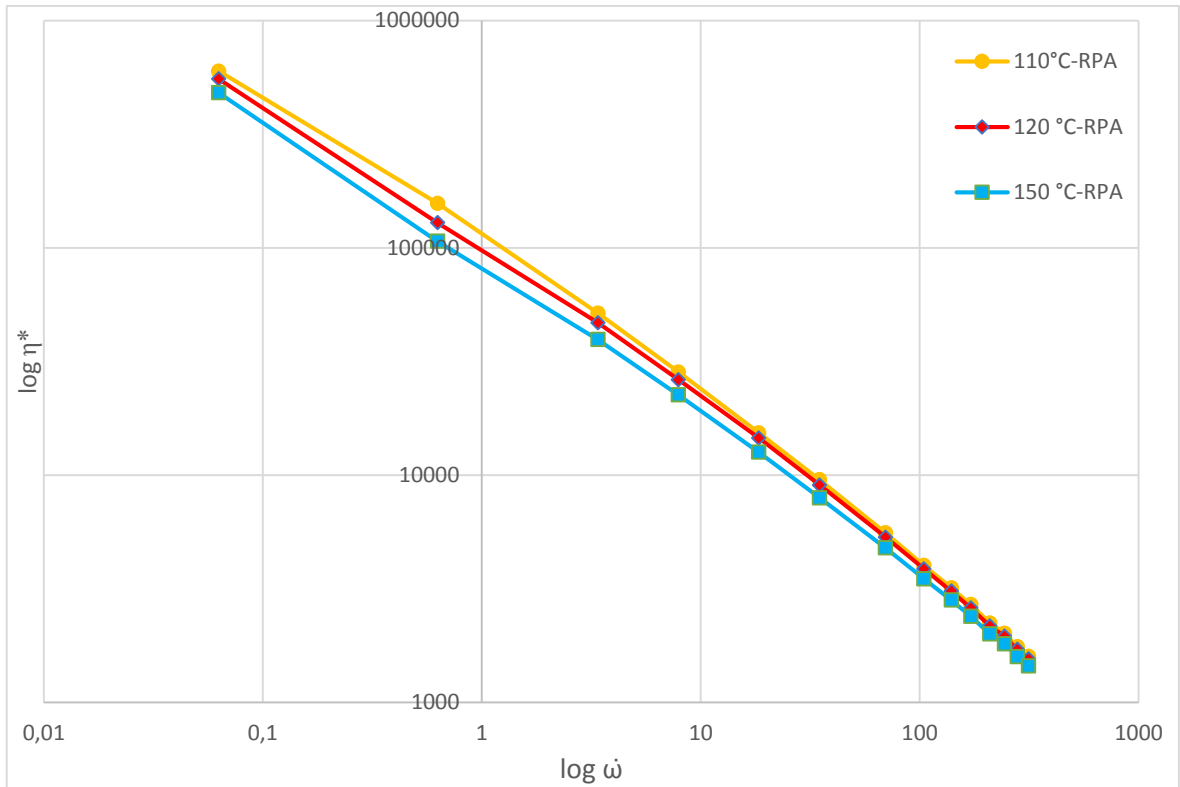


Graf 8. RPA - Závislost viskozity na úhlové rychlosti u směsi S1 - 110 °C

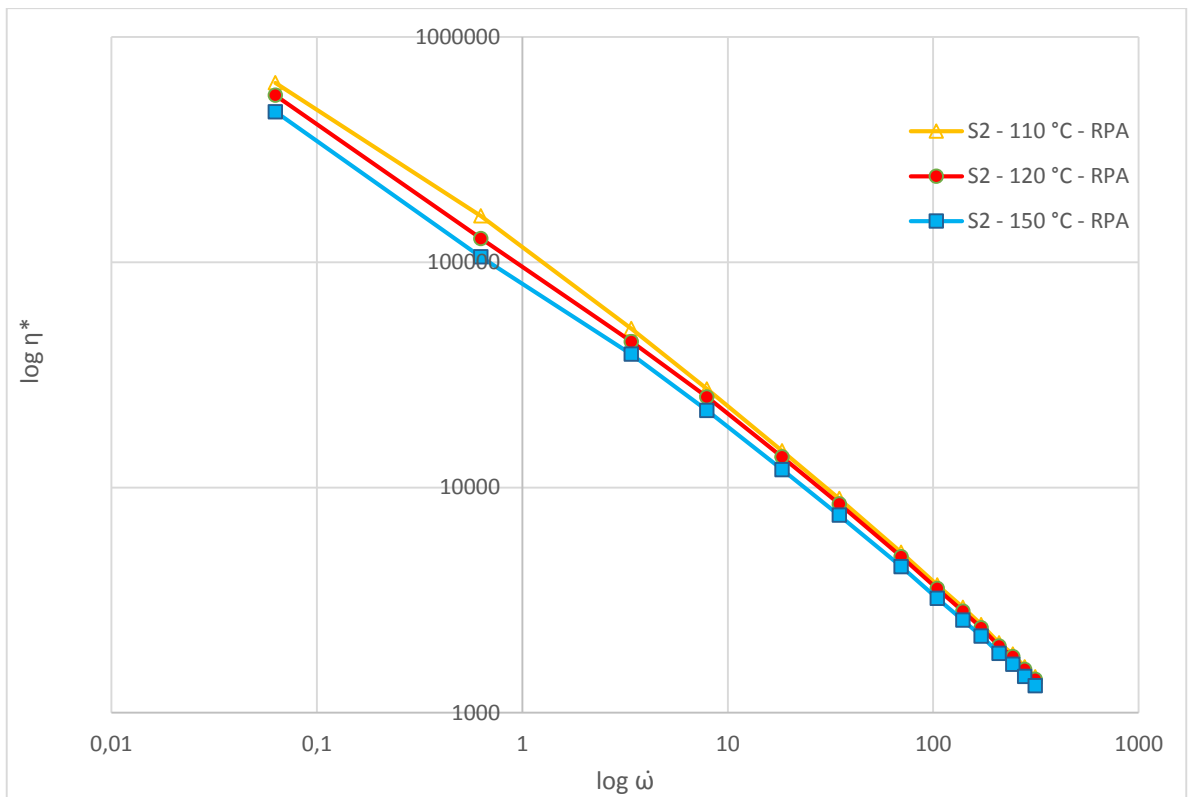
Graf znázorňuje tokovou křivku směsi S1 - 110 °C, zejména její lineární oblast, kdy se zvyšující se úhlovou rychlostí klesá viskozita směsi.

#### 6.2.2.1 Výsledky měření

Z naměřených hodnot viskozity a úhlové rychlosti byly sestrojeny tokové křivky pro každý materiál při teplotách 110, 120 a 150 °C.

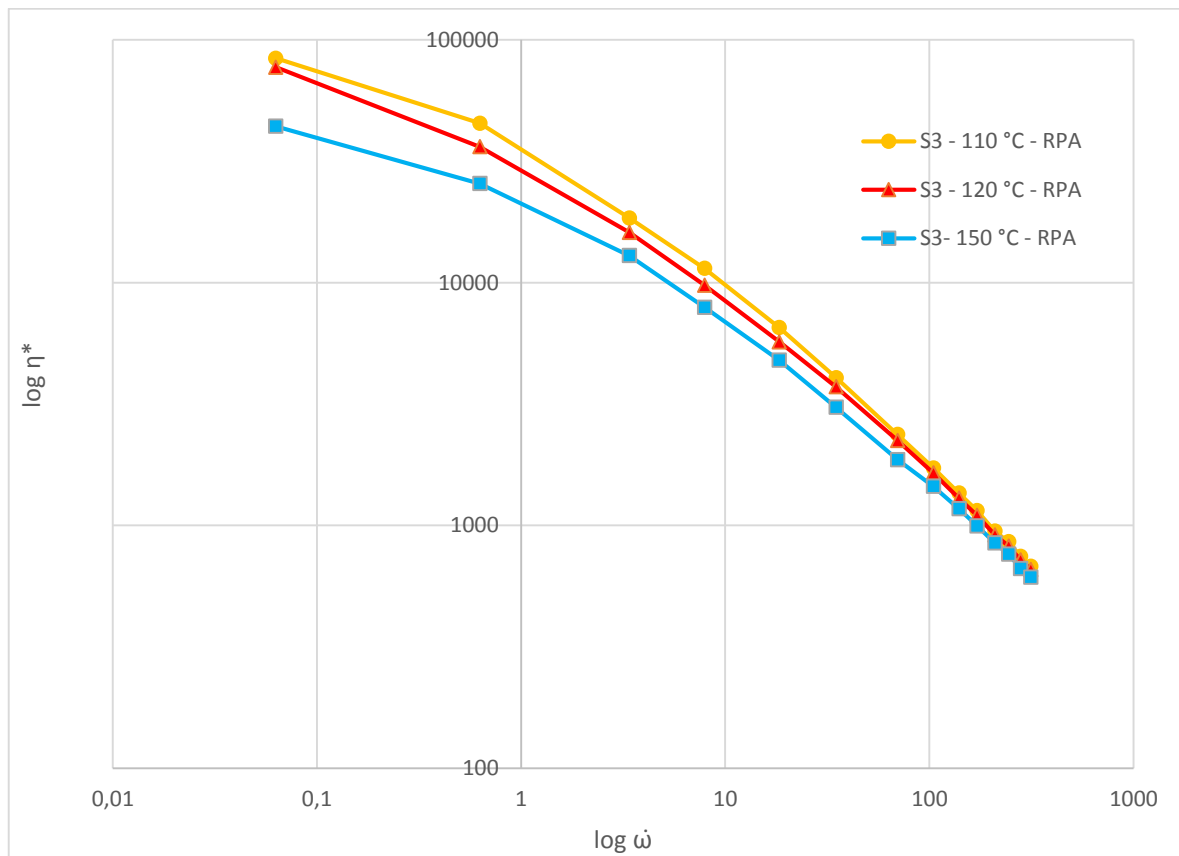


Graf 9. tokové křivky z RPA – S1 – NR+N550 – závislost viskozity na úhlové rychlosti



Graf 10. tokové křivky z RPA – S2 – NR+N550+olej – závislost viskozity na úhlové rychlosti



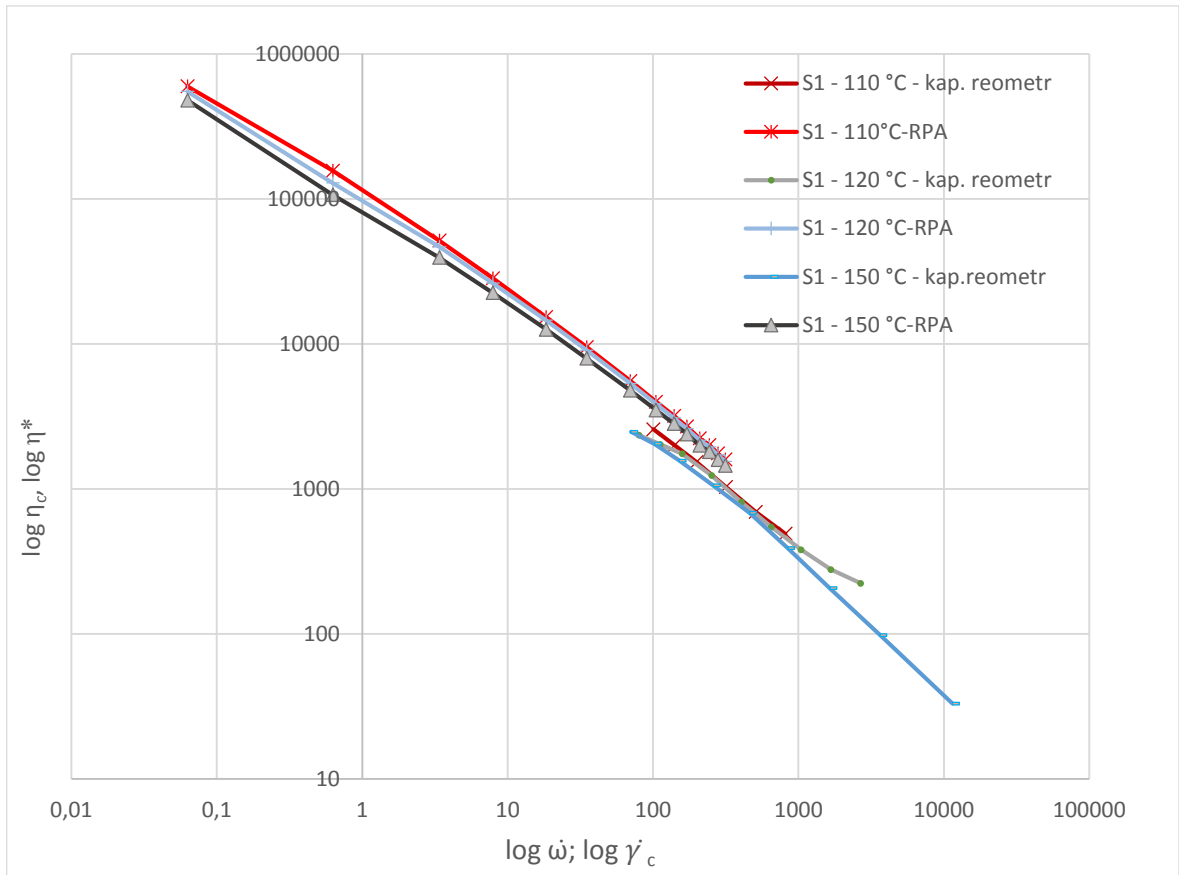


Graf 11. tokové křivky z RPA – S3 – NR – závislost viskozity na úhlové rychlosti

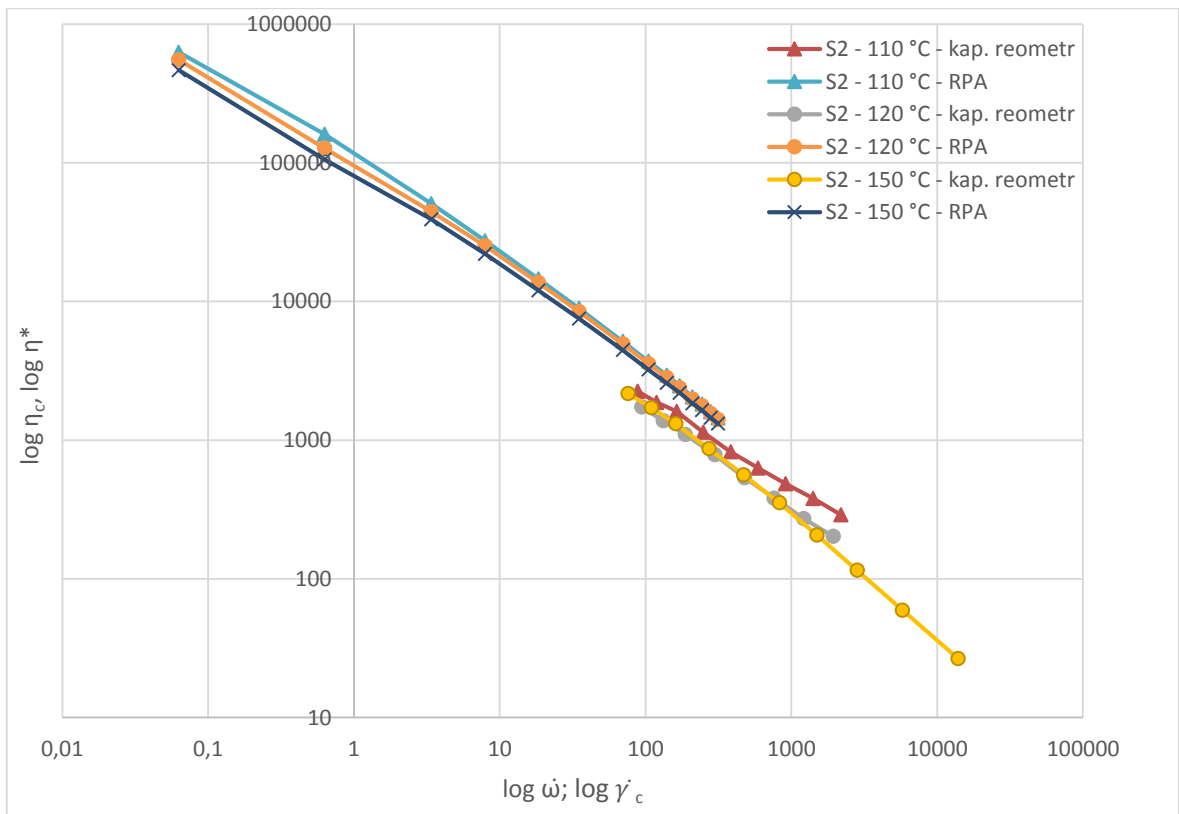
Grafy tokových křivek znázorňují oblast pseudoplastického chování kaučukové směsi. Je zde vidět, jak s rostoucí teplotou klesá viskozita. Směs S1 a S2 zachycuje pouze lineární zpracovatelskou oblast. U S3 vidíme na grafu (Graf 11) přechod z prvního newtonského plata do lineární pseudoplastické oblasti. Je také patrné, že se zvyšující se teplotou se newtonské plató posouvá do vyšších úhlových rychlostí.

### Sloučení křivek z kapilárního reometru a RPA

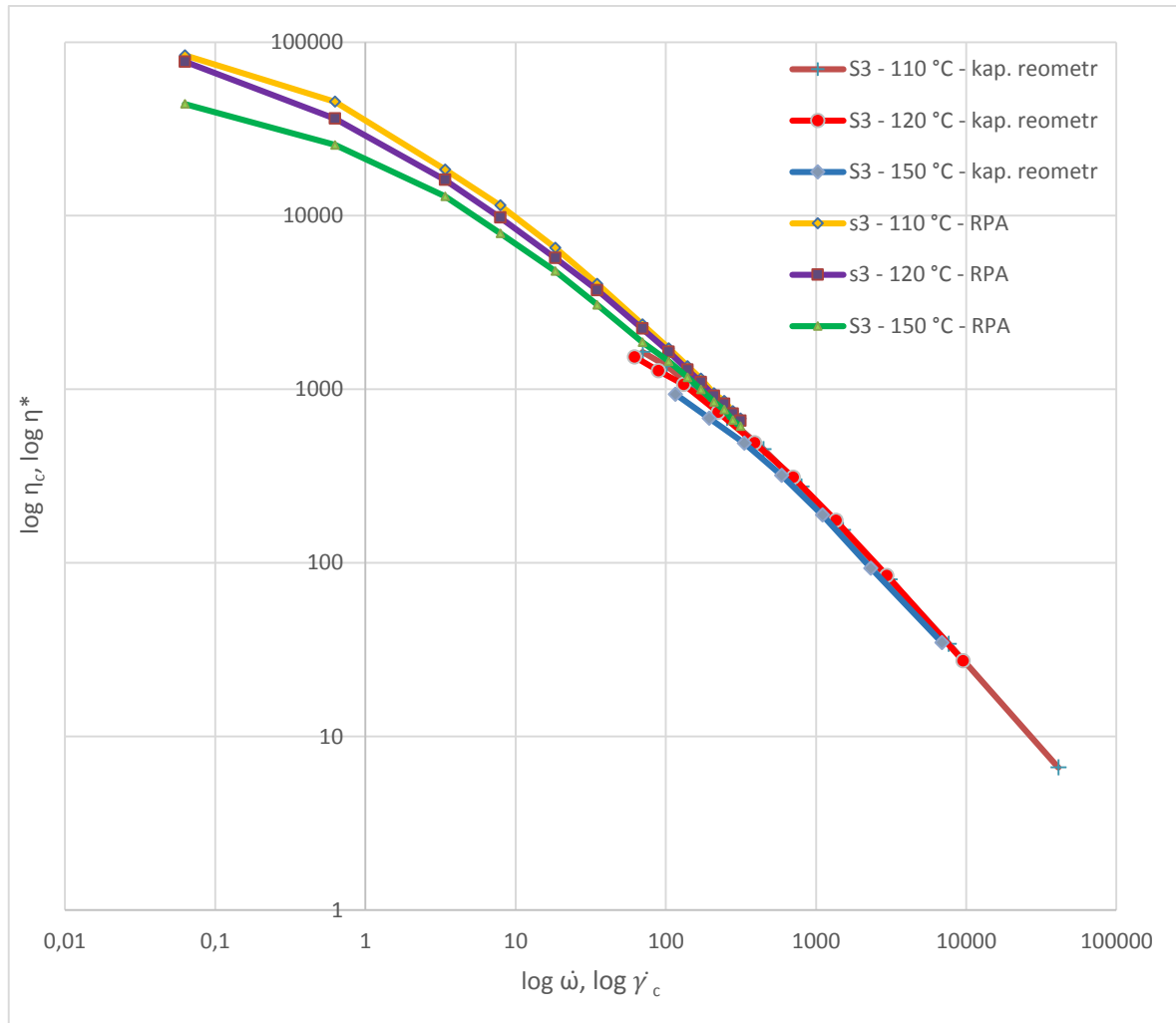
Sestavené křivky z RPA byly dále sloučeny s křivkami z kapilárního reometru. Na RPA byly změřeny hodnoty pouze při nižších rychlostech, zato při měření na kapilárním reometru jsme získali hodnoty při vyšších rychlostech smykové deformace. Proto byly křivky sloučeny, abychom získali širší přehled o tokových vlastnostech měřených kaučukových směsí.



Graf 12. Sloučené tokové křivky pro směs S1, teploty 110 °C, 120 °C a 150 °C



Graf 13. Sloučené tokové křivky pro směs S2, teploty 110 °C, 120 °C a 150 °C



Graf 14. Sloučené tokové křivky pro směs S3, teploty 110 °C, 120 °C a 150 °C

U sloučených grafů jde vidět návaznost tokových křivek z RPA a kapilárního reometru. U směsí S1 a S2 je zachycena pouze lineární oblast, zatímco u S3 jde vidět i oblast přechodu z newtonského plata do oblasti pseudoplastické. U všech měření je s rostoucí teplotou i značný pokles viskozity.

Tokové křivky z RPA a kapilárního reometru na sebe přesně navenazují nejspíš z důvodu nepřesnosti měření u kapilárního reometru, kvůli nedostatečnému prohřátí vzorku, nedokonalému ustálení tlaků při měření nebo použitím tlakového čidla s velkým rozsahem do 140 barů. Proto jsou u RPA jsou výsledky určitě přesnější, ale může mít vliv použití separační fólie, která se používá k snadnějšímu čištění stroje.

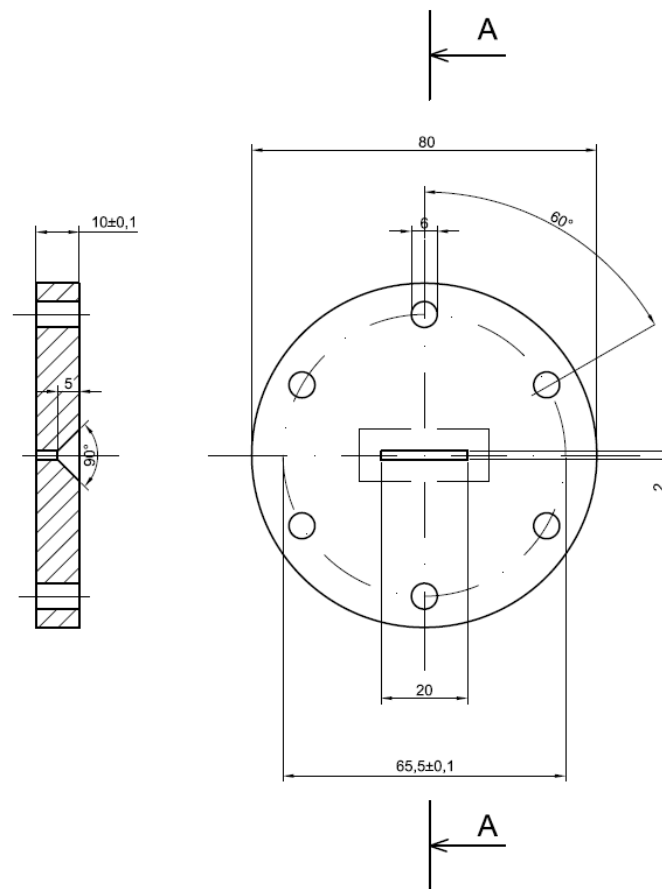
## 7 VYTLAČOVÁNÍ

Vytlačování je kontinuální proces při zpracování kaučukových směsí. Pro vytlačování našich směsí byly zvoleny rychlosti otáček šneku na 31, 40 a 50 ot/min. U každé směsi bylo vytlačeno potřebné množství směsi. Co se týká vzhledu vytlačených pásků, tak u směsí S1 a S2, byly pásy hladké a stejnoměrné, na rozdíl od směsi S3, kdy při vytlačování došlo k tzv. jevu shark skin (Obr. 9), což vzniklo kvůli nepřítomnosti plniv v materiálu.



*Obr. 9. Vytlačené pásy S3-NR*

Přístroj pro přípravu kaučukových směsí byl jednošnekový vytlačovací stroj o délce šneku 500 mm a průměru 20 mm. Vytlačování probíhalo přes vytlačovací hubici znázorněnou na (Obr. 10.). Při vytlačování se sledoval vliv rychlosti šneku na vybrané vlastnosti. Zkoumané rychlosti byly 31, 40 a 50 ot./min.



Obr. 10. Vytlačovací hubice

## 7.1 Vulkanizace

Aby mohlo dojít k měření, musely být vyrobeny zkušební tělesa. Z vytlačených pásek kaučukové směsi byly nejprve pro každou směs s různými otáčkami vylisovány destičky. Nejprve se vypočítala navážka jednotlivých směsí, s tím, že se připočítalo 10 % směsi na přetoky. Vytlačené pásy se kladly do formy vedle sebe, ve směru vytlačování, aby po uzavření formy vytvořily kompaktní desku. Takovéto ukládání vzorků bylo z důvodu, že při vytlačování může vznikat anizotropie vlastností v kolmém a podélném směru. Rozměry formy byly 300 x 300 x 2 mm. Doba vulkanizace byla stanovena dle měření na reometru na 10 min při 160 °C u všech směsí.

Po vylisování destiček, se označil směr toku a podle normovaných šablon byly vyseknuty jak zkušební tělesa na tahovou zkoušku tak na strukturální pevnost, u kterých se právě sledoval vliv anizotropie při vytlačování.

## 8 MĚŘENÍ VLASTNOSTÍ PRYŽE

Po vylisování byla připravena zkušební tělíska, na kterých byla zkoušena:

- tahová zkouška
- strukturní pevnost

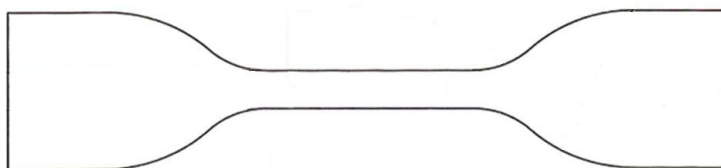
### 8.1 Tahová zkouška

Tahová zkouška slouží především k hodnocení mechanických vlastností materiálu. Vzorek je zde namáhán jednoosou tahovou silou. Po zatížení se vzorek začne deformovat, měnit své rozměry až do okamžiku, kdy dojde k jeho destrukci. U elastomerů je na začátku velká deformace už při nízkém napětí, a na konci je zvýšené napětí s tažným lomem, který je zároveň pevností v tahu. [24]

U tahové zkoušky se sleduje:

- Tahové napětí – je napětí, které způsobuje protažení zkoušeného vzorku (N)
- Pevnost v tahu – je maximální napětí v tahu do okamžiku přetržení (N)
- Prodloužení – je protažení způsobené tahovým napětím do okamžiku (%)
- Tažnost – je tahové napětí v okamžiku přetržení (%)

Zkouška byla provedena dle normy ČSN ISO 37. Dle šablony byly vyseknuty tělíska (Obr. 10).



Obr. 11. Tvar zkušebního tělíska pro tahovou zkoušku

Pro tahovou zkoušku bylo vysekáno z každé destičky 12 zkušebních tělísek. Šest ve směru vytlačování a šest ve směru kolmém. Celkem bylo vyseknuto 108 zkušebních tělísek. Test probíhal při rychlosti protahování 500 mm/min.

**S1-NR+N550**

V následujících tabulkách a grafech jsou naměřené a vyhodnocené hodnoty z trhací zkoušky pro směs S1 při různých otáčkách ve směru kolmém a podélném.

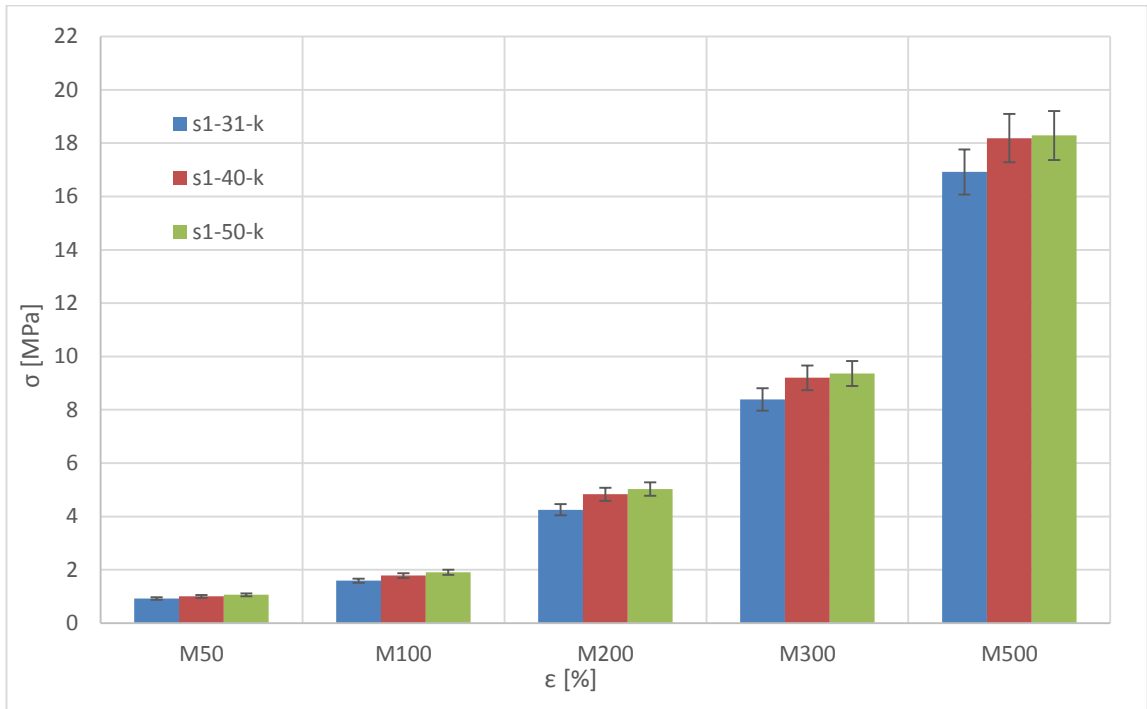
*Tab. 18. Hodnoty materiálu S1-NR+N550 pro otáčky 31, 40, 50 ve směru kolmém*

S1-31-kolmý							
N	$\sigma$ [MPa]	$\varepsilon$ [%]	$M_{50}$	$M_{100}$	$M_{200}$	$M_{300}$	$M_{500}$
průměr	17,67	511,27	0,93	1,60	4,28	8,45	16,93
median	17,69	502,00	0,92	1,59	4,25	8,39	16,92
smodch	0,45	24,24	0,05	0,08	0,20	0,30	0,53
S1-40-kolmý							
N	$\sigma$ [MPa]	$\varepsilon$ [%]	$M_{50}$	$M_{100}$	$M_{200}$	$M_{300}$	$M_{500}$
průměr	19,00	521,19	1,01	1,78	4,84	9,23	18,16
median	18,75	520,86	1,00	1,78	4,83	9,20	18,19
smodch	0,54	9,54	0,03	0,05	0,14	0,18	0,31
S1-50-kolmý							
N	$\sigma$ [MPa]	$\varepsilon$ [%]	$M_{50}$	$M_{100}$	$M_{200}$	$M_{300}$	$M_{500}$
průměr	19,19	516,59	1,05	1,88	5,04	9,51	18,25
median	19,49	516,85	1,06	1,91	5,03	9,36	18,29
smodch	0,68	15,25	0,04	0,11	0,31	0,57	0,63

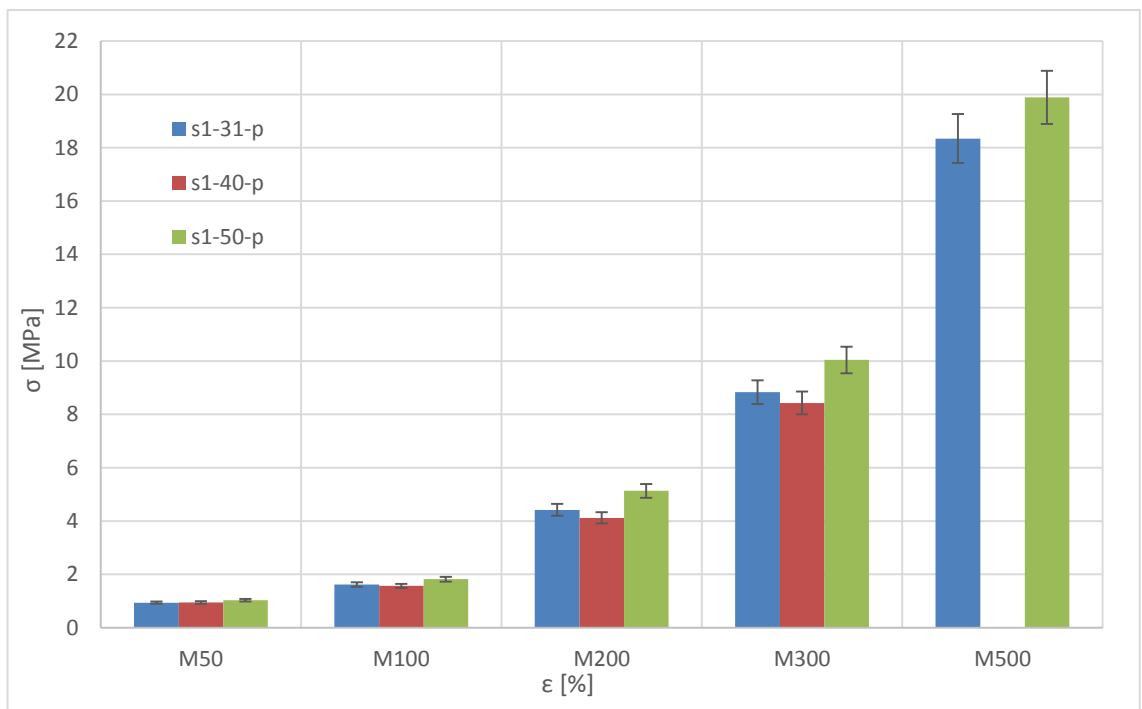
*Tab. 19. Hodnoty materiálu S1-NR+N550 pro otáčky 31, 40, 50 ve směru podélném*

S1-31-podélný							
N	$\sigma$ [MPa]	$\varepsilon$ [%]	$M_{50}$	$M_{100}$	$M_{200}$	$M_{300}$	$M_{500}$
průměr	18,55	504,34	0,94	1,62	4,42	8,83	18,34
median	18,59	505,43	0,94	1,62	4,42	8,83	18,34
smodch	0,48	10,45	0,02	0,02	0,07	0,11	0,02
S1-40-podélný							
N	$\sigma$ [MPa]	$\varepsilon$ [%]	$M_{50}$	$M_{100}$	$M_{200}$	$M_{300}$	$M_{500}$
průměr	16,84	480,57	0,93	1,54	4,18	8,46	-
median	17,13	480,30	0,95	1,57	4,12	8,43	-
smodch	0,51	4,27	0,05	0,04	0,11	0,22	-
S1-50-podélný							
N	$\sigma$ [MPa]	$\varepsilon$ [%]	$M_{50}$	$M_{100}$	$M_{200}$	$M_{300}$	$M_{500}$
průměr	20,74	521,17	1,02	1,80	5,07	9,98	19,79
median	20,67	522,24	1,03	1,82	5,13	10,04	19,89
smodch	0,36	7,71	0,06	0,08	0,17	0,26	0,41

Následující grafy znázorňují závislost napětí na prodloužení materiálu S1 pro otáčky 31, 40 a 50 ot/min v kolmém a podélném směru.



Graf 15. Závislost napětí na prodloužení materiálu S1-NR+N550 pro otáčky 31, 40, 50 ve směru kolmém



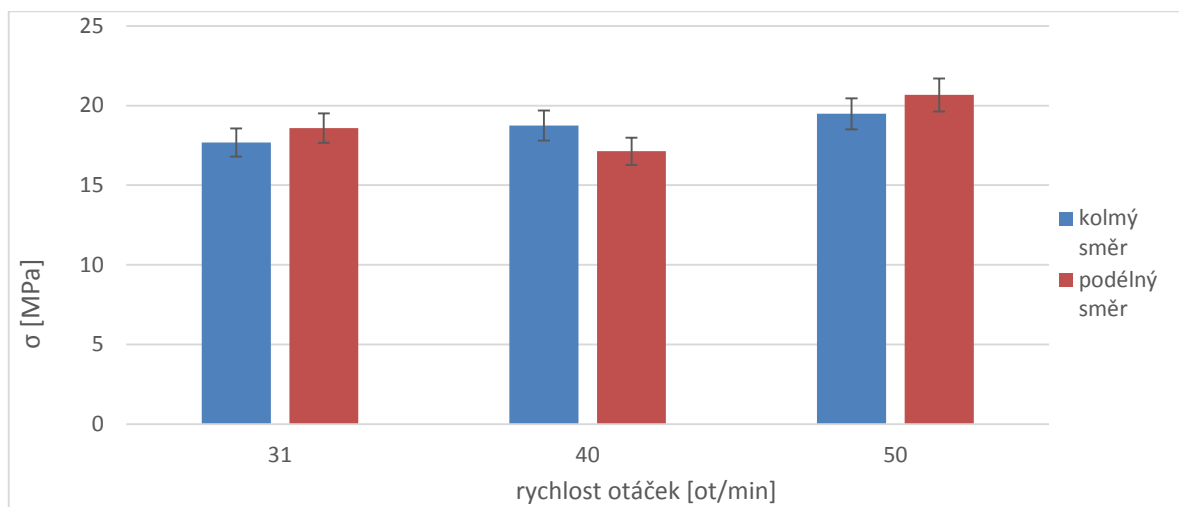
Graf 16. Závislost napětí na prodloužení materiálu S1-NR+N550 pro otáčky 31, 40, 50 ve směru podélném



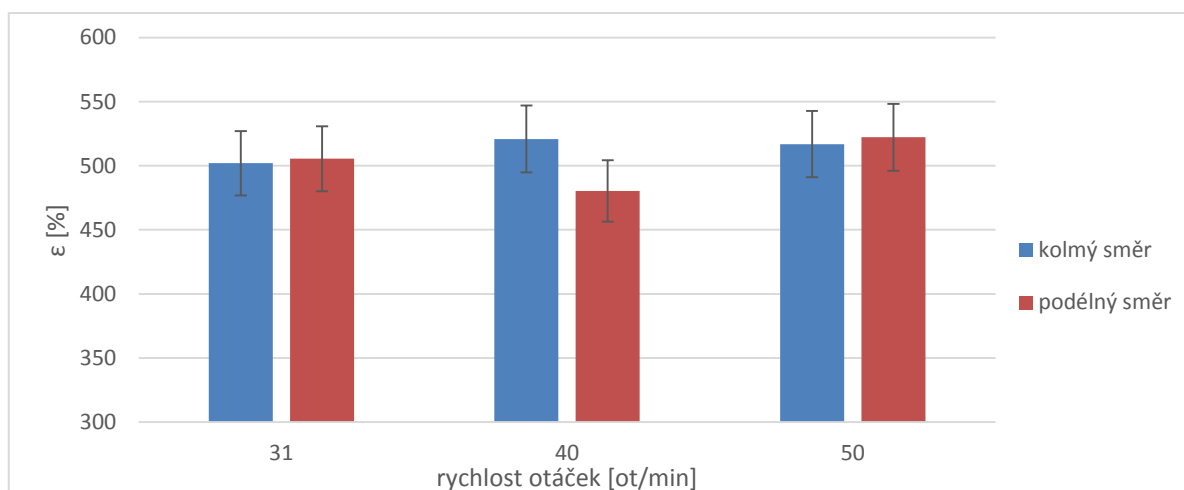
Při porovnání výsledků závislosti napětí na prodloužení u materiálu S1-NR+N550 ve směru kolmém je zřejmé, že při nejvyšších otáčkách bylo napětí na prodloužení nejvyšší, a naopak u nejnižších otáček bylo napětí nejnižší.

U měření S1-NR+N550 ve směru podélném je zřejmé, že při nejvyšších otáčkách bylo napětí na prodloužení nejvyšší.

Následuje grafické srovnání napětí při přetržení a prodloužení při přetržení v podélném a kolmém směru u směsi S1.



Graf 17. Srovnání napětí při přetržení u směsi S1-NR+550, v podélném a kolmém směru



Graf 18. Srovnání prodloužení při přetržení u směsi S1-NR+550, v podélném a kolmém směru

Při porovnání směrů toku materiálů při vytlačování směsi S1-NR+N550 je v podélném směru napětí na prodloužení u všech rychlostí otáček, až na S1-40-p vyšší než při směru kolmém.

**S2 - NR+N550+olej**

V následujících tabulkách a grafech jsou naměřené a vyhodnocené hodnoty z trhací zkoušky pro směs S2 při rychlostech otáček 31, 40 a 50 ve směru kolmém a podélném.

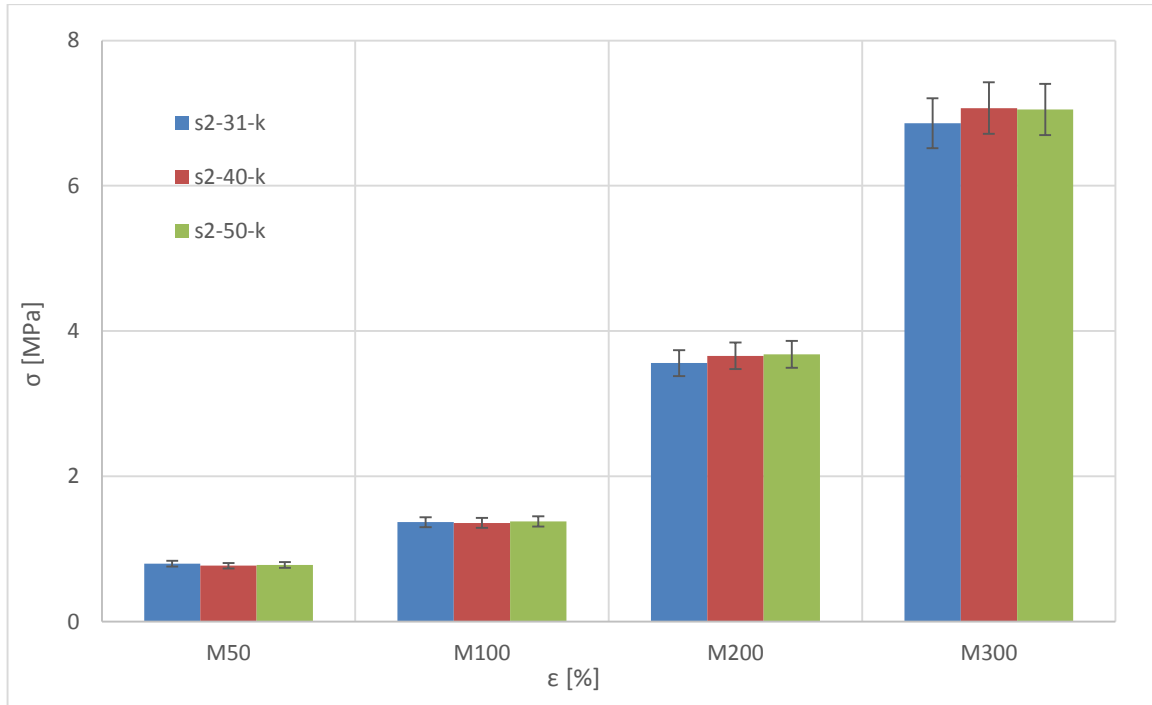
Tab. 20. Naměřené hodnoty materiálu S2 pro otáčky 31, 40, 50 ve směru kolmém

<b>S2-31-kolmý</b>							
N	$\sigma$ [MPa]	$\epsilon$ [%]	M <sub>50</sub>	M <sub>100</sub>	M <sub>200</sub>	M <sub>300</sub>	M <sub>500</sub>
median	13,98	476,40	0,80	1,37	3,56	6,86	13,15
průměr	13,96	481,55	0,80	1,34	3,55	6,89	13,15
smodch	0,60	19,70	0,05	0,13	0,43	0,74	0,00
<b>S2-40-kolmý</b>							
N	$\sigma$ [MPa]	$\epsilon$ [%]	M <sub>50</sub>	M <sub>100</sub>	M <sub>200</sub>	M <sub>300</sub>	M <sub>500</sub>
median	13,03	458,75	0,77	1,36	3,66	7,07	14,83
průměr	12,96	468,05	0,78	1,32	3,51	6,80	14,83
smodch	1,94	35,65	0,13	0,26	0,69	1,21	0,00
<b>S2-50-kolmý</b>							
N	$\sigma$ [MPa]	$\epsilon$ [%]	M <sub>50</sub>	M <sub>100</sub>	M <sub>200</sub>	M <sub>300</sub>	M <sub>500</sub>
median	12,79	476,18	0,78	1,38	3,68	7,05	13,42
průměr	13,21	474,70	0,75	1,32	3,56	6,86	13,42
smodch	1,03	35,70	0,09	0,17	0,46	0,75	1,47

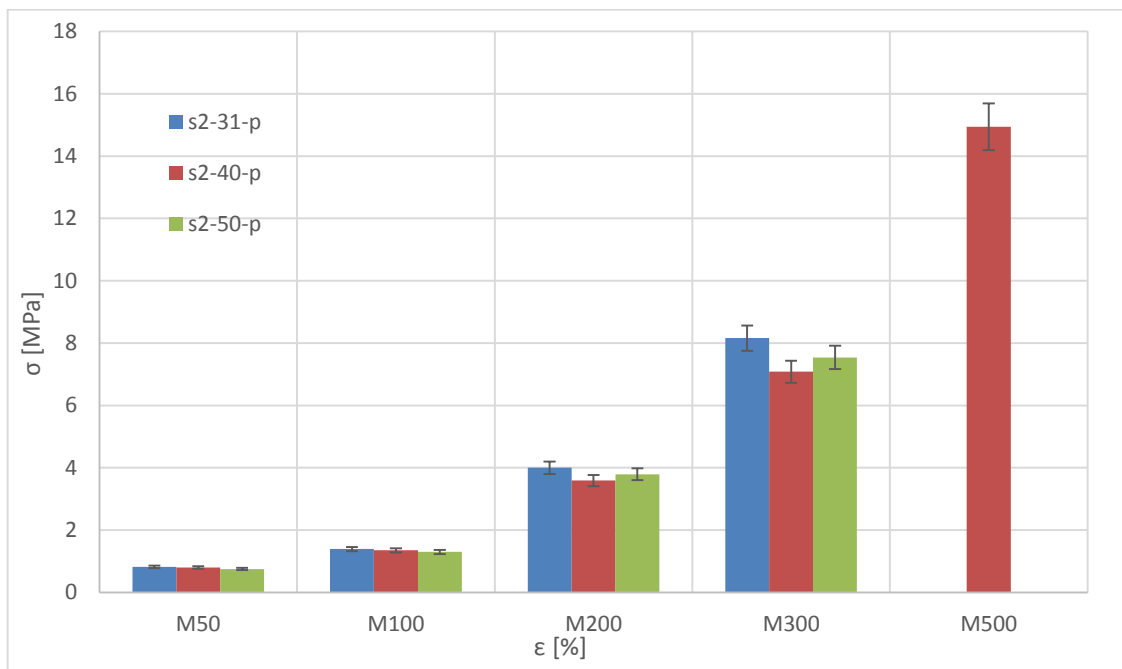
Tab. 21. Naměřené hodnoty materiálu S2 pro otáčky 31, 40, 50 ve směru podélném

<b>S2-31-podélný</b>							
N	$\sigma$ [MPa]	$\epsilon$ [%]	M <sub>50</sub>	M <sub>100</sub>	M <sub>200</sub>	M <sub>300</sub>	M <sub>500</sub>
median	16,75	485,65	0,80	1,40	4,04	8,23	-
průměr	16,75	481,85	0,82	1,39	4,01	8,17	-
smodch	0,88	12,82	0,05	0,06	0,18	0,32	-
<b>S2-40-podélný</b>							
N	$\sigma$ [MPa]	$\epsilon$ [%]	M <sub>50</sub>	M <sub>100</sub>	M <sub>200</sub>	M <sub>300</sub>	M <sub>500</sub>
median	16,76	537,38	0,81	1,36	3,64	7,24	15,21
průměr	16,58	541,70	0,80	1,35	3,59	7,08	14,94
smodch	0,72	27,14	0,05	0,07	0,27	0,52	0,99
<b>S2-50-podélný</b>							
N	$\sigma$ [MPa]	$\epsilon$ [%]	M <sub>50</sub>	M <sub>100</sub>	M <sub>200</sub>	M <sub>300</sub>	M <sub>500</sub>
median	12,94	434,50	0,76	1,30	3,80	7,54	-
průměr	13,28	441,02	0,75	1,30	3,79	7,54	-
smodch	1,24	29,48	0,05	0,03	0,11	0,20	-

Níže jsou uvedeny grafy závislosti napětí na prodloužení u S2 rychlosti otáček 31, 40 a 50 ot./min v kolmém a podélném směru.

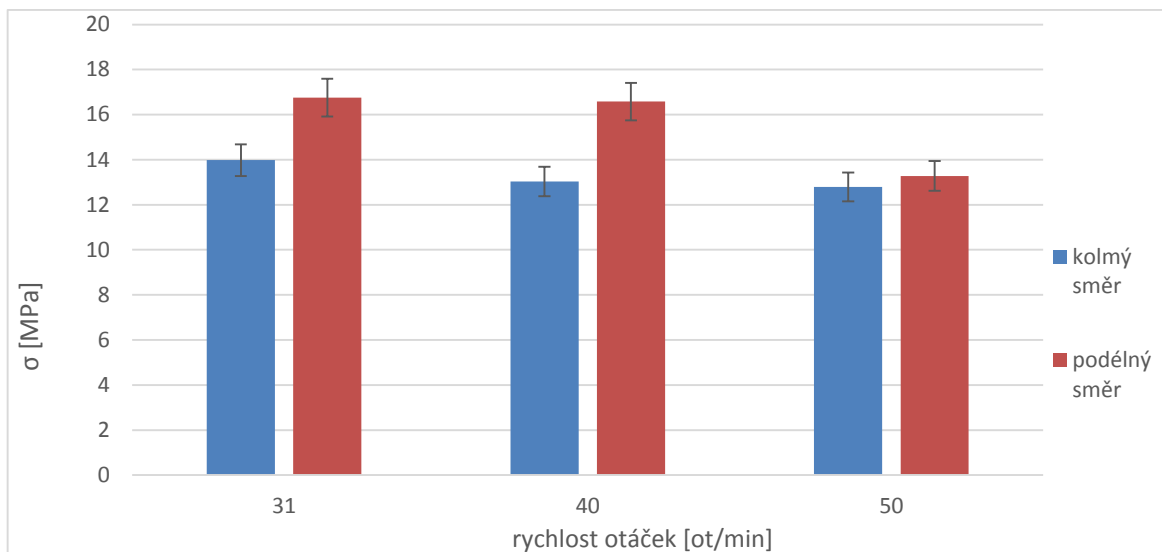


Graf 19. Závislost napětí na prodloužení materiálu S2-NR+N550+olej pro otáčky 31, 40, 50 ve směru kolmém

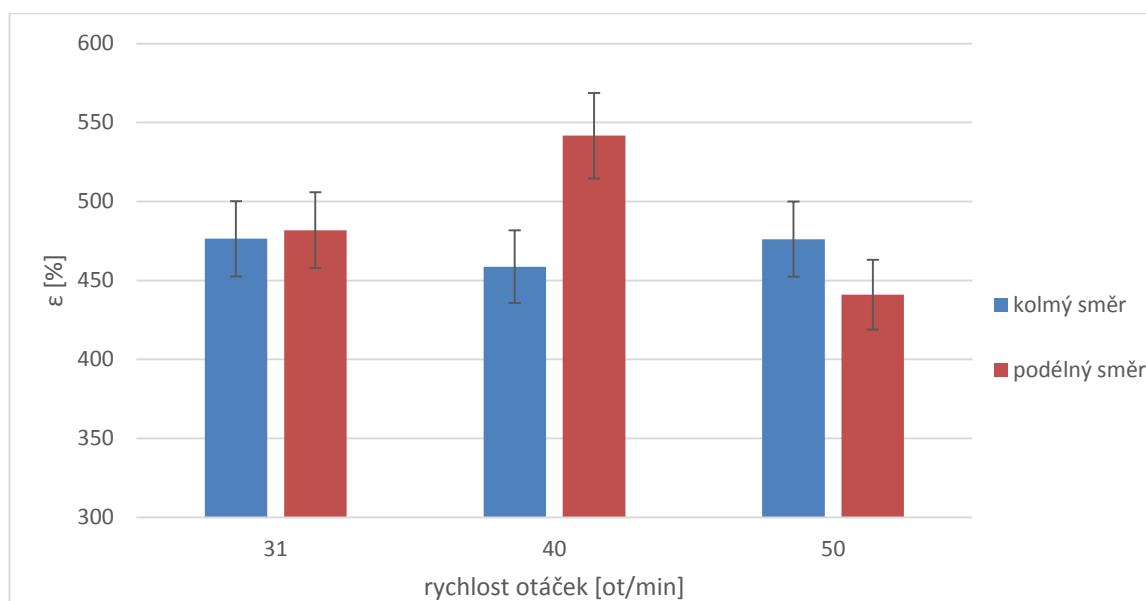


Graf 20. Závislost napětí na prodloužení materiálu S2-NR+N550+olej pro otáčky 31, 40, 50 ve směru podélném

Následuje porovnání směrů na napětí při přetržení a prodloužení při přetržení.



Graf 21. Srovnání napětí při přetržení u směsi S2-NR+550+olej, v podélném a kolmém směru



Graf 22. Srovnání prodloužení při přetržení u směsi S2-NR+550+olej, v podélném a kolmém směru

Při porovnání směrů toku materiálů při vytlačování směsi S2-NR+N550+olej je v podélném směru napětí na prodloužení u všech rychlostí otáček, až na S1-40-p vyšší než při směru kolmém.

**S3-NR**

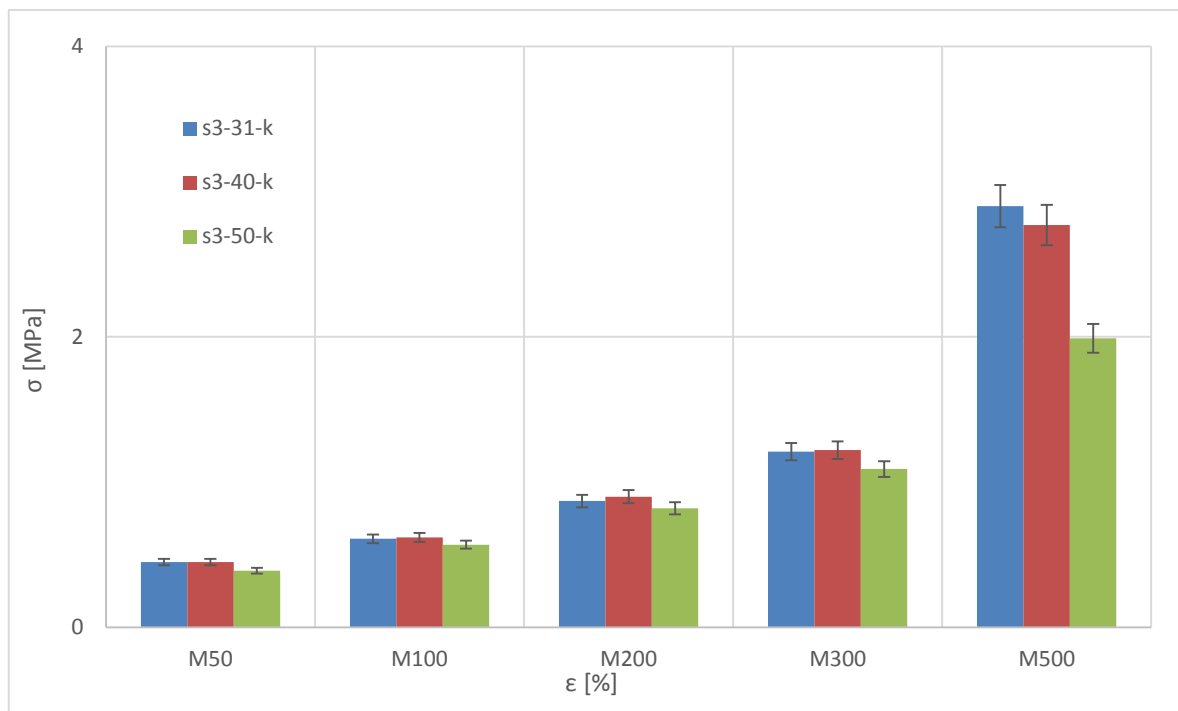
Následuje měření tahových vlastností u směsi S3, pro rychlost otáček 31, 40 a 50 ve směru kolmém a podélném.

Tab. 22. Naměřené hodnoty materiálu S3-NR pro otáčky 31, 40, 50 ve směru kolmém

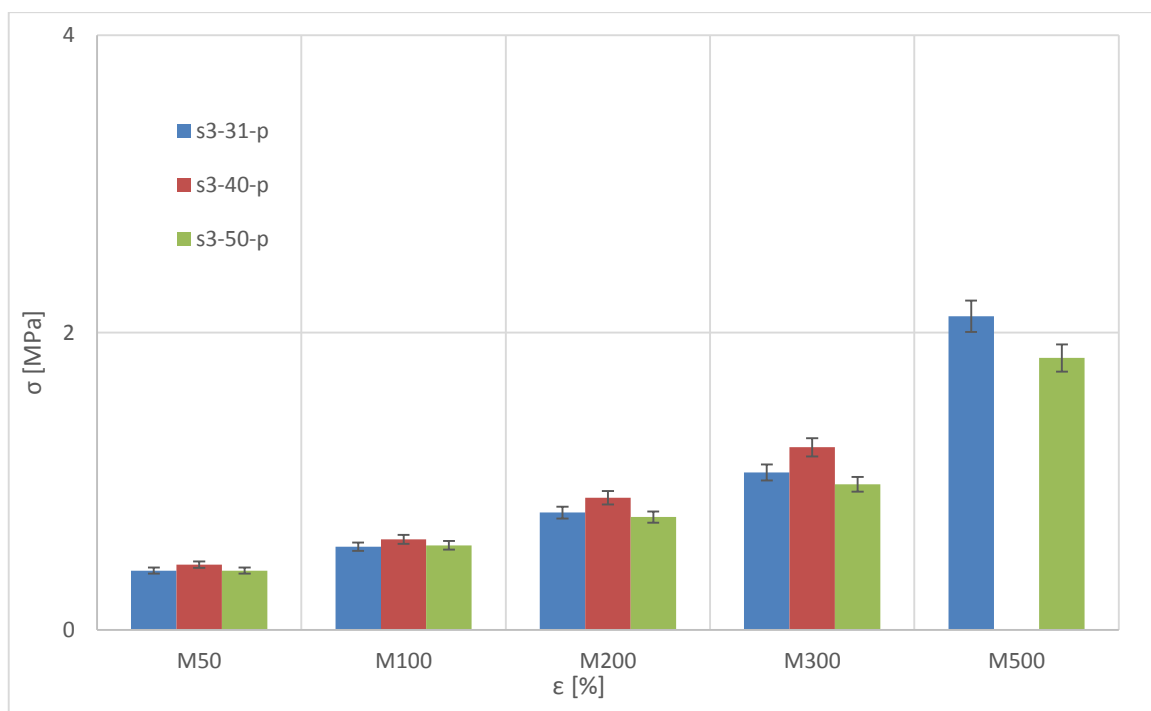
<b>s3-31-kolmy</b>							
N	$\sigma$ [MPa]	$\epsilon$ [%]	M <sub>50</sub>	M <sub>100</sub>	M <sub>200</sub>	M <sub>300</sub>	M <sub>500</sub>
median	6,40	605,03	0,45	0,61	0,87	1,21	2,90
průměr	6,56	588,42	0,47	0,64	0,91	1,27	3,37
smodch	0,54	52,35	0,08	0,08	0,12	0,20	1,19
<b>s3-40-kolmy</b>							
N	$\sigma$ [MPa]	$\epsilon$ [%]	M <sub>50</sub>	M <sub>100</sub>	M <sub>200</sub>	M <sub>300</sub>	M <sub>500</sub>
median	7,08	617,35	0,45	0,62	0,90	1,22	2,77
průměr	6,69	607,74	0,46	0,65	0,97	1,43	3,91
smodch	0,90	71,36	0,07	0,11	0,21	0,48	1,89
<b>s3-50-kolmy</b>							
N	$\sigma$ [MPa]	$\epsilon$ [%]	M <sub>50</sub>	M <sub>100</sub>	M <sub>200</sub>	M <sub>300</sub>	M <sub>500</sub>
median	7,35	757,20	0,40	0,58	0,83	1,09	1,99
průměr	7,33	746,59	0,41	0,58	0,83	1,10	2,04
smodch	0,20	26,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,09

Tab. 23. Naměřené hodnoty materiálu S3-NR pro otáčky 31, 40, 50 ve směru podélném

<b>s3-31-podelny</b>							
N	$\sigma$ [MPa]	$\epsilon$ [%]	M <sub>50</sub>	M <sub>100</sub>	M <sub>200</sub>	M <sub>300</sub>	M <sub>500</sub>
median	4,40	607,25	0,40	0,56	0,79	1,07	2,12
průměr	3,95	611,43	0,40	0,56	0,79	1,06	2,11
smodch	0,73	32,68	0,03	0,02	0,03	0,05	0,25
<b>s3-40-podelny</b>							
N	$\sigma$ [MPa]	$\epsilon$ [%]	M <sub>50</sub>	M <sub>100</sub>	M <sub>200</sub>	M <sub>300</sub>	M <sub>500</sub>
median	2,96	473,78	0,44	0,61	0,89	1,23	3,06
průměr	3,01	471,23	0,47	0,64	0,92	1,29	3,06
smodch	0,20	47,42	0,08	0,07	0,10	0,16	0,23
<b>S3-50-podelny</b>							
N	$\sigma$ [MPa]	$\epsilon$ [%]	M <sub>50</sub>	M <sub>100</sub>	M <sub>200</sub>	M <sub>300</sub>	M <sub>500</sub>
median	3,85	647,35	0,40	0,57	0,76	0,98	1,83
průměr	3,43	653,33	0,39	0,56	0,76	0,99	1,78
smodch	0,99	29,69	0,02	0,02	0,03	0,07	0,24

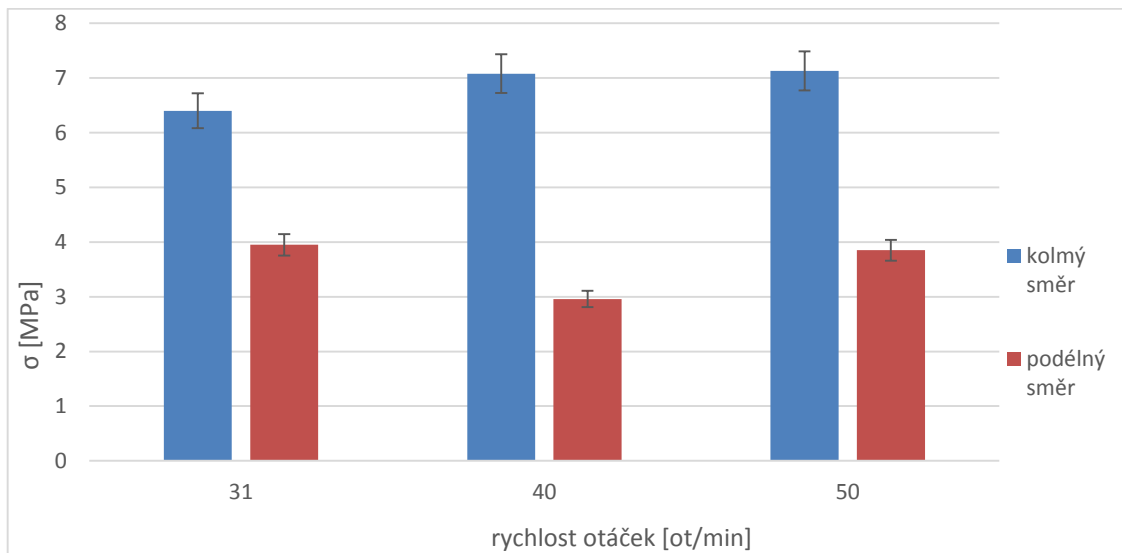


Graf 23. Závislost napětí na prodloužení materiálu S3-NR pro otáčky 31, 40, 50 ve směru kolmém

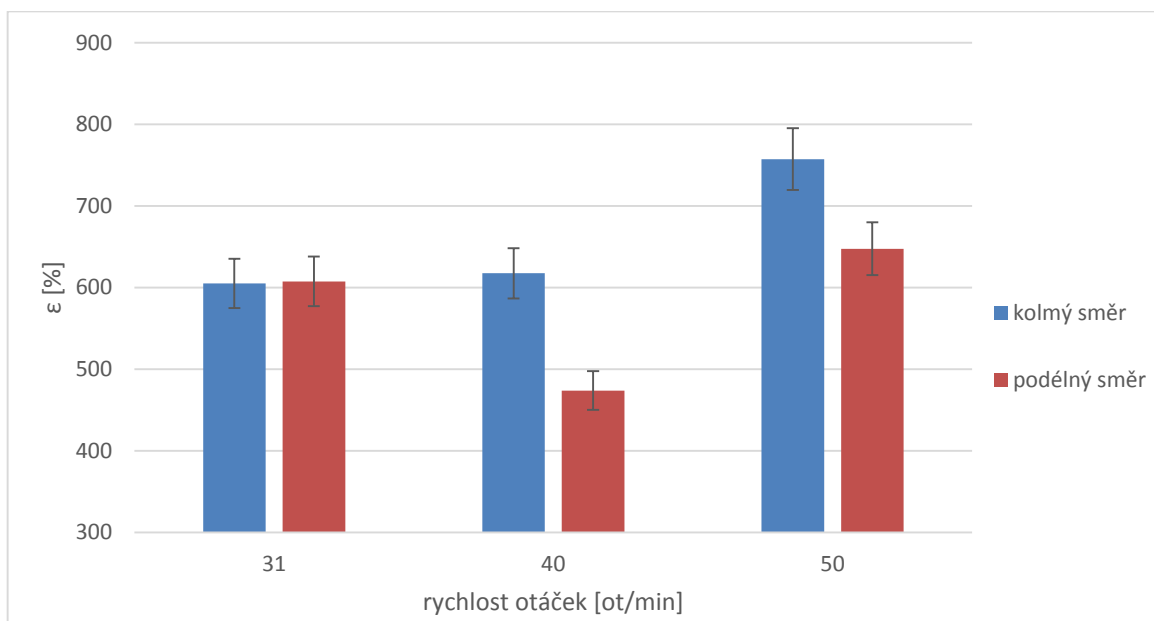


Graf 24. Závislost napětí na prodloužení materiálu S3-NR pro otáčky 31, 40, 50 ve směru podélném

V případě směsi S3 byl výsledek v porovnání se směsmi S1 a S2 jiný. Vzorky ze směsi vyrobené při nejvyšších otáčkách 50 ot/min, dosahovaly jak v podélném, tak v kolmém směru nejnižší hodnoty napětí.



Graf 25. Srovnání napětí při přetržení u směsi S3-NR, v podélném a kolmém směru



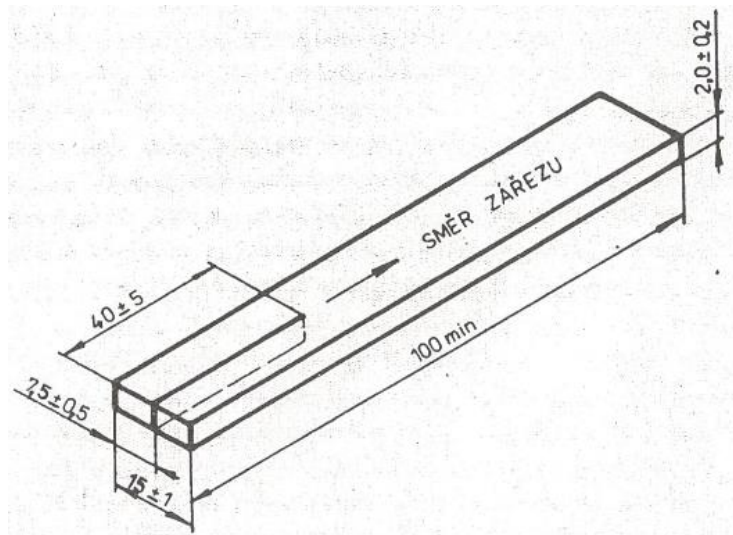
Graf 26. Srovnání prodloužení při přetržení u směsi S3-NR, v podélném a kolmém směru

Při porovnání závislosti napětí na prodloužení směsi S3-NR ve směru toku se směrem kolmým pro jednotlivé otáčky zvlášť, je patrné, že i zde se výsledky liší od S1 a S2. Nižší tlak byl naměřen ve směru kolmém a zároveň u něj došlo i k dřívějšímu přetržení.

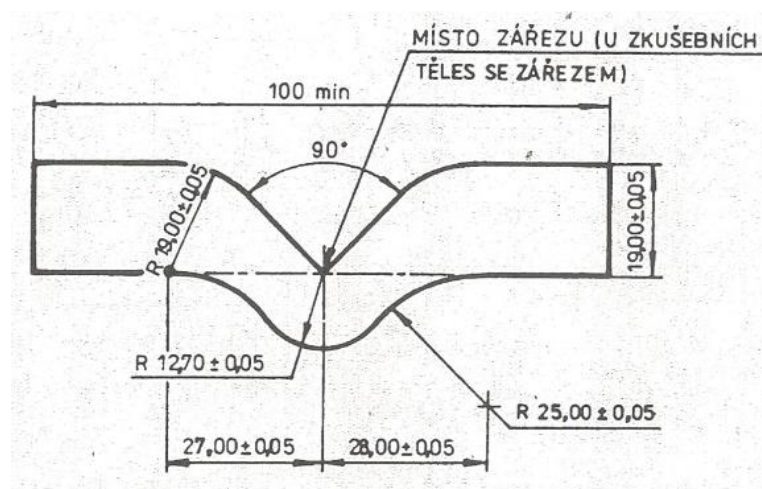
Co se týče srovnání tahových vlastností materiálů ze směsi S1, S2, a S3 je z výsledků jasné, že největší tahové napětí bylo u směsi S1, a nejnižší tahové napětí naměřeno u směsi S3.

## 8.2 Strukturní pevnost

Pod pojmem strukturní pevnost se rozumí odpor pryžového materiálu proti roztržení. Jinak řečeno se takhle stanovuje houževnatost, nebo vrubová pevnost pryže. Pro stanovení strukturní pevnosti existují tři typy těles (Obr. 11, 12, 13), které se vysekávají podle šablony.[25]

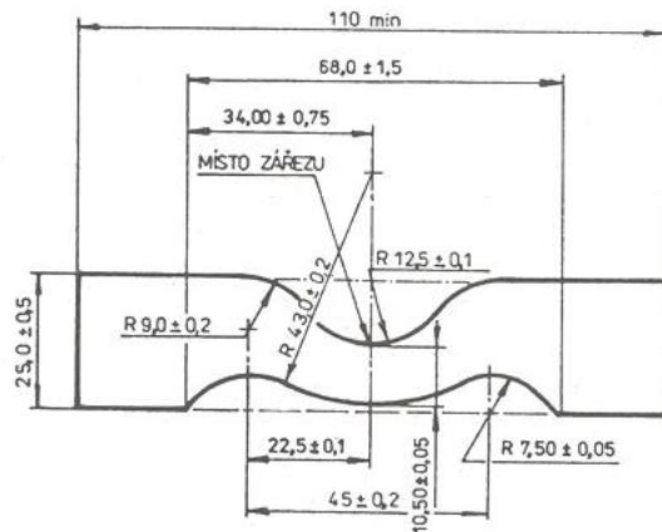


Obr. 12. Zkušební těleso – typ č. 1 - trouser [27]



Obr. 13. Zkušební těleso – typ č. 2 - graves [27]





Obr. 14. Zkušební těleso – typ č. 3 - crescent [27]

Zkouška se provádí na trhacím stroji podle normy ČSN ISO 62. Konce zkušebního tělesa se upnou do čelistí trhacího stroje, spustí se stroj a dojde k roztržení.

### 8.2.1 Typ č. 1 – Trouser

U měření strukturální pevnosti pomocí tělíska typu Trouser se sleduje síla potřebná k růstu trhliny. Do čelistí trhacího stroje se uchytí vzorek vyseknutý dle šablony (Obr. 11), a po oddalování čelistí začne trhlina růst. Rychlost posuvu čelistí je 100mm/min.

Strukturální pevnost se vypočítá podle vzorce:

$$T_s = \frac{F}{d} \quad (12)$$

F je síla vypočtená podle píků z grafického záznamu, a d je tloušťka vzorku.

Zkouška byla provedena na čtyřech vzorcích od každé směsi, rychlosti a směru, celkem 72 vzorků.

### S1 - NR+N550

V tabulkách jsou uvedeny naměřené hodnoty materiálu S1 ve směru kolmém a podélném, a při rychlosti otáček 31, 40 a 50 ot/min.

Tab. 24. Naměřené hodnoty materiálu S1 při 31 ot/min pro oba směry

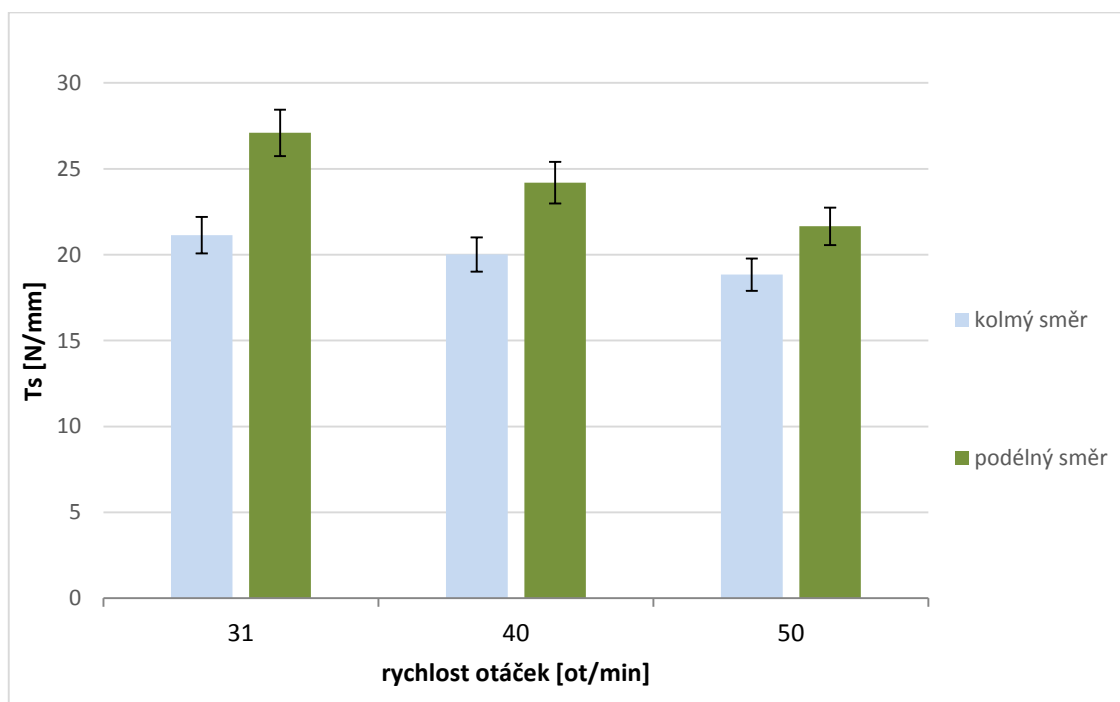
N	S1-31-kolmý směr			S1-31-podélný směr		
	F [N]	Ts [N/mm]	d [mm]	F [N]	Ts [N/mm]	d [mm]
median	55,45	21,14	2,62	65,78	27,09	2,43
průměr	54,74	20,96	2,61	64,32	26,42	2,43
Smodch	6,82	2,83	0,03	10,42	3,17	0,12

Tab. 25. Naměřené hodnoty materiálu S1 při 40 ot/min pro oba směry

N	S1-40-kolmý směr			S1-40-podélný směr		
	F [N]	Ts [N/mm]	d [mm]	F [N]	Ts [N/mm]	d [mm]
median	51,19	20,01	2,56	53,12	24,20	2,23
průměr	47,29	18,46	2,57	50,95	22,85	2,24
Smodch	22,94	9,00	0,02	19,63	8,37	0,07

Tab. 26. Naměřené hodnoty materiálu S1 při 50 ot/min pro oba směry

N	S1-50-kolmý směr			S1-50-podélný směr		
	F [N]	Ts [N/mm]	d [mm]	F [N]	Ts [N/mm]	d [mm]
median	51,11	18,84	2,71	52,86	21,65	2,44
průměr	51,83	19,08	2,72	54,81	22,32	2,44
Smodch	7,58	2,95	0,03	12,90	4,09	0,14



Graf 27. porovnání strukturní pevnosti materiálu S1-NR+N550

Výsledky grafu naznačují, že s navyšováním rychlostí otáček při vytlačování u směsi S1 dochází k poklesu strukturální pevnosti jak ve směru kolmém, tak i ve směru podélném.

Co se týče srovnání strukturální pevnosti kolmého a podélného směru, tak je patrné, že strukturální pevnost je vyšší ve směru vytlačování, tzn. ve směru podélném.

### S2 - NR+N550+olej

V tabulkách jsou uvedeny naměřené hodnoty materiálu S2 ve směru kolmém a podélném, a při rychlosti otáček 31, 40 a 50 ot/min.

Tab. 27. Naměřené hodnoty materiálu S2 při 31 ot/min pro oba směry

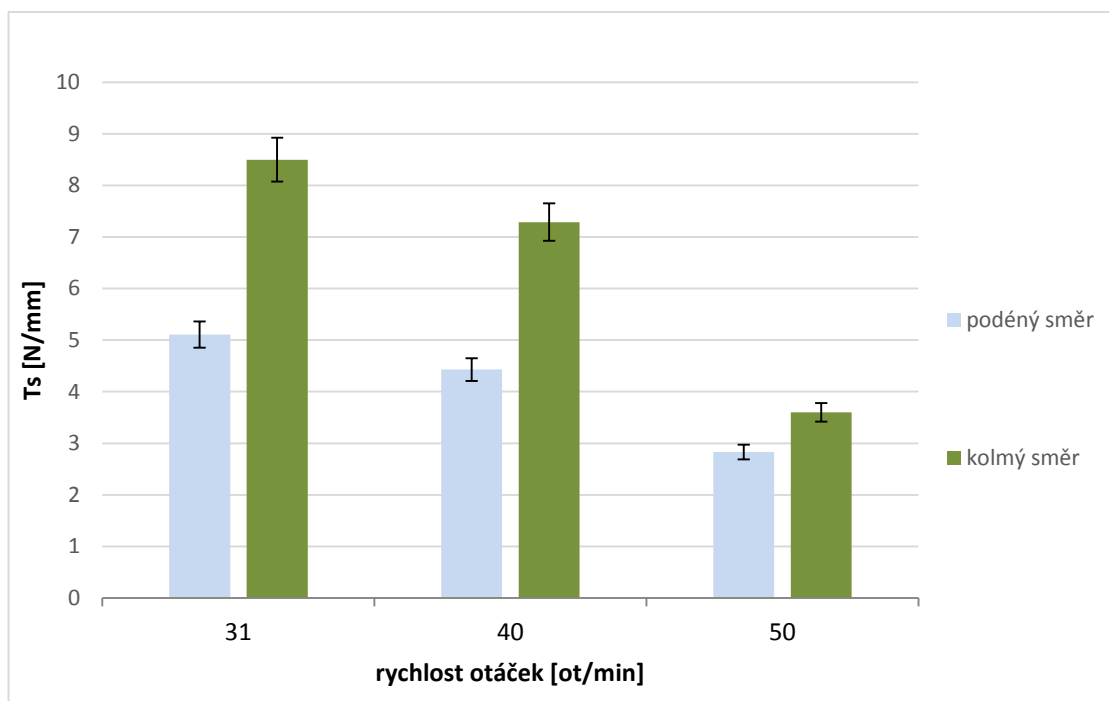
N	S2-31-kolmý směr			S2-31-podélný směr		
	F [N]	Ts [N/mm]	d [mm]	F [N]	Ts [N/mm]	d [mm]
median	12,24	5,11	2,40	19,24	8,50	2,23
průměr	18,73	7,83	2,42	19,33	8,49	2,24
Smodch	18,58	7,84	0,05	14,28	6,06	0,09

Tab. 28. Naměřené hodnoty materiálu S2 při 40 ot/min pro oba směry

N	S2-40-kolmý směr			S2-40-podélný směr		
	F [N]	Ts [N/mm]	d [mm]	F [N]	Ts [N/mm]	d [mm]
median	11,26	4,43	2,59	18,45	7,29	2,33
průměr	17,93	6,96	2,57	19,52	8,47	2,35
Smodch	17,48	6,73	0,04	7,95	4,05	0,25

Tab. 29. Naměřené hodnoty materiálu S2 při 50 ot/min pro oba směry

N	S2-50-kolmý směr			S2-50-podélný směr		
	F [N]	Ts [N/mm]	d [mm]	F [N]	Ts [N/mm]	d [mm]
median	7,49	2,83	2,65	8,56	3,60	2,30
průměr	9,37	3,55	2,66	12,77	5,37	2,31
Smodch	5,10	1,99	0,05	11,76	4,77	0,15



Graf 28. porovnání strukturní pevnosti materiálu S2-NR+N550+olej

Jako u měření vzorků ze směsi S1 je vidět že s navyšováním rychlostí otáček při vytlačování také u směsi S2 dochází k poklesu strukturní pevnosti jak ve směru kolmém, tak i ve směru podélném.

Co se týče srovnání strukturní pevnosti kolmého a podélného směru, tak je zde také patrné, že strukturní pevnost je vyšší ve směru vytlačování, tzn. ve směru podélném.

### S3 – NR

Následují naměřené hodnoty směsi S3 pro rychlost otáček 31, 40 a 50 ve směru kolmém a podélném.

Tab. 30. Naměřené hodnoty materiálu S3 při 31 ot/min pro oba směry

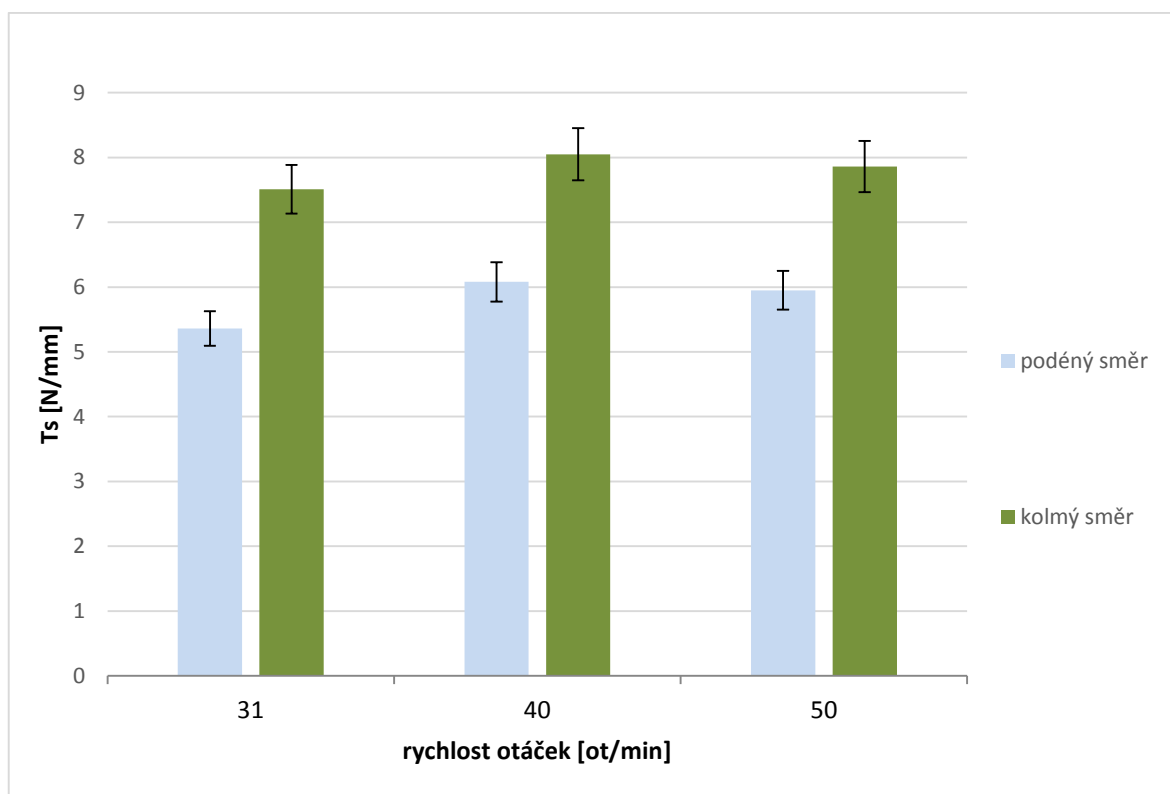
N	S3-31-kolmý směr			S3-31-podélný směr		
	F [N]	Ts [N/mm]	d [mm]	F [N]	Ts [N/mm]	d [mm]
median	13,95	5,36	2,58	17,64	7,51	2,42
průměr	14,18	5,55	2,56	18,60	7,79	2,39
Smodch	3,91	1,63	0,07	2,92	1,11	0,08

Tab. 31. Naměřené hodnoty materiálu S3 při 40 ot/min pro oba směry

N	S3-40-kolmý směr			S3-40-podélný směr		
	F [N]	Ts [N/mm]	d [mm]	F [N]	Ts [N/mm]	d [mm]
median	14,51	6,08	2,39	18,06	8,08	2,22
průměr	13,48	5,67	2,38	17,21	7,92	2,16
Smodch	5,86	2,49	0,02	3,92	1,43	0,13

Tab. 32. Naměřené hodnoty materiálu S1 při 50 ot/min pro oba směry

N	S3-50-kolmý směr			S3-50-podélný směr		
	F [N]	Ts [N/mm]	d [mm]	F [N]	Ts [N/mm]	d [mm]
median	14,68	5,95	2,40	17,30	7,86	2,20
průměr	13,18	5,42	2,43	17,01	7,69	2,21
Smodch	6,02	2,45	0,06	2,48	0,83	0,10



Graf 29. porovnání strukturální pevnosti materiálu S3-NR

Opět jako u předešlých měření dochází k poklesu strukturální pevnosti se zvyšováním rychlosti otáček. Pokles není tak znatelný, což může být ovlivněno tím, že S3 neobsahuje žádné plniva.

Co je tady ale jednoznačné, je vliv směru toku materiálu. Strukturální pevnost je jednoznačně vyšší u podélného směru.

### 8.2.2 Typ č. 2 – Graves

Zkušební tělísko tvaru (Obr. 12) se připevní do čelistí trhacího stroje, ty se začnou oddalovat při 500 mm/min, než dojde k přetržení tělesa. U zkoušení tělísek tohoto typu se sleduje síla potřebná k tvorbě trhliny.

$$T_s = \frac{F_{max}}{d} \quad (13)$$

$F_{max}$  [N] – nejvyšší síla

$d$  [mm] – tloušťka zkušebního tělesa

Zkouška byla provedena na čtyřech vzorcích od každé směsi, rychlosti a směru, celkem 72 vzorků.

#### S1 - NR+N550

V tabulkách jsou uvedeny naměřené hodnoty při zkoušce typu Graves, pro S1 rychlosti otáček 31, 40 a 50, pro tělesa vyseknuta ve směru podélném a kolmém.

Tab. 33. Naměřené hodnoty materiálu S1 při 31 ot/min pro oba směry

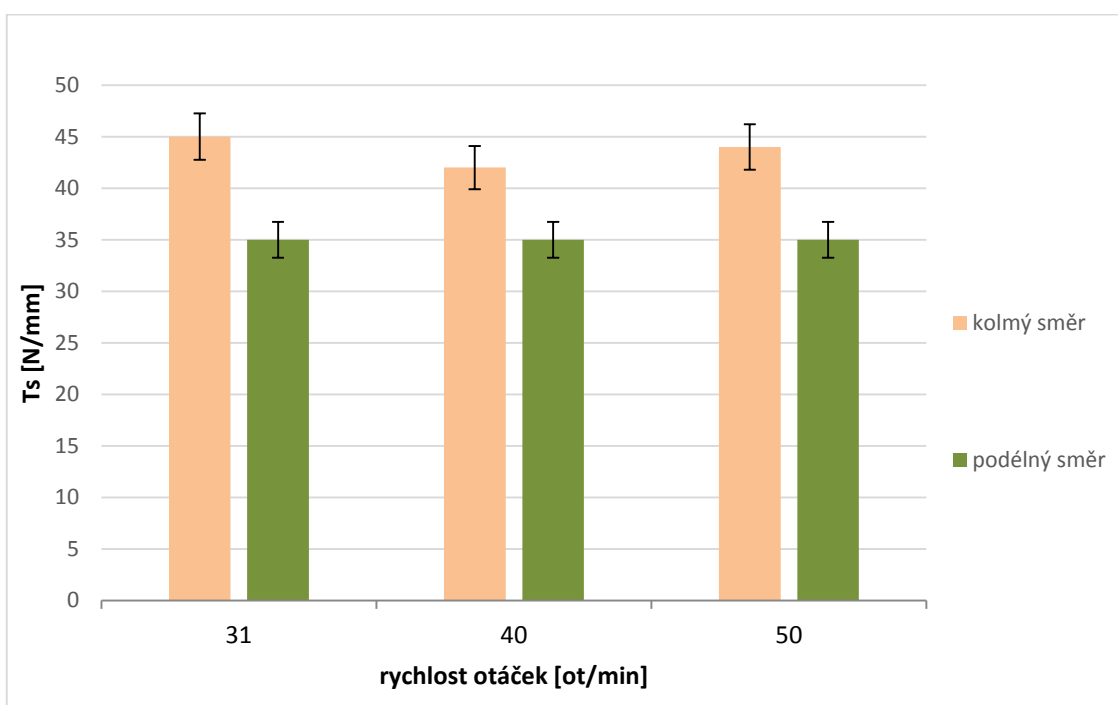
N	31-kolmý směr			31-podélný směr		
	F [N]	Ts [N/mm]	d [mm]	F [N]	Ts [N/mm]	d [mm]
median	112,31	44,84	2,53	80,98	34,61	2,34
průměr	113,67	44,97	2,53	81,90	35,04	2,34
Smodch	25,61	10,06	0,04	6,12	2,69	0,01

Tab. 34. Naměřené hodnoty materiálu S1 při 40 ot/min pro oba směry

N	40-kolmý směr			40-podélný směr		
	F [N]	Ts [N/mm]	d [mm]	F [N]	Ts [N/mm]	d [mm]
median	103,67	42,12	2,46	83,19	34,68	2,26
průměr	104,86	42,64	2,46	81,24	34,94	2,26
Smodch	15,66	5,63	0,04	5,36	3,31	0,03

Tab. 35. Naměřené hodnoty materiálu S1 při 50 ot/min pro oba směry

N	50-kolmý směr			50-podélný směr		
	F [N]	Ts [N/mm]	d [mm]	F [N]	Ts [N/mm]	d [mm]
median	116,32	44,35	2,61	83,20	35,28	2,37
průměr	115,01	44,11	2,61	82,22	34,75	2,37
Smodch	16,45	6,34	0,04	5,19	2,53	0,04



Graf 30. porovnání strukturální pevnosti materiálu S1-NR+N550

Strukturální pevnost je zde vyšší ve směru kolmém. Vliv rychlosti otáček není znatelný, hodnoty strukturální pevnosti jsou téměř stejné u všech rychlostí.

### S2 - NR+N550+olej

Následují hodnoty pro vzorky se směsí S2 při rychlosti otáček 31, 40 a 50 ot/min, pro směr podélný a kolmý.

Tab. 36. Naměřené hodnoty materiálu S2 při 31 ot/min pro oba směry

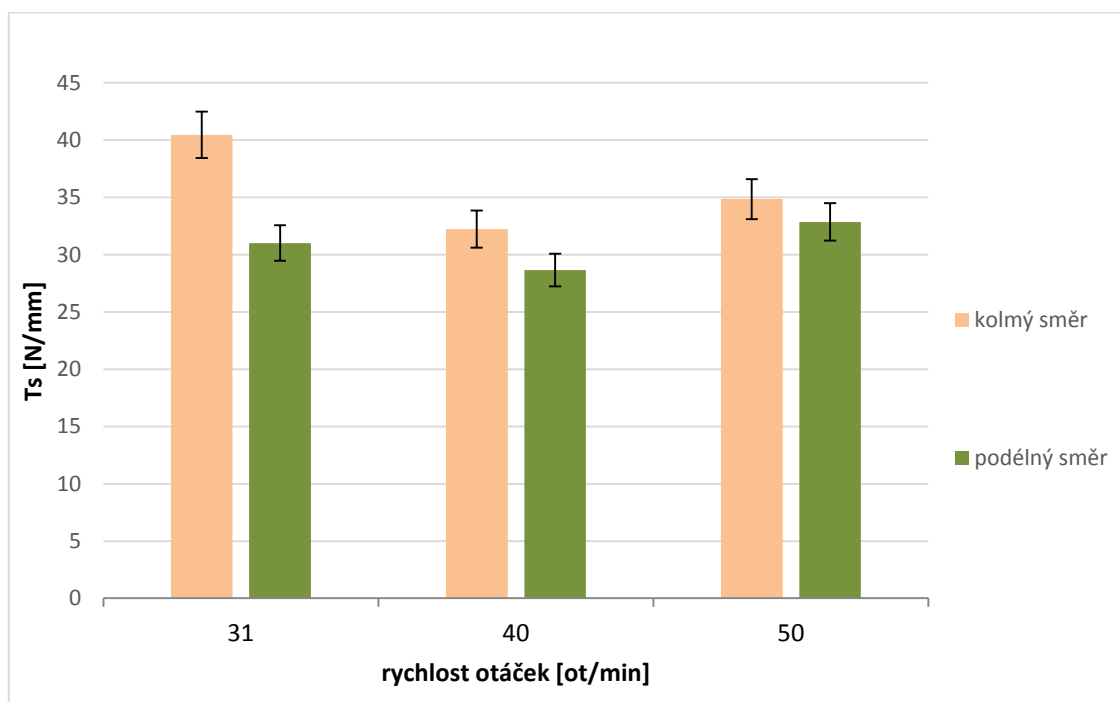
N	31-kolmý směr			31-podélný směr		
	F [N]	Ts [N/mm]	d [mm]	F [N]	Ts [N/mm]	d [mm]
median	93,52	40,46	2,33	66,99	31,01	2,18
průměr	94,20	40,64	2,32	69,15	31,80	2,17
Smodch	24,51	10,93	0,03	15,30	6,79	0,03

Tab. 37. Naměřené hodnoty materiálu S2 při 40 ot/min pro oba směry

N	40-kolmý směr			40-podélný směr		
	F [N]	Ts [N/mm]	d [mm]	F [N]	Ts [N/mm]	d [mm]
median	78,84	32,24	2,48	63,51	28,66	2,24
průměr	79,84	32,32	2,47	63,96	28,59	2,24
Smodch	6,47	2,45	0,03	9,69	4,25	0,07

Tab. 38. Naměřené hodnoty materiálu S2 při 50 ot/min pro oba směry

N	50-kolmý směr			50-podélný směr		
	F [N]	Ts [N/mm]	d [mm]	F [N]	Ts [N/mm]	d [mm]
median	88,38	34,85	2,54	73,71	32,86	2,30
průměr	88,10	34,73	2,53	71,14	31,14	2,29
Smodch	14,24	5,15	0,04	19,63	8,74	0,06



Graf 31. porovnání strukturní pevnosti materiálu S2-NR+N550+olej



Strukturní pevnost je opět vyšší ve směru kolmém. Nejlepší strukturní pevnost byla u vzorku ze směsi vyrobené při otáčkách 31 ot/min.

### S3 – NR

Následují hodnoty pro vzorky se směsi S3 při rychlosti otáček 31, 40 a 50 ot/min, pro směr podélný a kolmý.

*Tab. 39. Naměřené hodnoty materiálu S3 při 31 ot/min pro oba směry*

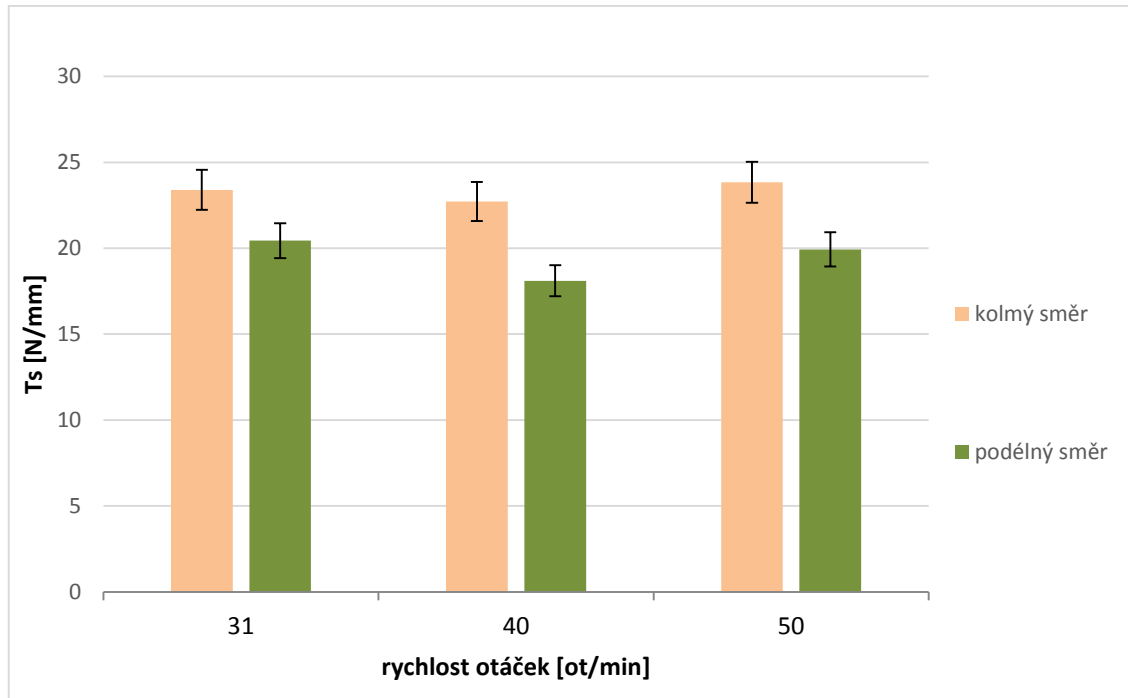
N	31-kolmý směr			31-podélný směr		
	F [N]	Ts [N/mm]	d [mm]	F [N]	Ts [N/mm]	d [mm]
median	56,61	23,40	2,42	45,49	20,44	2,21
průměr	57,68	23,89	2,42	44,50	20,16	2,21
Smodch	3,46	1,90	0,05	2,61	1,19	0,02

*Tab. 40. Naměřené hodnoty materiálu S3 při 40 ot/min pro oba směry*

N	40-kolmý směr			40-podélný směr		
	F [N]	Ts [N/mm]	d [mm]	F [N]	Ts [N/mm]	d [mm]
median	52,46	22,72	2,31	38,00	18,11	2,10
průměr	52,31	22,67	2,31	38,36	18,30	2,10
Smodch	2,49	1,08	0,03	1,05	0,65	0,05

*Tab. 41. Naměřené hodnoty materiálu S3 při 50 ot/min pro oba směry*

N	50-kolmý směr			50-podélný směr		
	F [N]	Ts [N/mm]	d [mm]	F [N]	Ts [N/mm]	d [mm]
median	55,30	23,84	2,32	42,92	19,93	2,17
průměr	54,21	23,38	2,32	42,98	19,90	2,16
Smodch	2,89	1,53	0,03	2,31	1,03	0,04



Graf 32. porovnání strukturní pevnosti materiálu S3-NR

Strukturní pevnost dosahuje vyšších hodnot opět ve směru kolmém na směr vytlačování. Vliv otáček není úplně zřejmí.

### 8.2.3 Vyhodnocení výsledků

U měření strukturní pevnosti na těles typu Trouser bylo u směsi S1 a S2 zjištěno, že s navyšování rychlosti otáček při vytlačování dochází k poklesu strukturní pevnosti v kolmém i podélném směru toku materiálu. U vzorků ze směsi S3 není vliv otáček nějak výrazný. Co se týče srovnání strukturní pevnosti kolmého a podélného směru, tak je zde jednoznačné, že strukturní pevnost je vyšší ve směru vytlačování, tzn. ve směru podélném.

Při měření strukturní pevnosti na tělesech typu Graves, je strukturní pevnost vyšší u těles, které byly vyseknuty v kolmém směru na směr vytlačování. Závislost rychlosti otáček při vytlačování je zde zanedbatelná.

Strukturní pevnost materiálů je nejvyšší u směsi č. S1-NR+N550 a nejnižší u směsi č. S3-NR.

## ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo zjistit, jaký vliv mají podmínky při vytlačování na vlastnosti kaučukové směsi. Nejprve byly měřeny reologické vlastnosti směsi. Měření kaučukové směsi probíhalo na přístrojích viskozimetr Mooney, kde se měřila viskozita, na RPA 2000, kde se měřil deformační test a frekvenční test, z něhož byly vyhodnoceny tokové křivky pro nízké smykové rychlosti a na kapilárním reometru Rheofliker, kde se měřil tlak za konstantních smykových rychlostí, z něž byly vyhodnoceny tokové křivky kaučukové směsi pro vyšší smykové rychlosti. Hodnoty viskozity kaučukové směsi naměřené na viskozimetru Mooney se lišily v závislosti na složení směsi. Saze hodnoty viskozity zvýšily a přidáním změkčovadla se viskozita snížila. Měřením tokových křivek bylo patrné, že navýšením teploty dochází k poklesu viskozity kaučukové směsi, a také tlaku, v závislosti na rychlosti smykové deformace.

Po vyhodnocení tokových vlastností se provedlo vytlačování na vytlačovacím stroji. Každá směs se vytlačovala při rychlosti otáček 31, 40 a 50 za minutu. Z vytlačených pásků, byly vylisovány destičky. Pásky vytlačené směsi byly kladeny vedle sebe, aby se docílilo zachycení směru vytlačování při následujících zkouškách. Na vzorcích byla měřena tahová zkouška a strukturní pevnost pro dva typy těles. Při měření tahových vlastností u plněných směsí byl vliv zvyšujících se otáček patrný zejména u směsi S1, kdy se zvýšením otáček bylo takové napětí největší.

Výsledky naměřených hodnot strukturní pevnosti na vlivu otáček byly patrnější pro použití těles Trauser kde u plněných směsí došlo se zvyšující se rychlostí otáček k poklesu strukturní pevnosti. Navíc byla pevnost vyšší ve směru vytlačování. Směr vytlačování měl největší vliv při měření strukturní pevnosti pro všechny směsi i tělesa.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] MALÁČ Jiří, *Gumárenská technologie – 2. Kaučuky*. [online]. [cit. 2015-02-15]. Dostupný z WWW: <http://www.home.karneval.cz/0323339201/text/kaucuky.pdf>
- [2] Učební texty Dostupný z WWW: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce\\_plasty/06.htm#061](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/06.htm#061) [online]. [cit. 2015-02-20].
- [3] MICHAELI Walter, *Extrusion dies for plastics and rubber: design and engineering computations*. 3rd rev. ed. Cincinnati: Hanser Gardner Publications, 2003, 362 p. ISBN 978-3-446-40181-5. [online]. [cit. 2015-03-12]. Dostupný z: [http://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpEDPRDEC8/viewerType:toc/root\\_slug:extrusion-dies-plastics](http://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpEDPRDEC8/viewerType:toc/root_slug:extrusion-dies-plastics)
- [4] FRANTA Ivan, *Gumárenská technologie*. 3., přeprac. a dopl. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1979, 606 s. Řada chemické literatury.
- [5] FRANTA Ivan, *Skladba směsí*, 1.vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1966, 82 s.
- [6] FRANTA Ivan, *Zpracování kaučukových směsí a vlastnosti pryže*. 2., přeprac. a rozšíř. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1969, 536 s. Řada chemické literatury.
- [7] JAHSELKA Miroslav, *Gumárenské a plastikářské stroje: učební text pro 3. a 4. ročník SPŠCh obor 06-2-02*. 2., nezm. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1974, 568 s. Řada chemické literatury.
- [8] ČERVENÝ Josef, *Výroba automobilových pneumatik*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1957, 266 s.
- [9] GILES Harold F. Jr., WAGNER John R. Jr., MOUNT Eldridge M. III. *Extrusion: The Definitive Processing Guide and Handbook* [online]. přeprac. vydání. 560 s. [cit. 2015-03-15]. ISBN 978-0-8155-1711-5. Dostupný z WWW: [https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpETDPGH02/viewerType:toc/root\\_slug:extrusion-definitive/url\\_slug:kt003QRLX6](https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpETDPGH02/viewerType:toc/root_slug:extrusion-definitive/url_slug:kt003QRLX6)
- [10] ČERNÝ, František. *Technológia spracovania kaučukov a plastov: pre 1. a 2. ročník SOU*. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1988, 207 s. Edícia chemickej literatúry (Alfa).
- [11] PREKOP, Štefan: *Gumárska technológia* I.ŤU Žilina: EDIS vydavateľství ŤU 1998. 282 s. ISBN 80-7100-483-9

- [12] MALÁČ Jiří, *Gumárenská technologie – 5. Procesy*. [online]. [cit. 2015-03-05]. Dostupný z WWW: <http://www.home.karneval.cz/0323339201/text/procesy.pdf>
- [13] TOMIS, František a František RULÍK. *Gumárenské a plastikářské stroje II*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1981, 216 s.
- [14] MüLLNER, H. W; WIECZOREK, A; EBERHARDSTEINER, J. Experimental Determination of Shear-Thinning Behaviour During Extrusion of Rubber Blends. *Strain.*, [online], 2011, [cit. 2015-03-12]. ISSN:0039-2103. Dostupné z: <http://onlinelibrary.wiley.com.proxy.k.utb.cz/doi/10.1111/j.14751305.2008.00532.x/pdf>
- [15] Extruded Rubber Shapes. *Product Design & Development*. 2013, vol. 68, no. 536. [online], [cit. 2015-03-12]. ISSN:1084-7278. Dostupný z: <http://web.a.ebscohost.com.proxy.k.utb.cz/ehost/pdfviewer/pdfviewer?sid=d95ba65c-ff71-4638-a8d8-43759d34d473%40sessionm-gr4004&vid=0&hid=4204>
- [16] LIMPER, Andreas; SCHRAMM, Dominik. Process Description for the Extrusion of Rubber Compounds - Development and Evaluation of a Screw Design Software. *Macromolecular Materials and Engineering*. 2002, vol. 287, no. 11 s. 824-835, [online], [cit. 2015-04-05], ISSN:1438-7492. Dostupný z: <http://onlinelibrary.wiley.com.proxy.k.utb.cz/doi/10.1002/mame.200290012/pdf>
- [17] LIANG, Ji-Zhao. Influence of Die Angles on Pressure Drop During Extrusion of Rubber Compound. *Journal of Applied Polymer Science*. 2001, vol. 80, no. 8 s. 1150-1154. [online], [cit. 2015-04-05], ISSN:0021-8995. Dostupný z: <http://onlinelibrary.wiley.com.proxy.k.utb.cz/doi/10.1002/app.1198/pdf>
- [18] DUCHÁČEK Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VSCHŠT, 2006. Str. 126. ISBN 80-7080-617-6 [online], [cit. 2015-05-09] Dostupný z [http://147.33.74.135/knihy/uid\\_isbn-80-7080-617-6/pages-pdf/126.html](http://147.33.74.135/knihy/uid_isbn-80-7080-617-6/pages-pdf/126.html)
- [19] MALÁČ Jiří, *Gumárenská technologie – 8. Inženýrství*. [online]. [cit. 2016-02-17]. Dostupný z WWW: <http://www.home.karneval.cz/0323339201/text/p.pdf>
- [20] ESCÓCIO, Viviane A; VISCONTE, Leila L. Y; NUNES, Regina C. R; DE OLIVEIRA, Márcia G. Rheology and Processability of Natural Rubber Composites with Mica. *International Journal of Polymeric Materials*. 2008, vol. 57, no. 4 s.

- ISSN:0091-4037, [online]. [cit. 2016-03-03] Dostupný z WWW: <http://web.a.ebs-cohost.com.proxy.k.utb.cz/ehost/pdfviewer/pdfviewer?sid=8bd864d9-4879-4796-8a9a-c9e2acd82edb%40sessionmgr4003&vid=0&hid=4104>
- [21] SCHAAL, Stéphane; CORAN, Aubert Y. The Rheology and Processability of Tire Compounds. *Rubber Chemistry and Technology*. 2000, vol. 73, no. 2 s. 225-239. ISSN:0035-9475. [online]. [cit. 2016-03-03] Dostupný z WWW: <http://search.proquest.com.proxy.k.utb.cz/docview/220659626/fulltext-PDF/3EAD4F5E8ACA468EPQ/1?accountid=15518>
- [22] PATCHARAPHUN, S; SUKNIYOM, Y; CHOOKAEW, W; SOMBATSOMPOP, N. Flow Properties and Melt Distortion in Molten Rubber Compounds Under Capillary Extrusion: Effects of Vulcanizing Systems and Fillers. *Progress in Rubber Plastics and Recycling Technology*. 2014, vol. 30, no. 3 s. 129-143. ISSN:1477-7606. [online]. [cit. 2016-03-04] Dostupný z WWW: <http://search.proquest.com.proxy.k.utb.cz/docview/1556082972/fulltext/683CB540A87B403BPQ/1?accountid=15518#center>
- [23] LEBLANC, Jean L. Rubber–filler Interactions and Rheological Properties in Filled Compounds. *Progress in Polymer Science*. 2002, vol. 27, no. 4 s. 627-687. ISSN:0079-6700. [online]. [cit. 2016-04-02] Dostupný z WWW: <http://www.sciencedirect.com.proxy.k.utb.cz/science/article/pii/S0079670001000405>
- [24] Učební texty. [online]. [cit. 2016-04-02] [http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM\\_04.pdf](http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_04.pdf)
- [25] BÁBEK Miroslav, STAŇO Jozef, KLIBÁNI, Stanislav. *Gumárenská technologie a výroba technické pryže*, výukové texty, Zlín 2013
- [26] ČSN 62 1480. *Pryž. Stanovení odrazové pružnosti pryže*. Praha: Vydavatelství norm, 1992. 8 s.
- [27] ČSN 62 1459. *Pryž. Stanovení strukturální pevnosti*. Praha: Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, 1991. 16 s.
- [28] MALÁČ Jiří, *Gumárenská technologie – 7. Zkoušky*. [online]. [cit. 2016-04-15]. Dostupný z WWW: [www.utb.cz/file/36219\\_1\\_1/](http://www.utb.cz/file/36219_1_1/)
- [29] <http://www.mertrade.cz/saze/technicke-saze-n550/> [online]. [cit. 2016-05-04].
- [30] DICK, John S., *Basic Rubber Testing - Selecting Methods for A Rubber Test Program: (MNL 39)*. (2003). ASTM International ISBN 978-0-8031-3358-7 [online].

[cit. 2016-05-03] Dostupný z WWW: <http://app.knovel.com/hotlink/-toc/id:kpBRT-SMAR6/basicrubber-testing/basic-rubber-testing>

- [31] DUCHÁČEK, Vratislav a Zdeněk HRDLIČKA. *Gumárenské suroviny a jejich zpracování*. Vyd. 4., přeprac. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2009. ISBN 978-80-7080-713-2. [online]. [cit. 2016-05-05]. Dostupný z WWW [http://147.33.74.135/knihy/uid\\_isbn-978-80-7080-713-2/pages-img/121.html](http://147.33.74.135/knihy/uid_isbn-978-80-7080-713-2/pages-img/121.html)

**SEZNAM GRAFŮ**

Graf 1. Korekce na tlakovou ztrátu v kapiláře – Bragleyho křivky směs č. 1 - 110 °C .....	45
Graf 2. Stanovení indexu n pro S1 - 110 °C .....	45
Graf 3. Závislost viskozity na rychlosti smykové deformace u směsi S1 .....	46
Graf 3. Závislost viskozity na rychlosti smykové deformace u směsi S1 .....	48
Graf 5. Závislost viskozity na rychlosti smykové deformace u směsi S3 .....	50
Graf 6. závislost deformace na smykovém modulu pro S1 – 110 °C .....	53
Graf 7. RPA - Závislost $G'$ $G''$ na úhlové rychlosti u směsi s1-110 °C .....	54
Graf 8. RPA - Závislost viskozity na úhlové rychlosti u směsi S1 - 110 °C .....	55
Graf 9. tokové křivky z RPA – S1 – NR+N550 – závislost viskozity na úhlové rychlost..	56
Graf 10. tokové křivky z RPA – S2 – NR+N550+olej – závislost viskozity na úhlové rychlosti.....	56
Graf 11. tokové křivky z RPA – S3 – NR – závislost viskozity na úhlové rychlosti .....	57
Graf 12. Sloučené tokové křivky pro směs S1, teploty 110 °C, 120 °C a 150 °C .....	58
Graf 13. Sloučené tokové křivky pro směs S2, teploty 110 °C, 120 °C a 150 °C .....	58
Graf 14. Sloučené tokové křivky pro směs S3, teploty 110 °C, 120 °C a 150 °C .....	59
Graf 15. Závislost napětí na prodloužení materiálu S1-NR+N550 pro otáčky 31, 40, 50 ve směru kolmém .....	64
Graf 16. Závislost napětí na prodloužení materiálu S1-NR+N550 pro otáčky 31, 40, 50 ve směru podélném .....	64
Graf 17. Srovnání napětí při přetržení u směsi S1-NR+550, v podélném a kolmém směru..	65
Graf 18. Srovnání prodloužení při přetržení u směsi S1-NR+550, v podélném a kolmém směru .....	65
Graf 19. Závislost napětí na prodloužení materiálu S2-NR+N550+olej pro otáčky 31, 40, 50 ve směru kolmém .....	67



Graf 20. Závislost napětí na prodloužení materiálu S2-NR+N550+olej pro otáčky 31, 40, 50 ve směru podélném .....	67
Graf 21. Srovnání napětí při přetržení u směsi S2-NR+550+olej, v podélném a kolmém směru .....	68
Graf 22. Srovnání prodloužení při přetržení u směsi S2-NR+550+olej, v podélném a kolmém směru .....	68
Graf 23. Závislost napětí na prodloužení materiálu S3-NR pro otáčky 31, 40, 50 ve směru kolmém .....	70
Graf 24. Závislost napětí na prodloužení materiálu S3-NR pro otáčky 31, 40, 50 ve směru podélném .....	70
Graf 25. Srovnání napětí při přetržení u směsi S3-NR, v podélném a kolmém směru.....	71
Graf 26. Srovnání prodloužení při přetržení u směsi S3-NR, v podélném a kolmém směru.....	71
Graf 27. porovnání strukturní pevnosti materiálu S1-NR+N550.....	74
Graf 28. porovnání strukturní pevnosti materiálu S2-NR+N550+olej.....	76
Graf 29. porovnání strukturní pevnosti materiálu S3-NR.....	77
Graf 30. porovnání strukturní pevnosti materiálu S1-NR+N550.....	79
Graf 31. porovnání strukturní pevnosti materiálu S2-NR+N550+olej.....	80
Graf 32. porovnání strukturní pevnosti materiálu S3-NR.....	82

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obr. 1. Přírodní kaučuk (poly1,4cis isopren).....	12
Obr. 2. Toková křivka.....	22
Obr. 3. Smykový tok.....	23
Obr. 4. Šnekový vytlačovací stroj.....	28
Obr. 5. Úprava hubice – a) požadovaný profil, b) vytlačený profil bez úpravy hubice, c) vytlačený profil po úpravě hubice.....	30
Obr. 6. Tlaky ve šnekovém vytlačovacím stroji.....	31
Obr. 7. RPA - konstrukce typu „kužel-kužel“ .....	51
Obr. 8. Aplikace sinusoidní deformace sloužící k rozdělení krouticího momentu $S^*$ na elastickou ( $S'$ ) a viskózní složku ( $S''$ ) [30] .....	51
Obr. 9. Vytlačené pásy S3-NR .....	60
Obr. 10. Vytlačovací hubice .....	61
Obr. 11. Tvar zkušebního tělíska pro tahovou zkoušku .....	62
Obr. 12. Zkušební těleso – typ č. 1 - trouser [27] .....	72
Obr. 13. Zkušební těleso – typ č. 2 - graves [27] .....	73
Obr. 14. Zkušební těleso – typ č. 3 - crescent [27] .....	73

**SEZNAM TABULEK**

Tab. 1. Receptury připravených kaučukových směsí.....	39
Tab. 2. Časový záznam směs č. 1 – NR+N550.....	40
Tab. 3. Časový záznam směs č. 2 – NR+N550+olej.....	40
Tab. 4. Časový záznam směs č. 3 – NR.....	40
Tab. 5. Časový záznam domíchání směsi na dvouválcí; u všech směsí stejný.....	40
Tab. 6. Naměřená viskozita Mooney.....	41
Tab. 7. Směs č. 1 – NR+N550 – naměřené a vypočtené hodnoty pro teplotu 110 °C.....	43
Tab. 8. Směs č. 1 – NR+N550 – naměřené a vypočtené hodnoty pro teplotu 120 °C.....	44
Tab. 9. Směs č. 1 – NR+N550 – naměřené a vypočtené hodnoty pro teplotu 150 °C.....	44
Tab. 10. Směs č. 2 – NR+N550+olej – naměřené a vypočtené hodnoty pro teplotu 110 °C .....	47
Tab. 11. Směs č. 2 – NR+N550+olej – naměřené a vypočtené hodnoty pro teplotu 120 °C.....	47
Tab. 12. Směs č. 2 – NR+N550+olej – naměřené a vypočtené hodnoty pro teplotu 150 °C.....	47
Tab. 13. Směs č. 3 – NR - naměřené a vypočtené hodnoty pro teplotu 110 °C.....	49
Tab. 14. Směs č. 3 – NR - naměřené a vypočtené hodnoty pro teplotu 120 °C.....	49
Tab. 15. Směs č. 3 – NR - naměřené a vypočtené hodnoty pro teplotu 150 °C.....	49
Tab. 16. Hodnoty deformačního testu S1-NR+550.....	52
Tab. 17. Hodnoty frekvenčního testu S1-NR+550.....	54
Tab. 18. Hodnoty materiálu S1-NR+N550 pro otáčky 31, 40, 50 ve směru kolmém.....	63
Tab. 19. Hodnoty materiálu S1-NR+N550 pro otáčky 31, 40, 50 ve směru podélném.....	63
Tab. 20. Naměřené hodnoty materiálu S2 pro otáčky 31, 40, 50 ve směru kolmém.....	66
Tab. 21. Naměřené hodnoty materiálu S2 pro otáčky 31, 40, 50 ve směru podélném.....	66
Tab. 22. Naměřené hodnoty materiálu S3-NR pro otáčky 31, 40, 50 ve směru kolmém....	69

Tab. 23. Naměřené hodnoty materiálu S3-NR pro otáčky 31, 40, 50 ve směru podélném .....	69
Tab. 24. Naměřené hodnoty materiálu S1 při 31 ot/min pro oba směry.....	74
Tab. 25. Naměřené hodnoty materiálu S1 při 40 ot/min pro oba směry.....	74
Tab. 26. Naměřené hodnoty materiálu S1 při 50 ot/min pro oba směry.....	74
Tab. 27. Naměřené hodnoty materiálu S2 při 31 ot/min pro oba směry.....	75
Tab. 28. Naměřené hodnoty materiálu S2 při 40 ot/min pro oba směry.....	75
Tab. 29. Naměřené hodnoty materiálu S2 při 50 ot/min pro oba směry.....	75
Tab. 30. Naměřené hodnoty materiálu S3 při 31 ot/min pro oba směry.....	76
Tab. 31. Naměřené hodnoty materiálu S3 při 40 ot/min pro oba směry.....	77
Tab. 32. Naměřené hodnoty materiálu S1 při 50 ot/min pro oba směry.....	77
Tab. 33. Naměřené hodnoty materiálu S1 při 31 ot/min pro oba směry.....	78
Tab. 34. Naměřené hodnoty materiálu S1 při 40 ot/min pro oba směry.....	78
Tab. 35. Naměřené hodnoty materiálu S1 při 50 ot/min pro oba směry.....	79
Tab. 36. Naměřené hodnoty materiálu S2 při 31 ot/min pro oba směry.....	80
Tab. 37. Naměřené hodnoty materiálu S2 při 40 ot/min pro oba směry.....	80
Tab. 38. Naměřené hodnoty materiálu S2 při 50 ot/min pro oba směry.....	80
Tab. 39. Naměřené hodnoty materiálu S3 při 31 ot/min pro oba směry.....	81
Tab. 40. Naměřené hodnoty materiálu S3 při 40 ot/min pro oba směry.....	81
Tab. 41. Naměřené hodnoty materiálu S3 při 50 ot/min pro oba směry.....	81

**SEZNAM ROVNIC**

(1) .....	42
(2) .....	42
(3) .....	42
(4) .....	43
(5) .....	43
(6) .....	44
(7) .....	45
(8) .....	46
(9) .....	46
(10) .....	46
(11) .....	46
(12) .....	73
(13) .....	78