

Vliv geometrie vzorku na mechanické chování elastomerů

Bc. Lukáš Guryča

Diplomová práce
2007



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

nascannované zadání s. 1

Souhlasím s tím, že s výsledky mé práce může být naloženo podle uvážení vedoucího diplomové práce a ředitele ústavu. V případě publikace budu uveden jako spoluautor. Prohlašuji, že jsem na celé diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval.

Ve Zlíně, 25. 05. 2007

.....

podpis

ABSTRAKT

Cílem práce je zjistit optimální geometrii (rozměry) zkušebních vzorků, které by následně posloužily k získání co nejpřesnějších výsledků zkušebních metod. V teoretické části se zabývá problematikou měření mechanických vlastností hyperelastických materiálů a vlastním složením gumárenských směsí. Experimentální část rozebírá použité metody měření a prezentuje naměřené hodnoty. Práce ukázala předpokládaný vliv tloušťky materiálu na přesnost výsledků zkušebních metod.

Klíčová slova: mechanické vlastnosti, hyperelastická, jednoosý tah, dvouosý tah, gumárenská směs

ABSTRACT

The works aim at establishing the optimal dimensions of specimens, which can be help to obtaining the best results of testing methods. The theoretical part is concerned with measurement of mechanical properties of hyperelastic material and also composition of rubber compounds. The experimental part analyses the measuring methods used and the values obtained. The work confirmed the expect effect of the material thickness on accuracy results of testing methods.

Keywords: mechanical properties, hyperelasticity, uniaxial tension, biaxial tension, rubber compound

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Jakubu Javoříkovi Ph.D za odborné vedení, rady a připomínky věnované mé diplomové práci. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Vladimíru Šumberovi za odborné vedení v laboratořích.

OBSAH

ÚVOD	6
1 TEORETICKÁ ČÁST	8
1.1 VLASTNOSTI HYPERELASTICKÝCH MATERIÁLŮ	8
1.2 MECHANICKÉ CHOVÁNÍ ELASTOMERŮ	10
1.2.1 Obecná teorie velkých elastických deformací.....	10
1.2.2 Obecný vztah mezi napětím a deformací	11
1.2.3 Jednoosá napjatost.....	11
1.2.4 Dvouosá napjatost	12
1.2.5 Čistý smyk.....	13
1.2.6 Zkoušení hyperelastických materiálů.....	14
1.2.7 Přehled modelů.....	15
1.2.8 Kategorie modelů	15
1.3 GUMÁRENSKÉ SMĚSI.....	19
1.3.1 Kaučuky.....	20
1.3.2 Plastikační činidla	22
1.3.3 Vulkanizační činidla.....	22
1.3.4 Aktivátory a retardéry vulkanizace	24
1.3.5 Retardéry vulkanizace	25
1.3.6 Urychlovače vulkanizace.....	25
1.3.7 Antidegradanty	26
1.3.8 Plniva.....	28
1.3.9 Změkčovadla	30
1.3.10 Maziva.....	31
1.3.11 Nadouvadla.....	32
1.3.12 Pomocné látky	32
2 PRAKTICKÁ ČÁST	33
2.1 CÍL DIPLOMOVÉ PRÁCE.....	33
2.2 METODY	33
2.2.1 Jednoosá napjatost.....	34
2.2.2 Dvouosá napjatost	36
2.3 PŘÍPRAVA VZORKŮ.....	39
2.4 EXPERIMENT (VÝSLEDKY).....	40
2.4.1 Jednoosý tah	40
2.4.2 Dvouosý tah.....	43
2.5 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ (DISKUZE).....	56
2.5.1 Jednoosý tah	56
2.5.2 Dvouosý tah.....	57
ZÁVĚR	61
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	62
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	64
SEZNAM OBRÁZKŮ	65
SEZNAM TABULEK	67
SEZNAM PŘÍLOH	68

ÚVOD

Kaučuk byl dovezen do Evropy před více než 200 lety, ale technicky významným materiálem se stal až po objevení vulkanizace Charlesem Goodyearem v roce 1839. Postupně pak pronikal do všech oblastí lidské práce a nacházel stále možnosti uplatnění. Největší vliv na rozmach gumárenského průmyslu měl vznikající a rychle se rozvíjející automobilismus, nepředstavitelný bez pneumatik. Dnes je kaučuk nepostradatelným materiálem, jehož nedostatek by ohrozil soudobou techniku a mnohé vymoženosti moderního života vůbec.

Pod pojmem kaučuk se nám vybavuje představa pružné, tažné a ohebné hmoty. Tyto vlastnosti jsou charakteristické pro kaučukovitý stav. Kaučukovité hmoty jsou schopny značně se deformovat i malou silou a po uvolnění vnější síly se rychle vracejí do rozměrů blízkých původním. Hmoty mající kaučukovité vlastnosti při normální teplotě se souhrně nazývají elastomery. [3]

Elastomery, nyní též označované jako hyperelastické materiály, tvoří speciální třídu polymerů, která zahrnuje přírodní a syntetické pryže. Původně, slovo pryž (rubber) znamenalo materiál získaný z kaučukodárných rostlin to znamená především ze stromů *Hevea brasiliensis* ve formě latexu čepovaného z pod kůry, dále pak *Guayula* (*Parthenium argentatum*), která obsahuje kaučuk v celých rostlinách, následuje Zlatobýl, obsahující kaučuk v listech a další rostliny jako *Tau-sagyž*, *Kok-sagyž* a *Krym-sagyž*. V současné době se termín pryž používá pro všechny materiály mající mechanické vlastnosti stejné jako přírodní pryž.

Hyperelastické materiály mají široké použití v inženýrství jako nárazové a dopadové absorbery energie, izolátory, tlumiče vibrací, nebo výrobky nepropouštějící olej a vodu, těsnící prvky a v neposlední řadě dominantní odvětví oblasti pryže a to výroba pneumatik. Stále vzrůstající užití pryží ve strojírenství vyžaduje přesnější analýzy pro předpověď chování komplexního systému obsahujícího pryžové komponenty. Pro tyto komplexní

charakteristiky je velmi důležité zejména určení mechanických vlastností pryžových materiálů.

Od 2. poloviny 20. stol. probíhá vývoj nelineárních materiálových modelů popisujících hyperelastické chování elastomerů [15]. Současně také došlo k dynamickému rozvoji využití metody konečných prvků (FEM)[14] v oblastech numerické simulace fyzikálních jevů. Máme tedy k dispozici velmi výkonné nástroje pro přesnou simulaci mechanického chování elastomerů. Jejich využití je však značně omezeno z důvodu nedostupnosti relevantních vstupních dat. Pro stanovení nelineárních materiálových konstant je totiž nutno v materiálu dosáhnout co nejvíce možných módů namáhání. Nejčastěji se toho dosahuje v testech na jednoosý tah, dvouosý tah a tzv. čistý smyk [7]. Test jednoosého tahu je možno provést na standardních univerzálních zkušebních strojích [16]. Pro otestování rovinného zatížení a čistého smyku jsou nezbytné speciální přístroje a vybavení.

Jednou z možností jak dosáhnout stavu rovnoměrné rovinné napjatosti je nafouknutí vzorku ve tvaru kruhové membrány (Bubble Inflation Technique). V mé práci se budu zabývat zkoušením pomocí jednoosé a dvouosé (rovinné) napjatosti.

1 TEORETICKÁ ČÁST

1.1 Vlastnosti hyperelastických materiálů

Elastomerní materiály vytváří amorfni strukturu s dlouhými molekulovými řetězci, které jsou v nedeformovaném stavu značně pokrivené, stočené a nahodile orientované. Při působení tahového zatížení se řetězce částečně narovnají a způsobí tak elastické protažení zatíženého materiálu. Jakmile tahová síla přestane působit, řetězce se vrátí do původního stavu. Toto chování materiálu se nazývá jako hyperelastické a je způsobeno formou příčné vazby mezi molekulovými řetězci, která se vytváří při vulkanizačním procesu. [8]

Kaučukovitý (hyperelastický) stav je definován jako vlastnost hmoty deformovat se vlivem poměrně malých vnějších sil v takovém rozsahu (100 až 700 %), jaký jiné materiály neumožňují. Po uvolnění síly, která tuto deformaci způsobila se vrací téměř úplně a velmi rychle do původního stavu. Tyto látky které mají výše uvedené chování v širokém rozsahu teplot jsou označovány souborným názvem elastomery. Plasty do této skupiny látek nepatří, neboť vykazují kaučukovitý stav jen při vyšších teplotách a v poměrně úzkém rozsahu teplot při přechodu z tuhého do plastického stavu. Jako kaučuky se obvykle označují ty elastomery, které se mohou síťovat (vulkanizovat) působením vulkanizačních činidel. Existují však i termoplastické elastomery, které nevyžadují vulkanizaci. Propojení makromolekul se zde dosahuje fyzikálními vazbami.

Základními strukturními předpoklady pro kaučukovitou elasticitu jsou :

- 1) Vysoká molekulová hmotnost polymeru (10^4 až 10^6)
- 2) Převážně lineární řetězce
- 3) Volná otáčivost kolem jednoduchých vazeb
- 4) Malé mezimolekulární síly
- 5) Řídce rozmístěné příčné vazby (chemické nebo fyzikální)

Významným společným znakem kaučuků je jejich schopnost vulkanizovat se, přičemž přítomnost dvojných vazeb není nutná. Vulkanizace je možná nejen sírou (u elastomerů obsahujících dvojnou vazbu), ale i jinými síťovacími činidly, například peroxidy, oxidy kovů, reaktivními pryskyřicemi, nebo radiačně. Přesto gumárenský průmysl dává přednost levné, dobře propracované a v mnoha dalších směrech výhodné vulkanizaci sírou.

Vlastnosti pryží jsou ovlivněny především jejich chemickou kompozicí. Pryž je uhlovodík obsahující dlouhé řetězce molekul s volným střídavým spojením. Tyto molekuly jsou spojeny v pevný počet vnitřních vazeb, takže se nemohou hýbat nezávisle, jako v tekutině. Vnitřní vazby mezi řetězci jsou v pryžích zavedeny pomocí chemické reakce přírodní pryže se sírou. Tento proces je obecně znám jako vulkanizace sírou.

Na makroskopické úrovni proto vykazuje mechanické chování pryží určité charakteristiky. Pryžové materiály mohou prodělat velké elastické (vratné) deformace v rozmezí 100 až 700%, přitom dojde k srovnání vnitřních molekulových řetězců, jak již bylo řečeno. Přičemž změna objemu zatíženého materiálu při napětí vyvolaném deformací je minimální. Z toho plyne, že elastomery jsou materiály téměř nestlačitelné. Jejich závislost mezi napětím a deformací je značně nelineární, takže pro její aproximaci nemůžeme aplikovat Hookův zákon, tudíž není možné určit definitivní hodnotu Youngova modulu, kromě oblasti malých deformací. Při napětí materiál obvykle změkne a potom opět ztuhne. V opačném případě, při stlačení, odpovídá materiál tuhému stavu. Hyperelastické materiály jsou isotropní, isothermální a elastické, což znamená, že teplotní roztažení materiálu je isotropní a deformace jsou zcela vratné. [13]

Pro aproximaci pryžové elasticity bylo vyvinuto několik materiálových modelů, které nejsou založeny na molekulárním nebo strukturálním konceptu, ale pouze na materiálové dedukci. V současnosti nepoužívanější modely jsou popsány níže.

1.2 Mechanické chování elastomerů

1.2.1 Obecná teorie velkých elastických deformací

Obecné řešení vztahu mezi napětím a deformací u pryžových materiálů bylo vyvinuto Rivlinem [10] a vyplývá ze vztahu pro potenciál deformační energie (W), který může být přímo funkcí deformačních invariantů nebo funkcí hlavních protažení:

$$\begin{aligned} W &= W(I_1, I_2, I_3), \\ W &= W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3). \end{aligned} \quad (1)$$

Na deformačním potenciálu je založen vztah pro složky napětí ij , které je definováno jako:

$$\sigma_{ij} = \frac{\partial W}{\partial E_{ij}}, \quad (2)$$

kde E_{ij} je Lagrangeův deformační tenzor. Předpokládáme, že materiál je izotropní v elastickém chování v nezatíženém stavu a téměř nestlačitelný v objemu. Postup při měření napětí na vzorku elastomeru, nezávislý na výběru osy, je dán třemi deformačními invarianty, definovanými jako:

$$\begin{aligned} I_1 &= \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3 \\ I_2 &= \lambda_1^2 \cdot \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \cdot \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \cdot \lambda_1^2 - 3 \\ I_3 &= \lambda_1^2 \cdot \lambda_2^2 \cdot \lambda_3^2 - 1, \end{aligned} \quad (3)$$

kde symboly $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ udávají hlavní protažení, definovaná jako procento z protažené délky na neprotáženou délku hran malého objemového elementu v nezatíženém stavu:

$$\lambda = \frac{L}{L_0} = \frac{L + \Delta u}{L_0}. \quad (4)$$

Hodnoty λ_i jsou dány $(1 + \varepsilon_i)$, kde ε_i je poměrná deformace. Hodnoty I_i jsou nulové v nezatíženém stavu, když $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 1$. Pro nestlačitelné materiály je I_3 nulové, tudíž zůstávají pouze dvě nezávislé hodnoty napěťových konstant, I_1, I_2 , z čehož vyplývá rovnice deformačního potenciálu $W = W(I_1, I_2)$. [10]

1.2.2 Obecný vztah mezi napětím a deformací

Dále pak z [9], vztah mezi napětím a deformací obdržíme z funkce napěťového energetického potenciálu [2], vyjádřením „virtuální“ práce, uvažované jako:

$$\delta W = (\sigma_1 / \lambda_1) \cdot (\partial W / \partial \lambda_1) \delta \lambda_1 \quad (5)$$

analogicky lze vyjádřit vztah pro λ_2, λ_3 . Pro σ_1 obdržíme:

$$\sigma_1 = 2 \left[\lambda_1^2 \left(\frac{\partial W}{\partial I_1} \right) - \left(\frac{1}{\lambda_1^2} \right) \left(\frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \right] + P \quad (6)$$

s analogickými vztahy pro σ_2 a σ_3 , kde $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ jsou jednotlivé složky skutečného napětí. Množství P udává nespecifikovaný tlak. P se stanovuje na základě známých hodnot σ a λ při základních módech zatěžování. [10, 7]

1.2.3 Jednoosá napjatost

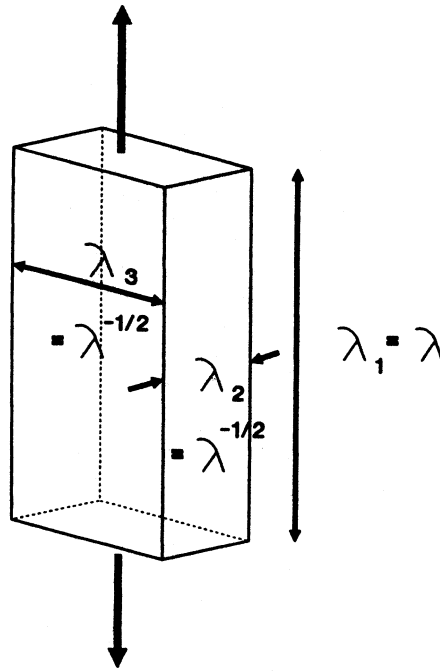
Při jednoosé napjatosti (prostém protažení) působí na daný vzorek materiálu tahová síla pouze v jednom směru (obr. 1). Jednoduché prodloužení je definováno poměrným protažením $\lambda_1 = \lambda, \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda^{-1/2}$. Tato deformace vyplývá z předpokladu nestlačitelnosti, kdy objem zůstává nezměněn a tudíž $\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 = 1$. Pro tento stav napětí, kde jsou boční strany daného vzorku nezatížené, platí $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ a rovnice (6.) pro σ_2 a σ_3 se stane rovnicí neznámého stlačení P :

$$P = -2 \left[\lambda^{-1} \left(\frac{\partial W}{\partial I_1} \right) - \lambda \left(\frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \right] \quad (7)$$

Když tuto rovnici dosadíme do vztahu (6.) pro $\sigma_1 (= \sigma)$ výsledek je:

$$\sigma = 2 \left[\left(\frac{\partial W}{\partial I_1} \right) + \lambda^{-1} \left(\frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \right] (\lambda^2 - \lambda^{-1}), \quad (8)$$

kde σ udává skutečné napětí.

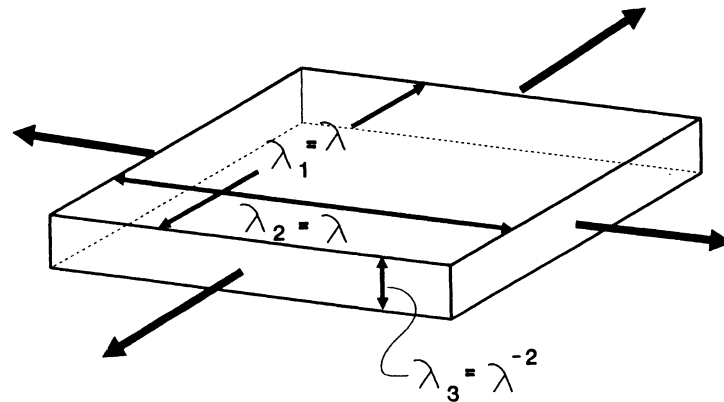


Obr.1. Jednoosá napjatost

Předchozí rovnice je „velko-deformační“ ekvivalent jednoduchého vztahu Hookova zákona, $\sigma = E\varepsilon$ aplikovatelného při malých deformacích. [10]

1.2.4 Dvouosá napjatost

Vztah pro dvouosou napjatost můžeme získat ze vztahů pro jednoosou napjatost. Poměrné protažení je dáno jako $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$; $\lambda_3 = 1/\lambda^2$ (obr. 2). Napětí σ_3 je nulové, protože tato strana vzorku je nezátížená. Tudíž tlak P v rovnici (6.) přechází na $P = -2(\lambda^{-4}W_1 - \lambda^4W_2)$. Napětí σ_2 a σ_1 jsou dány jako: $\sigma_1 = \sigma_2 = 2(W_1 + \lambda^2W_2)(\lambda^2 - \lambda^{-4})$. Což opět potvrzuje, že mezi napětím a deformací existuje vysoce nelineární vztah. [10]



Obr. 2. Dvouosá napjatost

1.2.5 Čistý smyk

Další jednoduchý deformační stav je popsán jako „čistý smyk“. Ten je definován jako napětí aplikované ve směru 1, v takové formě, že je zabráněno změně šířky ve směru 2, tzn. $\lambda_2 = 1$ (obr. 3). Toto je odůvodnění pro název „smyk“. Při smykové deformaci linie rovnoběžná s jednou z hlavních os nepodléhá žádnému prodloužení. Název „čistý“ znamená, že hlavní osy nerotují během deformace. Výška h daného vzorku ve vertikálním směru (směr namáhání) je značně menší, než horizontální šířka w ve směru druhém a to řádově méně než jedna desetina w . Dlouhé horizontální svorky zabraňují kontrakci vedlejších stran vzorku a dochází pouze k napětí ve vertikálním směru, takže je dáno $\lambda_2 = 1$.

Poměrné prodloužení je při deformaci dáno jako: $\lambda_1 = \lambda$, $\lambda_2 = 1$ a $\lambda_3 = 1/\lambda$, zatímco napětí $\sigma_3 = 0$. Napětí σ_2 je vyvoláno tuhými svorkami, takže není nulové. Z rovnice (6.) tlak P obdržíme jako:

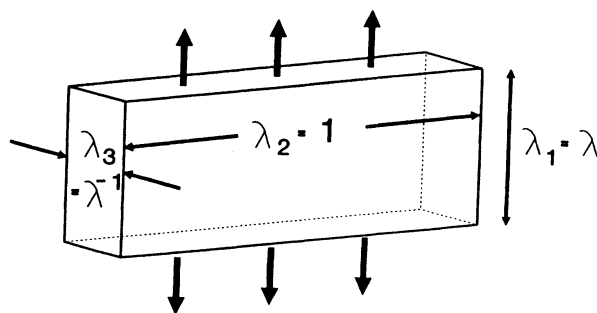
$$P = -2(\lambda^{-2}W_1 - \lambda^2W_2) \quad (9)$$

Tudíž napětí $\sigma_1 (= \sigma)$ v protahovaném směru je dáno jako:

$$\sigma = 2(W_1 + W_2) \cdot (\lambda^2 - \lambda^{-2}) \quad (10)$$

a vedlejší napětí σ_2 je:

$$\sigma_2 = 2(W_1 + \lambda^2W_2) \cdot (1 - \lambda^{-2}) \quad (11)$$



Obr. 3. Čistý smyk

Vztah mezi tahem a tlakem při nuceném napětí je opět vysoce nelineární funkcí. [10]

1.2.6 Zkoušení hyperelastických materiálů

Při zkoušení hyperelastických materiálů se obvykle používají metody zatěžování pro jednoosou napjatost, dvouosou napjatost a čistý smyk. Výsledky těchto zkoušek potom lze použít pro přesnou aproximaci charakteristiky chování daného materiálu při zatěžování.

Podstatou zkoušky pro jednoosou napjatost je protahování standardního zkušební tělesa v trhacím stroji konstantní rychlostí v jednom směru, přičemž se odečítají hodnoty síly a prodloužení, potřebné k hodnocení požadovaných charakteristik protahovaných zkušebních těles. Protahování probíhá až do okamžiku přetržení tělesa. [1]

Při zkoušce pro dvouosou napjatost je zkušební těleso protahováno v trhacím stroji rovnoměrnou zatěžovací silou ve dvou směrech, přičemž se odečítají hodnoty síly a protažení. Zkušební těleso tvaru čtverce je v trhacím stroji rovnoměrně upnuto po celém svém obvodu. [11] Další možnou metodou je využití principu nafukování kdy je fragment plochy zkušební tělesa díky působícímu tlaku P namáhán dvouosým tahem.

Při zkoušce pro čistý smyk je zkušební těleso obdélníkového tvaru rovnoměrně zatěžováno v hlavním směru tak, aby bylo zabráněno změně šířky vedlejších stran, pomocí dlouhých horizontálních svorek. V průběhu zatěžování linie rovnoběžná s jednou z hlavních os nepodléhá žádnému prodloužení.

1.2.7 Přehled modelů

Nejrozšířenější hyperelastické modely pro nestlačitelné materiály jsou : *Neo-Hookean*, *Mooney-Rivlin*, *Polynomial Form*, *Ogden Potential*, *Arruda-Boyce*, *Gent* a *Yeoh*.

Každý z těchto modelů je založen na konkrétní formě napěťového energetického potenciálu W , (2) který využívá buď deformačních invariant nebo je založen přímo na hlavním protažení. Napěťový energetický potenciál vyžaduje konkrétní materiálové konstanty, které jsou závislé na funkci napěťového energetického potenciálu. Výběr W a vložené materiálové konstanty je určen vztahem mezi napětím a deformací.

1.2.8 Kategorie modelů

Polynomická forma

Polynomická forma je založena na první a druhé deformační invariantě (I_1 , I_2). Jde o model, jenž má formu:

$$W = \sum_{i+j=1}^N c_{ij} (\bar{I}_1 - 3)^i (\bar{I}_2 - 3)^j, \quad (12)$$

kde c_{ij} jsou materiálové konstanty a za N se dosazují hodnoty od jedné do nekonečna, ale obvykle není hodnota N vyšší než 3. Tato forma může být aplikována pro deformaci dosahující až 300%. [7, 9]

Mooney-Rivlin

Ve čtyřicátých letech 20. stol. Mooney navrhl fenomenologický model se dvěma parametry založenými na předpokladu lineárního vztahu mezi zatížením a smykem během jednoduché smykové deformace. V padesátých letech Rivlin modifikoval Mooneyho model, aby obdržel obecné vyjádření funkce deformační energie vyjádřené pomocí deformačních invariantů.

Existují dvou, tří, pěti a devíti-parametrové Mooney Rivlin modely, které také můžeme uvažovat jako jednotlivé případy polynomické formy.

- Dvou-parametrový model je jeden z nejvíce používaných modelů. Je ekvivalentní polynomické formě s $N=1$:

$$W = c_{10}(\bar{I}_1 - 3) + c_{01}(\bar{I}_2 - 3), \quad (13)$$

kde c_{10} , c_{01} jsou materiálové konstanty.

- Tří-parametrový model je shodný s polynomickou formou když $N=2$ a $c_{20}=c_{02}=0$:

$$W = c_{10}(\bar{I}_1 - 3) + c_{01}(\bar{I}_2 - 3) + c_{11}(\bar{I}_1 - 3)(\bar{I}_2 - 3), \quad (14)$$

kde c_{10} , c_{01} , c_{11} jsou materiálové konstanty.

- Pěti-parametrový model je stejný jako polynomická forma, když $N=2$:

$$W = \sum_{i+j=1}^2 c_{ij}(\bar{I}_1 - 3)^i(\bar{I}_2 - 3)^j, \quad (15)$$

kde c_{ij} je materiálová konstanta.

- Devíti-parametrový model je stejný jako polynomická forma, když $N=3$:

$$W = \sum_{i+j=1}^3 c_{ij}(\bar{I}_1 - 3)^i(\bar{I}_2 - 3)^j, \quad (16)$$

kde c_{ij} je materiálová konstanta.

Obecně je možné říct, že dvou-parametrový model může být validní pro 90-100% tahové deformace, ale nemusí být dobře charakterizováno chování materiálu při stlačení. Pěti nebo devíti-parametrové modely mohou být používány pro 100-200% tahové deformace. [7, 9]

Yeoh

Model Yeoh je podobný jako polynomická forma, ale nepoužívá druhého deformačního invariantu a jako takový se obtížněji vyhodnocuje a poskytuje méně přesné výsledky. Je definován jako:

$$W = \sum_{i=1}^N c_{i0} (\bar{I}_1 - 3)^i, \quad (17)$$

kde c_{i0} je materiálová konstanta a za N se dosazují hodnoty od jedné do nekonečna, ale obvykle není hodnota N vyšší než 3.

Yeoh model je obvykle uvažován s $N=3$. Tří-parametrový Yeoh model obecně poskytuje dobré výsledky pro širokou škálu tahové deformace i když nemusí být přesný pro nižší hodnoty. [7, 9]

Neo-Hookean

Model Neo-Hookean je poměrně jednoduchý a je možné ho brát, jako podmnožinu polynomická formy pro $N=1$, $c_{01} = 0$, $c_{10} = \mu/2$:

$$W = \frac{\mu}{2} (\bar{I}_1 - 3), \quad (18)$$

kde μ je počáteční smykový modul.

Jedná se o poměrně srozumitelný hyperelastický model, jenž může být používán jako vstupní model pro hledané charakteristiky. Je limitován pro deformaci 30-40% v jednoosém namáhání a 80-90% v čistém smyku. [7, 9]

Arruda-Boyce

Arruda-Boyce forma je model založený na statistické mechanice. Arruda-Boyce může být uvažovaná jako rozšíření modelu Yeoh pro $N=5$, kde konstanty mají reálný význam.

$$W = \mu \sum_{i=1}^5 \frac{C_i}{\lambda_L^{2i-2}} (\bar{I}_1 - 3^i), \quad (19)$$

kde konstanty C_i jsou definovány jako:

$$C_1 = \frac{1}{2}, C_2 = \frac{1}{20}, C_3 = \frac{11}{1050}, C_4 = \frac{19}{7050}, C_5 = \frac{519}{673750}. \quad (20)$$

Z předcházející rovnice je jasné, že Arruda-Boyce forma může být myšlena jako model s $N=5$, kde μ je tzv. počáteční smykový modul.

Limitní síťové protažení λ_L je protažení při kterém se napětí začíná blížit nekonečnu. Jestliže se λ_L rovná nekonečnu, forma Arruda-Boyce přechází na Neo-Hookean. Model je limitován pro maximální deformaci do 300%. [7, 9]

Gent

Gent model je mikromechanický model, podobný jako Arruda-Boyce, jenž užívá konceptu limitního síťového protažení:

$$W = -\frac{EI_m}{6} \ln \left(1 - \frac{\bar{I}_1 - 3}{I_m} \right), \quad (21)$$

kde se vkládají konstanty E, I_m . Konstanta E je počáteční modul pružnosti, který se pro nestlačitelné materiály rovná $3\mu_0$. I_m je limitní hodnota $(I_1 - 3)$, analogická k λ_L pro Arruda-Boyce. Jestliže hodnota přirozeného logaritmu narůstá, výsledná forma se bude podobat modelu Yeoh. Gent model může být uvažován jako rozšíření modelu Yeoh, kde konstanty mají reálný význam. Je velmi dobrý pro malé a velké protažení. [7, 9]

Ogden

V roce 1972 Ogden navrhl napět'ovou energetickou funkci vyjádřenou v hodnotách hlavního protažení, které je velmi obecný nástroj pro popis hyperelastických materiálů:

$$W = \sum_{i=1}^N \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\bar{\lambda}_1^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_2^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_3^{\alpha_i} - 3), \quad (22)$$

kde μ_i, α_i jsou materiálové konstanty a za N se dosazují hodnoty od jedné do nekonečna, ale obvykle není hodnota N vyšší než 3.

Pro N=1 a $\alpha_1 = 2$ se Ogden stává ekvivalentní k modelu Neo-Hookean. Pro N=2, $\alpha_1 = 2$ a $\alpha_2 = -2$ Ogden přechází na dvou-parametrový Mooney-Rivlin model. Ogden může být obecně aplikován pro deformaci do 700%. [7, 9]

1.3 Gumárenské směsi

Kaučukové směsi vyžadují řadu přísad, které usnadňují zpracování, umožňují vulkanizaci a dodávají pryži žádané vlastnosti. Dělíme je na:

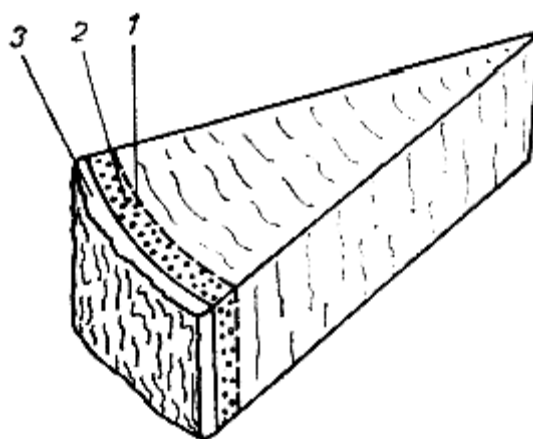
- kaučuky
- plastikační činidla
- vulkanizační činidla
- aktivátory a retardéry vulkanizace
- urychlovače vulkanizace
- antioxidanty a antiozonanty
- plniva
- změkčovadla
- anorganické pigmenty a organická barviva
- pomocné látky

1.3.1 Kaučuky

Kaučuk je elastomerní nezesíťovaná makromolekulární látka, která zesíťováním přechází v pryž. Této pak dává základní charakteristické vlastnosti. Konvenčně dělíme kaučuky na přírodní a syntetické.

1.3.1.1 Přírodní kaučuk

Přírodní kaučuk se získává z kaučukovníku *Hevea brasiliensis*. V kůře kaučukovníku brazilského je síť mléčnic, které jsou vyplněny latexem. Při naříznutí kůry – čepování – latex vytéká a sbírá se. Koaguluje se působením zředěné kyseliny mravenčí nebo octové, které se přidá přibližně 0,5 % na sušinu kaučuku. Před srážením se latex ředí na 15 – 20 %ní koncentraci. Blok vysráženého kaučuku se ždímá a pere v baterii stejnoběžných dvouválců. Z posledního válce se vytahují listy tlusté asi 3 mm, které se suší, popř. ještě udí. Sušením se získávají druhy označované crepes (krepky), uzením druhy označované smoked. To jsou dva hlavní typy a dělí se na četné obchodní druhy. Jednotlivé druhy kaučuku se technicky třídí podle dohodnutých referenčních vzorků. [6]



Obr. 4. Řez kmenem *Hevea brasiliensis*
1 – kambium, 2 – nová kůra s latexovými
kanálky, 3 – stará kůra

Přírodního kaučuku lze použít ve všech případech, kde se nepožaduje odolnost pryže proti botnání (v nepolárním prostředí), zvýšená odolnost proti teplotě, některým chemickým činidlům, povětrnosti a ozónu. Jeho předností je velká pevnost neplněných a světlých pryží, výborné dynamické vlastnosti (malé hysterezní ztráty), dobrá odolnost proti nízkým teplotám, pevnost při vyšších teplotách, dobrá strukturní pevnost a zatím žádným syntetickým kaučukem nedosažená konfekční lepivost. Není běžně vhodný pro rychlé vulkanizace při vyšších teplotách.

1.3.1.2 Syntetický kaučuk

Důvody, které vedly k vývoji a rozvoji syntetických kaučuků, jsou technické i ekonomické. Šlo o to, doplnit nebo nahradit kaučuk přírodní (buď těžko dostupný, nebo vyráběný v nedostatečném množství) kaučuky s podobnými vlastnostmi, které by bylo možno vyrábět v dostatečném množství, tj. z dostupných surovin a za cenu blízkou kaučuku přírodnímu. Tak vznikla velká skupina syntetických kaučuků pro všeobecné použití, tj. takových, u nichž není mimořádně zdůrazněna některá vlastnost. Patří sem kaučuk polybutadienový, butadienstyrenový a stereoregulované kaučuky, *cis*-1,4-polyizopren a *cis*-1,4-polybutadien. Poslední dva kaučuky tvoří s přírodním kaučukem podskupinu nazývanou též kaučuky rezilientní.

Nejdůležitějším druhem syntetického kaučuku je *butadienstyrenový kaučuk (SBR)*. Všeobecně se butadienstyrenový kaučuk hůře zpracovává než kaučuk přírodní, a proto je třeba do směsí přidávat více změkčovadel. konfekční lepivost je malá, což je výhodou jen tehdy, jde-li o manipulace s natíraným textilem, nebo při výrobě vytlačovaného zboží. Pevnost neplněných pryží z butadienstyrenových kaučuků je nepatrná, asi 2-3 N/mm². Plněním vhodnými aktivními sazemi nebo ztužujícími světlými plnivými se dosahuje dobrých mechanických vlastností a dobré zpracovatelnosti. Butadienstyrenový kaučuk je nevhodný pro pryže dynamicky namáhané, kde se požaduje značná rezilience, a pryže s vysokou hodnotou strukturní pevnosti. Butadienstyrenové kaučuky nepodléhají reverzi, lze je vulkanizovat za vyšších teplot a tím zkrátit vulkanizační cyklus.

Butadienstyrenový kaučuk je vhodný pro výrobu běžných výrobků: podrážek, podpatků, hadic, dopravních pásů, kabelů, většiny vytlačované a lisované technické pryže, natíraných

textilií apod. Zvláště je třeba zvážit použití butadienstyrenového kaučuku v pláštích pneumatik. Z hlediska výkonu lze téměř 100 % použít do směsí na pláště pneumatik osobních automobilů; malá lepivost nánosů zhoršuje však výkon při konfekci. [4]

1.3.2 Plastikační činidla

Je známa celá řada sloučenin schopných urychlovat plastikaci kaučuku. Jsou to látky nejrůznějšího složení: aromatické merkaptany nebo jejich soli, peroxidy, nitro-, nitroso-, hydrazo- a diazo- sloučeniny, tiuramdisulfidy, deriváty močoviny, guanidiny, redukčně-oxidační systémy a kovy přechodné valence [2]. Výběr však je ztížen celou řadou požadavků. Od dokonalého plastikačního činidla se požadují tyto vlastnosti:

- zdravotní nezávadnost
- nízká cena
- účinnosť při pokud možno nízkých teplotách
- musí se dobře vmíchávat do kaučuku
- nemá ovlivňovat průběh vulkanizace
- nesmí zhoršovat vlastnosti vulkanizátů a průběh jejich stárnutí
- nesmí zbarvovat vulkanizát
- musí svou konzistencí vyhovovat navažování

Některé gumárenské přísady (saze, antioxidanty, síra) snižují nebo úplně inhibují účinek plastikačních činidel. Vlivu síry se využívá k zastavení plastikace u kaučuků náchylných k přeplastikování (např. IR), chceme-li zastavit další průběh při míchání směsí.

1.3.3 Vulkanizační činidla

Podstatou vulkanizace je vytváření chemických vazeb mezi molekulami kaučuku. K tomu, aby se zabránilo neomezenému toku celých molekul vzhledem k sousedním molekulám, stačí poměrně malé množství příčných vazeb rozmístěných podél řetězce. Vlastnosti

kaučuku se přitom podstatně mění, z převážně plastického stavu přechází v elastickou pryž. Zlepšují se tak vlastnosti jako pevnost, odrazivá pružnost, odolnost proti nízkým a vysokým teplotám, roste tvrdost a modul, snižuje se tažnost a trvalá deformace [2].

Vulkanizační činidla jsou látky, které mají schopnost vytvářet chemickou reakcí příčné vazby mezi molekulami kaučuku. Nejběžnějšími vulkanizačními činidly jsou: síra, donory síry, selen, telur, peroxidy, kovové kysličníky, reaktivní pryskyřice.

1.3.3.1 Síra

Dle (10) nejpoužívanějším vulkanizačním činidlem je elementární síra. Molekula je tvořena osmičlenným kruhem. Dodává se mletá vulkanizační síra, někdy bývá smáčena olejem. Síra vhodná pro vulkanizaci má mít stupeň čistoty nejméně 99,5 % a obsah popela nejvýše 0,5 %. Teplota tání je přibližně 115°C. Nesmí být kyselá, neboť kyselost má zpouštějící vliv na vulkanizaci. Proto se nepoužívá sirný květ, který obsahuje stopy SO₃. Zatímco dříve se požadovala zvláště vysoká jemnost částic, dává se dnes přednost střední jemnosti částic na základě poznatku, že taková síra se lépe disperguje.

Síra se v různých polymerech rozdílně rozpouští. Zatímco v NR a SBR je poměrně dobře rozpustná (1,5 dsk při 25°C), je rozpustnost v HNBR mnohem horší. Teplotní koeficient rozpustnosti síry je pozitivní. Při vyšší teplotě se tedy rozpouští v kaučuku více síry než při normální teplotě. Po ochlazení směsi má proto síra tendenci vykvétat na povrch nebo vykristalizovat z přesyceného roztoku i uvnitř zamíchané směsi. Rychlost krystalizace závisí na stupni přesycenosti, na rychlosti difuze v daném polymeru a na ostatních přísadách ve směsi. Důležitá je rychlost ochlazení. Při pomalejším chlazení zamíchané směsi síry vykvítá méně. Aby nedocházelo ke zhoršení lepivosti směsi vlivem vykvétání síry, je ji třeba vmíchat při pokud možno nízké teplotě.

1.3.3.2 Selen a telur

Také selenu a teluru, které jsou v periodické soustavě prvků v blízkosti síry, může být příležitostně použito k vulkanizaci kaučuku. Účinek těchto prvků je ve srovnání se sírou poněkud slabší. Selen a telur se může přidávat v menším množství k síře nebo k donorům síry. Obsah síry pak může být podstatně snížen. Takto vulkanizovaná pryž vykazuje zvláště dobrou teplovzdornost v horkém vzduchu a páře a má vysoké tahové vlastnosti. Je však třeba upozornit na jedovatost selenu a teluru.

Dále se pak využívá donorů síry, peroxidů, reaktivních pryskyřic či jiných vulkanizačních činidel.

1.3.4 Aktivátory a retardéry vulkanizace

Bez přídavku aktivátoru by byla síra málo účinným vulkanizačním činidlem. K dosažení potřebné koncentrace příčných vazeb by bylo třeba ve směsích bez aktivátoru dávkovat podstatně více síry nebo donoru síry. Podstata aktivace při vulkanizaci sírou spočívá ve zvýšení síťovací účinnosti vulkanizačního systému [2].

Jako aktivátorů se používá různých kysličníků kovů: ZnO, MgO, CaO, CdO. V praxi se nejlépe osvědčil kysličník zinečnatý spolu s kyselinou stearovou a pro transparentní směsi stearan zinečnatý.

Kysličník zinečnatý se vyrábí dvojím způsobem, buď přímo ze zinkových rud spalováním vyredukovaného Zn v proudu přebytečného vzduchu nebo spalováním čistého elektrolyticky získaného Zn. ZnO má v gumárenských směsích více funkcí: je aktivátorem vulkanizace, byl jedním z prvních ztužujících plniv (v současné době se však k tomuto účelu pro vysokou cenu nepoužívá), je bílým pigmentem a vulkanizačním činidlem. Jako aktivátor se do směsí přidává v množství 1 – 5 dsk, nejčastěji 3 dsk. Aktivní ZnO se získává žháním zásaditého uhličitánu zinečnatého, uplatňuje se hlavně v latexových směsích.

1.3.5 Retardéry vulkanizace

Použití retardérů vulkanizace je nezbytné pro směsi obsahující vysoce aktivní vulkanizační přísady nebo urychlovače vulkanizace, mají-li se takové směsi zpracovávat při vyšších teplotách. Retardéry chrání směs před předčasným navulkanizováním při míchání a delším zpracování. Mají význam především v provozních podmínkách, kdy často vznikají potíže s chlazením. Zvláště v létě není voda o teplotě kolem 30°C schopna uchládit stroje tak, aby se nesnížila bezpečnost zpracovávaných směsí pod únosnou mez. I když jsou nyní k dispozici urychlovače se zpožděným účinkem, retardérů se v řadě receptur používá, především u směsí ztužených vysoce aktivními retortovými sazemí, které snižují bezpečnost. Dále tam, kde se vlivem intenzifikace procesu přípravy a zpracování směsí dosahuje vysokých tepot.

1.3.5.1 Anorganické retardéry

MgO – pro CR (má vlastně několikerou funkci)

PbO – zpomaluje působení tiuramů, aminů a aldehydaminů.

1.3.5.2 Organické retardéry

Octan sodný se používá pro CR, pokud není na závalu zhoršení navlhavosti a dielektrických vlastností pryže. K retardérům patří látky kyselého charakteru např: kalafuna, kyselina sebaková, adipová, melainová. Retardéry zvyšují bezpečnost směsí při zpracování, současně však zpomalují proces vulkanizace. Ve směsích urychlených sulfonamidy tyto látky snižují bezpečnost a zpomalují vulkanizaci. Nejsou tedy vhodnými přísadami do těchto směsí.

1.3.6 Urychlovače vulkanizace

Význam urychlovačů vulkanizace spočívá nejen ve zrychlení procesu, ale i ve zvýšení efektivity vázání síry a tím ve zlepšení užitečných vlastností pryže, jmenovitě

teplovzdornosti, odolnosti proti reverzi a stárnutí. Spolu se sírou a aktivátory vulkanizace tvoří urychlovače vulkanizační systém.

Celý vulkanizační systém a zvláště charakter urychlovače má výrazný vliv na průběh vulkanizace a na vlastnosti pryže. Doba potřebná k vulkanizaci se zkracuje z původních několika hodin při neurychlené vulkanizaci řádově na minuty až desítky minut a ve zvláštních případech vulkanizace při vysokých teplotách (kolem 200 °C) dokonce na desítky sekund. Efektivní vázání síry ovlivňuje charakter příčných vazeb a tím i vlastnosti pryže. Snižuje se tendence k reverzi, síra nevykvétá z výrobků, zvyšuje se tepelná stabilita vulkanizátů a snižuje se trvalá deformace. Použijí-li se velmi rychlé urychlovače nebo ultraurychlovače, je možno podstatně snížit teplotu vulkanizace, což má další příznivý vliv na vlastnosti pryže, případně jiných komponent u kombinovaných výrobků a na úspory energie.

Původně se k urychlení vulkanizace používalo anorganických látek, hlavně kysličníků a hydroxydů kovů, případně jiných sloučenin olova, zinku, vápníku nebo hořčíku. Dnes tyto látky slouží jako aktivátory vulkanizace [2].

Vyráběné urychlovače je možno rozdělit podle různých kritérií (např. chemického složení nebo rychlosti vulkanizace) do různých skupin. Podle rychlosti vulkanizace je dělíme na:

- a) pomalé (amíny, guanidiny)
- b) rychlé (tiazoly, sulfonamidy)
- c) velmi rychlé (tiuramy a kombinace urychlovačů)
- d) ultraurychlovače (ditiokarbamáty, xantogenáty).

1.3.7 Antidegradanty

Stárnutí elastomeru a vulkanizátů má řadu příčin. Výsledné účinky posuzujeme podle způsobu a stupně znehodnocení původních vlastností. Při stárnutí se uplatňují tyto vlivy:

1. Kyslík a teplo (termooxidace)

2. kyslík a mechanické namáhání (vznik trhlin únavou materiálu)
3. ozón a statické nebo dynamické namáhání (vznik ozonových trhlin)
4. kyslík a světlo, hlavně UV záření (zvrásnění povrchu)
5. kyslík se solemi kovů přechodných valencí (stárnutí vlivem kaučukových jedů)
6. horká voda nebo pára (hydrolyza některých funkčních skupin)
7. účinek samotného tepla – za nedokonalého přístupu kyslíku (síťování, reverze).

Může docházet také ke kombinovanému účinku jednotlivých vlivů.

Úkolem stabilizace je zpomalit nebo dočasně úplně zastavit průběh stárnutí. K tomu účelu se využívá v podstatě tři způsoby:

1. volí se takový polymer, který v předpokládaných podmínkách nejméně stárne
2. polymer se modifikuje, případně se povrchově chrání
3. přidávají se stabilizační přísady – antidegradanty.

Antidegradanty je možno rozdělit do těchto hlavních skupin

- antioxidant a antiozonanty
- činidla chránící proti účinkům světla (UV absorbéry)
- ochranné vosky
- přísady potlačující hydrolyzu funkčních skupin
- akceptory rozkladných produktů.

Stabilizační účinek je většinou založen na schopnosti některých látek reagovat s nízkomolekulárními produkty rozkladu, blokovat aktivní centra, reagovat s volnými radikály, rozkládat peroxidy, reagovat s meziprodukty oxidace, tvořit komplexy kovů, absorbovat UV záření. Žádná látka není schopna obsáhnout všechny uvedené funkce a proto je třeba chránit materiál vhodnými kombinacemi antidegradantů. Některé funkce mohou být spojené (např. antioxidant – antiozonant) [2].

1.3.8 Plniva

Použití plniv v kaučukových směsích má obecně dva důvody. Prvořadým důvodem je úprava zpracovatelnosti směsí a fyzikálně mechanických vlastností vulkanizátů. Druhý důvod je ekonomický, použitím levných plniv se dosahuje prostného snížení ceny výrobku.

Pro běžnou praxi vyhovuje rozdělení plniv do tří skupin:

1. saze
2. světlá plniva (aktivní a neaktivní)
3. ostatní

Aktivní plniva se ztužujícími účinky označujeme jako ztužovala.

1.3.8.1 Saze

Z používaných plniv kaučukových směsí mají dnes největší význam saze, které se vyrábějí v širokém sortimentu.

Spotřeba sazí podle oblastí použití:

Pneumatiky	70 %
Technická pryž	25 %
Barvy, laky, plasty	5 %

Je tedy zřejmé, že největší množství sazí se spotřebuje pro výrobu pneumatik. Životnost běhounu pneumatiky je z větší části dána právě použitím vhodného druhu sazí (obvykle HAF nebo ISAF) v dávkách asi od 42 do 70 dsk, podle použitého polymeru, druhu sazí a druhu pneumatiky.

Saze mají v kaučuku ztužující účinek, který je tím větší, čím menší jsou částice a čím větší je povrch sazí. Zavedeme-li do polymerní matrice plnivo, mění se výsledné vlastnosti

celého systému. Plnivo snižuje zpravidla deformační možnosti, ovlivňuje disipaci energie a strukturní pevnost [2].

Důležitým faktorem jsou povrchové síly mezi plnivem a polymerní matricí, jakož i tvar částic. Ztužující plniva snižují do značné míry nehomogenitu v síti, která by mohla vést k rychlému růstu trhlin. Ztužující plniva zvyšují strukturní pevnost a snižují tažnost. Záleží ovšem na rychlosti deformace. Mezi reálnými plnivy jsou rozdíly, které závisí na velikosti částic, vzdálenosti mezi jednotlivými částicemi a snášivosti.

Ztužující saze sestávají z nodulů (hrudek) menších jednotek (tradičně nazývaných částicemi) spojených v různém rozsahu do agregátů nepravidelného tvaru, které přečkávají operace míchání a zpracování, aniž byly podstatně dotčeny. Měrný povrch se řídí především velikostí nodulů zatímco tzv. „struktura“ je odrazem stupně internodulárního spojení nebo rozměru agregátů. Vlivy měrného povrchu sazí a struktury na fyzikální vlastnosti jsou dobře známé. Jako noduly, tak strukturní agregáty mají distribuci velikostí a o vlivu šířky jejich distribuce na ztužení je zatím málo známo. Z uměle připravené široké distribuce průměrů nodulů kombinací různých druhů sazí při konstantním měrném povrchu a olejovém čísle (absorpce DBP) bylo zjištěno, že odolnost proti oděru při zkouškách pneumatik se zlepšuje se ztužováním průměrů nodulů, ale hystereze vulkanizátů roste [2].

Vyjádříme-li obecně vliv jednotlivých faktorů na vlastnosti směsí a vulkanizátů, pak platí:

- velikost částic sazí, případně měrný povrch – ovlivňuje zejména ztužující vlastnosti (pevnost v tahu, strukturní pevnost, odrazovou pružnost a odolnost proti oděru),
- struktura sazí – ovlivňuje převážně tuhost směsi a vulkanizátů. Tuhost má vliv na vlastnosti jako jsou viskozita Money, srážení při vytlačování, tvrdost, modul,
- chemické složení povrchu – má zejména vliv na vulkanizaci a částečně ovlivňuje i ztužení,

Hlavní druhy sazí jsou: kanálové, retortové olejové, tetortové plynové, acetylenové, termické, lampové a forsunkové. Nejvíce se dnes vyrábí sazí retortových, hlavně ze dvou důvodů: větší výtěžnost suroviny a možnost vyrábět více druhů sazí na jednom zařízení. Výroba kanálových sazí postupně klesá.

1.3.8.2 Světlá plniva

Do příchodu syntetických kaučuků vyhovovala běžná světlá plniva svému účelu. Z přírodního kaučuku bylo možno připravit dobře použitelné pryže i s neztužujícími plnivými. Rostoucí spotřeba syntetických kaučuků si vyžádala vývoj bílých aktivních plniv.

Rozdělení světlých plniv není tak propracované jako u sazí. Mají oproti sazím rozdílné chemické složení a vyrábějí se různými způsoby. Byla snaha dělit je na aktivní a neaktivní. Nyní je však přechod tak nevýrazný, že s tímto dělením nevystačí. Proto je výhodnější dělit světlá plniva na:

1. přírodní plniva
2. chemicky barvená.

Mezi přírodní plniva patří např. uhličitany vápenaté, kaolin, těživec, křemelina.

Chemicky připravená plniva jsou: bezvodý kysličník křemičitý (pyrogenní), hydratovaný kysličník křemičitý, křemičitan vápenatý aj.

1.3.9 Změkčovadla

Při vyšším dávkování plniv do směsí dochází již v nevulkanizovanému stavu k takovému ztužení, že by zpracovatelnost byla velmi špatná. Z toho důvodu, kromě dalších, je třeba do směsi přidávat změkčovadla. Z hlediska tokových vlastností není rozhodující druh použitého změkčovadla, důležité je především jeho množství. Další důvody pro použití změkčovadel jsou: zlepšení disperze plniv a přísad, snížení teploty a spotřeby energie při míchání, úprava fyzikálních a mechanických vlastností pryže (tvrdosti, odrazové pružnosti, mrazuvzdornost a v neposlední řadě snížení ceny výrobků) [2].

Zhruba můžeme rozdělit změkčovadla do následujících skupin:

1. Produkty ropného původu (minerální oleje, parafin, asfalty, vosky),
2. produkty zpracování uhelných dehet (oleje, pryskyřice, smoly),

3. produkty zpracování dřeva (smrkový dehet, kalafuna),
4. syntetická změkčovadla (estery, kapalné polymery, pryskyřice),
5. látky rostlinného nebo živočišného původu (oleje, tuky, vosky).

Základní požadavky kladené na změkčovadla v gumárenském průmyslu jsou:

1. dobrá mísitelnost s kaučukem,
2. nízká viskozita a malá závislost viskozity na teplotě,
3. chemická a tepelná stabilita při zpracování směsí, nízká těkavost, nejedovatost, bez zápachu,
4. pokud možno nízká cena.

1.3.10 Maziva

Nejúčinnějšími mazivy jsou extrémně nepolární změkčovadla (parafín, Terezín, vazelína). Jejich přídavek do směsi má příznivý vliv na hladkost povrchu vytlačených profilů a válcovaných folií. Snižuje přilnavost k válcům, ale také konvekční lepivost. Protože jsou omezeně rozpustná v kaučuku (v NR asi do 2 %), při větším dávkování vystupují na povrch. Oblast, kdy se začne projevovat omezená rozpustnost těchto látek v kaučuku závisí především na polaritě polymeru a na ostatních přísadách. Parafín vystupující na povrch vulkanizátu vytváří souvislý film, který za statických podmínek chrání výrobek proti účinkům ozonu [2].

Jako mazivo se chová také stearín. Hlavní účel jeho použití je však jako součást aktivačního systému spolu se ZnO. Na rozdíl od nepolárních maziv napomáhá i dispergaci přísad. Kyselý charakter může při vyšším dávkování způsobovat mírné zpoždění vulkanizace.

1.3.11 Nadouvadla

Pro výrobu lehčené pryže (houbové a mechové) se používá různých druhů nadouvadel, což jsou látky, které se při vyšších teplotách v průběhu vulkanizace rozkládají za vzniku většího objemu plynů. Teplota rozkladu a objem plynů závisí především na druhu použitého nadouvadla. Teplotu rozkladu je možno dále ovlivnit přísadami, které působí jako aktivátory rozkladu nadouvadla. Kaučukové směsi musí mít vysokou plasticitu a určitý průběh vulkanizace, aby nadouvání proběhlo v požadovaném rozsahu.

1.3.12 Pomocné látky

Některé látky nejsou přímo složkami gumárenských směsí, ale při zpracování umožňují správný průběh technologických operací. Patří mezi ně především práškovala (separační činidla). Práškovala zabraňují slepování polotovarů při výrobě, manipulaci a skladování, zabraňují přilepení směsi k formě a umožňují unikání vzduchu mezi směsí a formu při zalisování.

Jako práškovala se uplatňují: křída, klouzek, kaolin, stearan zinečnatý, slída, škrob, grafit nebo i mletá pryž.

Jako separační činidla působí roztoky mýdel nebo saponátů ve vodě a emulze (např. silikonového oleje) ve vodě.

Mezi pomocné látky můžeme zařadit také rozpouštědla, kterých se používá k přípravě roztoků. Roztoků kaučukových směsí v organických rozpouštědlech se používá rovněž k výrobě pryžových nití, natírání textilu a výrobě máčeného zboží.

2 PRAKTICKÁ ČÁST

Elastomery jsou díky svým specifickým vlastnostem používány v mnoha oblastech. Jejich nenahraditelnost jde především vidět v oblasti tlumících a těsnících prvků. Pro jejich mechanické chování je charakteristická schopnost dosahovat velkých vratných deformací (až 700 %), přičemž závislost deformace na napětí vykazuje silně nelineární průběh (tzv. hyperelastická). Při dimenzování pryžových prvků se stále častěji ukazuje potřeba přesného popisu jejich nelineárního chování.

2.1 Cíl diplomové práce

Pro stanovení nelineárních materiálových konstant je nutno v materiálu dosáhnout co nejvíce možných módů namáhání. Nejčastěji se toho dosahuje v testech na jednoosý tah, dvouosý tah a tzv. čistý smyk. Cílem této práce je zjištění vlivu geometrie zkušební vzorku na přesnost výstupních dat při jednoosém a dvouosém namáhání. Dále pak určení charakteristiky závislosti napětí na poměrné deformaci, jejich popis a srovnání pro různé rozměry zkušebních vzorků.

Pro experimentální část byl použit jeden druh běžné směsi (ozn. S 1234) využívající se v gumárenském průmyslu k výrobě bočnic pneumatik.

2.2 Metody

Vzorky gumárenské směsi byly vyrobeny ve třech tloušťkách 1, 2 a 3 mm. Poté byly podrobeny jednoosému a dvouosému namáhání. Z výsledků obou druhů namáhání byly následně sestaveny grafické závislosti a vyhodnocovány mezi sebou. Vliv geometrie vzorku na přesnost výsledků byl posuzován dle hodnoty koeficientu determinace R^2 ($0 \div 1$). Čím více se koeficient blíží hodnotě 1, tím větší přesnosti výsledků bylo dosaženo.

2.2.1 Jednoosá napjatost

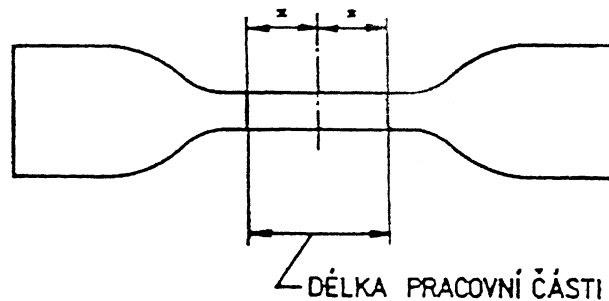
Podstata zkoušky

Zatěžovací tahová zkouška byla prováděna dle příslušné normy ČSN ISO 37 na trhacím stroji. Standardní zkušební tělesa tvaru oboustranných lopatek byla protahována v trhacím stroji konstantní rychlostí v upínacích čelistech. Odečítaly se hodnoty síly a prodloužení, potřebné k hodnocení požadovaných charakteristik protahovaných zkušebních těles v průběhu jejich bezporuchového protahování a v okamžiku přetržení. [1]

Zkušební tělesa

Jako zkušební tělesa bylo použito tři různých tloušťek (1, 2 a 3 mm) materiálů tvořených vulkanizovanou kaučukovou směsí. Každá tloušťka pryže byla zastoupena pěti zkušebními vzorky ve tvaru oboustranných lopatek. (obr. 5)

Standardní šířka zúžené části byla u všech vzorků 6 mm a délka pracovní části 25 mm. Ostatní rozměry lopatek jsou dány sekacím nožem typ 1 uvedeným v normě.



Obr. 5. Zkušební těleso tvaru oboustranné lopatky

Zkušební zařízení

Vysekávací a vyřezávací nože

Všechny vysekávací a vyřezávací nože odpovídaly ISO 4661-1. [1]

Tloušťkoměr

Přístroj pro měření tloušťky zkušebních těles tvaru oboustranných lopatek odpovídal požadavkům metody A v ISO 4648:1991. [1]

Trhací stroj

Trhací stroj vyhovoval požadavkům ISO 5893:1993. [1]

Počet zkušebních těles

Každá tloušťka materiálu byla zastoupena počtem pěti zkušebních těles.

Postup zkoušky

Přístrojem byla změřena tloušťka každého vzorku na třech místech, z čehož byla vyhodnocena průměrná tloušťka vzorku a vypočítaný obsah průřezu.

Zkušební těleso bylo vloženo do trhacího stroje tak, aby bylo zabezpečeno symetrické upnutí rovnoběžných částí lopatek a aby byl tah rozložen rovnoměrně na příčný průřez tělesa. Na zkušební těleso byl připevněn mechanismus průtahoměru. Poté byl spuštěn chod stroje a průběžně se zaznamenávaly změny pracovní délky zkušebního tělesa a síly po celou dobu zkoušky s přesností $\pm 2\%$, jak je požadováno pro účely vyhodnocení.

Jmenovitá rychlost příčnicku s pohyblivou upínací čelistí byla 500 mm/min. U žádného tělesa nedošlo k přetržení mimo pracovní část.

Zkušební teplota

Zkouška probíhala ve všech případech při laboratorní teplotě.

Zpracování naměřených dat

Naměřená data byla snímána počítačem. Příslušným programem byla graficky vyhodnocena závislost napětí na protažení pro každý materiál. Program dále změnil hodnoty napětí při poměrném protažení 50%, 100%, 200%, 300%, hodnoty pevnosti a tažnosti při přetržení a sloupce hodnot závislosti silového působení na protažení pro každý materiál. Tyto závislosti jsem přepočítal na hodnoty závislosti napětí na poměrné deformaci, dle rovnic:

$$\sigma = \frac{F}{s} [MPa], \quad (23)$$

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0}, \quad (24)$$

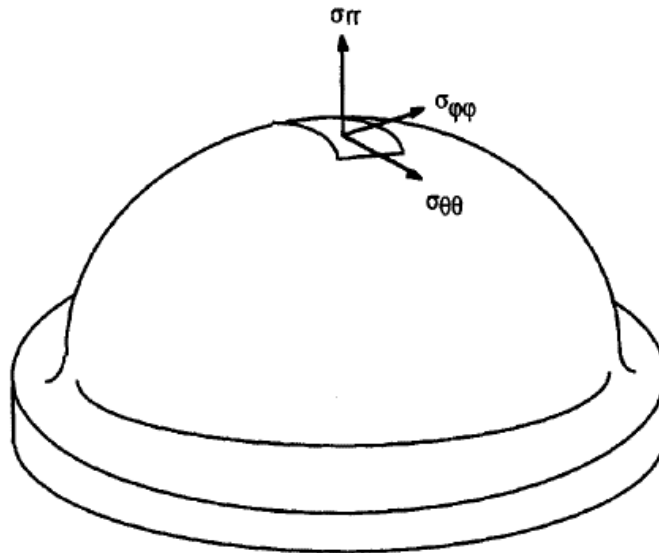
kde F je zatěžovací síla, s je plocha průřezu pracovní části, L je délka pracovní části tělesa při protažení a L_0 je délka pracovní části tělesa před deformací.

2.2.2 Dvouosá napjatost

Podstata zkoušky

Zkouška pro simulaci dvouosé napjatosti byla prováděna dle [17] obr. 6. Standardní zkušební tělesa pro tento druh namáhání jsou tvaru uvedeného na obr. 7. byla protahována ve dvou osách namáhání díky tlakovému vzduchu vháněnému pod zkušební těleso. Odečítaly se hodnoty tlaku dosaženého pod vzorkem a k němu příslušná délka a poloměr

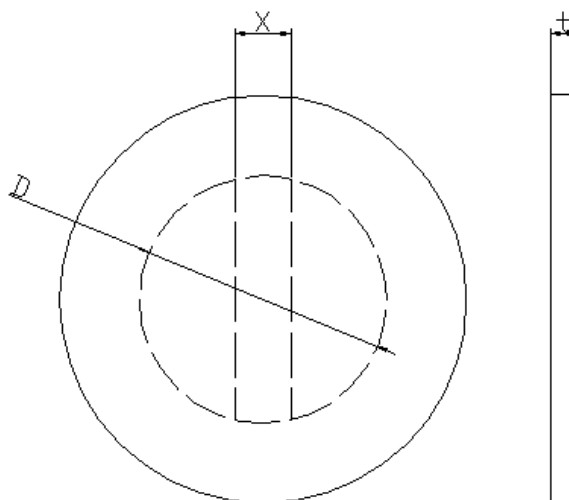
sledovaného fragmentu plochy promítnutého do roviny, ve které byl vzorek digitálně snímán. Z těchto hodnot byly následně vypočteny požadované charakteristiky zkušebních těles v průběhu jejich dvouosého protahování.



Obr. 6. Zkušební těleso kruhového tvaru při zkoušce

Zkušební tělesa

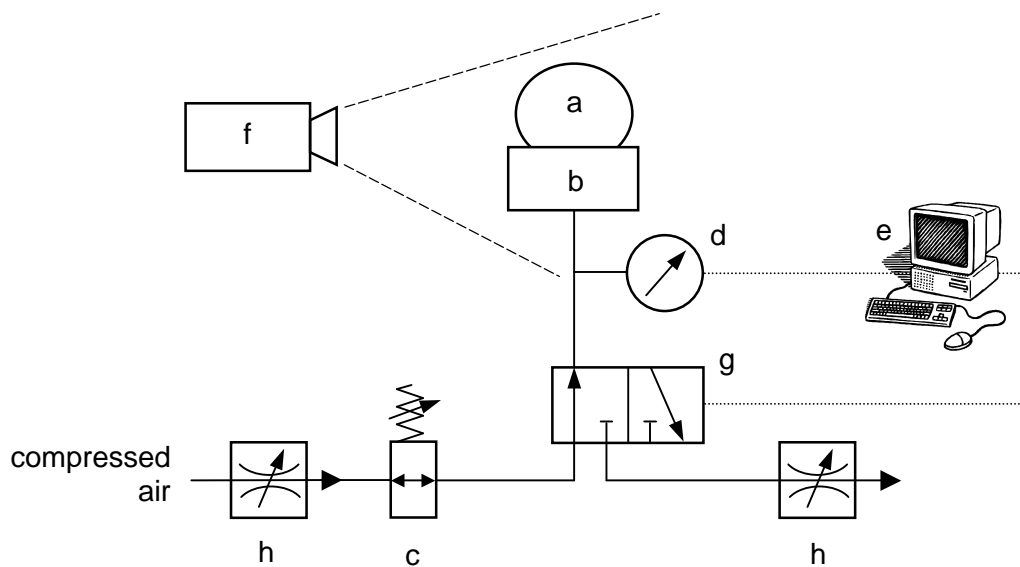
Jako zkušební tělesa bylo použito kruhových vzorků s orýsováním pro přesné zjištění deformace. (obr. 7) Tloušťka vzorků t byla 1, 2 a 3 mm. Průměr nafukované části D byl 40, 45 a 50 mm, velikost úseku pro zjištění deformace X byla 10 mm.



Obr. 7. Zkušební těleso kruhového tvaru s orýsováním (čárkovaně)

Zkušební zařízení

Je tvořeno zařízením pro úpravu stlačeného vzduchu, vstupním ventilem (h), regulátorem tlaku (c), přírubou pro uchycení vzorku (b), tlakoměrem (d) pro přesné určení dosaženého zatížení a digitálním snímáním (f) (v našem případě digitální fotoaparát s frekvencí snímání 2 /s).(obr. 8)



Obr. 8. Schéma zkušebního zařízení pro dvojosý tah

Pro následné vyhodnocení digitálních snímků je nutný PC a příslušný software.

Postup zkoušky

Zkušební tělesa byla vystřižena do požadovaného tvaru, který umožňoval snadné a dostatečně pevné upnutí na přístroj. na povrch zkušebních těles byl orýsován sledovaný úsek .

Zkušební těleso bylo vloženo do upínací příruby zařízení tak, aby bylo zabezpečeno symetrické upnutí dle orýsování a také správná orientace sledovaného úseku vzhledem k digitálnímu snímači. Poté byl spuštěn přívod stlačeného vzduchu, který postupně

nafukoval pryžový vzorek do tvaru bubliny. Na vstupu vzduchu do přípravku je umístěn manometr pro snímání hodnoty tlaku zatěžujícího vzorek. Aktuální hodnota tlaku byla odečítána z digitálního ukazatele. Změny rozměrů způsobené zvyšujícím se tlakem se zaznamenávaly na digitální fotoaparát. Vzorky byly zatěžovány až do porušení.

Zkušební teplota

Zkouška probíhala ve všech případech při laboratorní teplotě.

Zpracování naměřených dat

Naměřená data byla snímána digitálním fotoaparátem. Ze všech pořízených snímků bylo pro každý vzorek vybráno kolem 30, které rovnoměrně pokrývaly celý průběh testu. Z těchto byla poté zjišťována velikost prodloužení měřeného úseku (oblouku) a poloměr tohoto oblouku. Za pomoci příslušného software byla graficky vyhodnocena závislost napětí na protažení pro každý materiál.

$$\sigma = \frac{p \cdot r \cdot \lambda^2}{2t} [MPa], \quad (25)$$

$$\lambda = \frac{L}{L_0}, \quad (26)$$

kde p je tlak uvnitř vzorku, r je poloměr pracovní části, t je tloušťka zkušební vzorku, L je délka pracovní části tělesa při protažení a L_0 je délka pracovní části tělesa před deformací.

2.3 Příprava vzorků

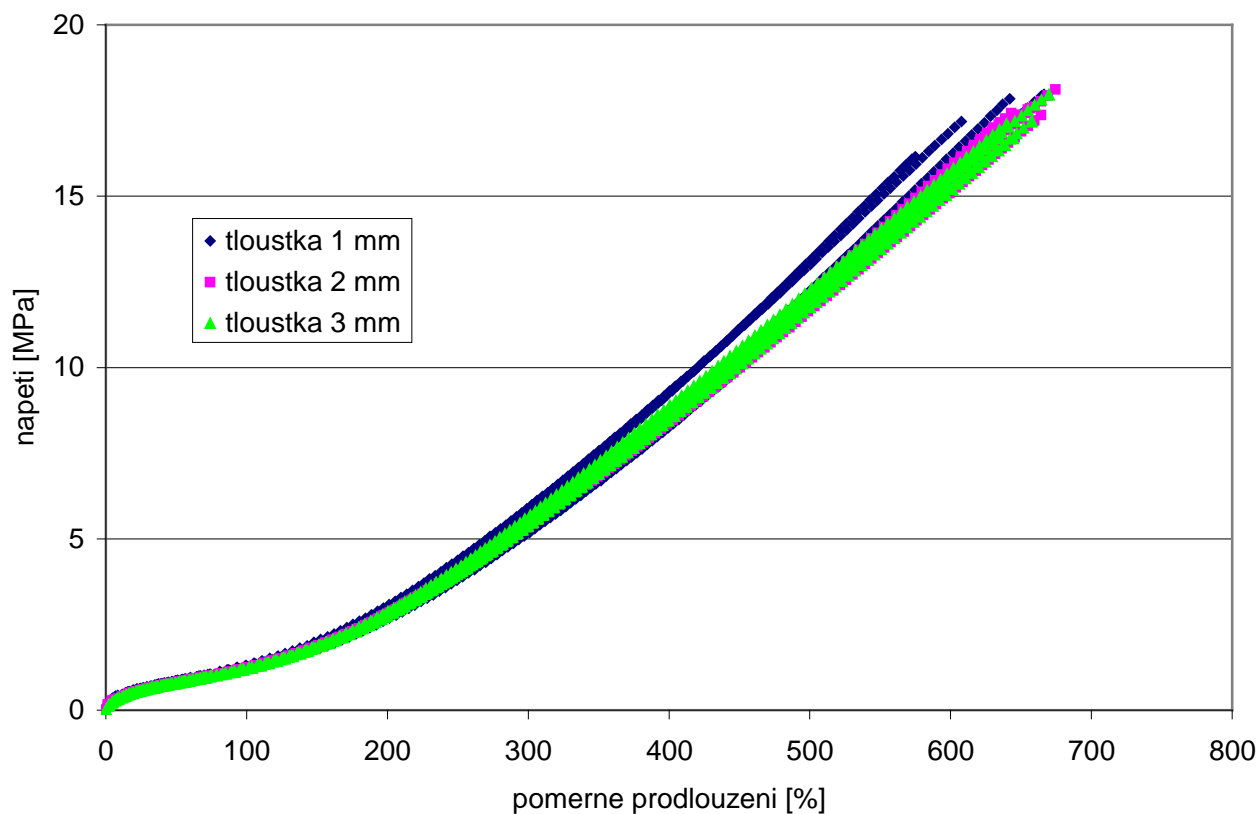
Směs byla získána ze skladů firmy Barum Continental v předpřipraveném stavu. Poté byla zpracována na dvouválcovém kalandru na požadované tloušťky 1,2; 2,2 a 3,2 mm kvůli

dobrému vyplnění formy pro normalizované vzorky (tloušťky 1, 2 a 3 mm). Dále bylo ze směsi oddělováno a navažováno vždy přesné množství, aby došlo k dokonalému vyplnění formy. Vzorky byly vulkanizovány při teplotě 170 °C po dobu 10 min. Z takto získaných polotovarů byly vysekávány (pro tahovou zkoušku) případně vystříhávány (pro dvouosý tah) normalizované vzorky.

2.4 Experiment (výsledky)

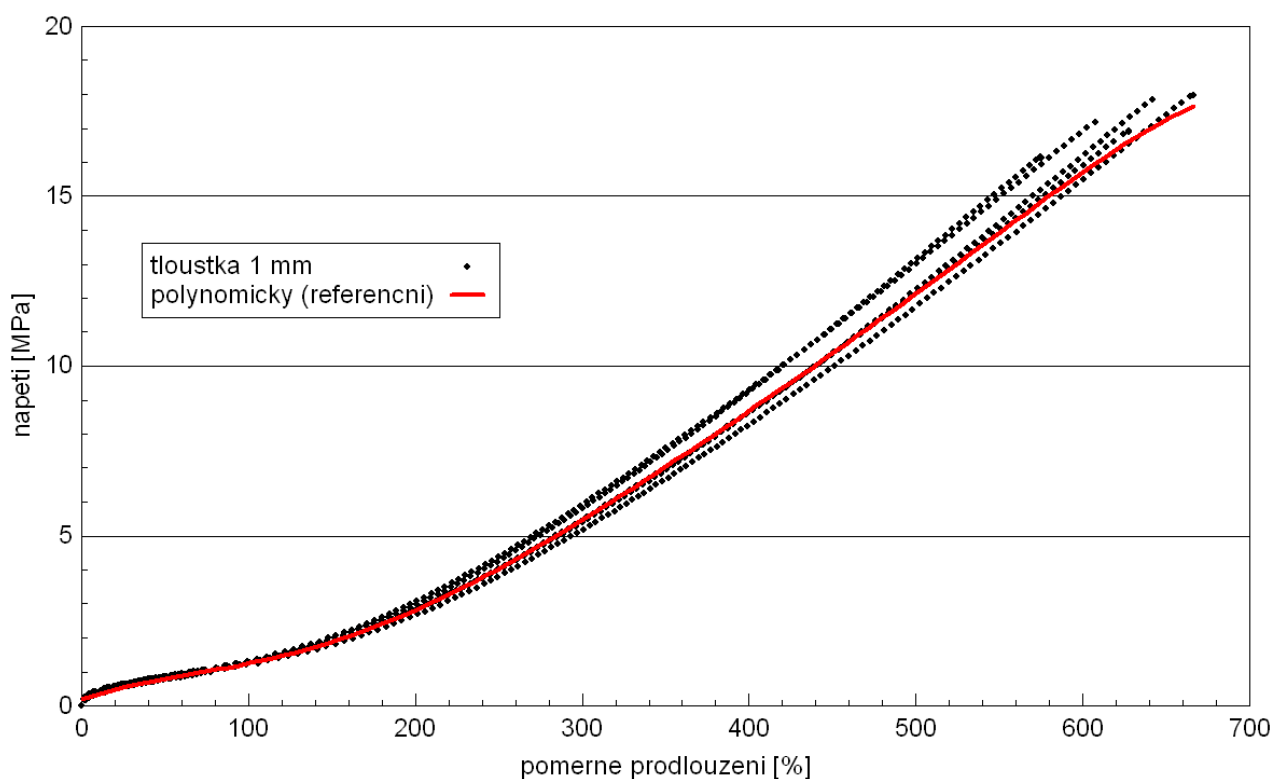
2.4.1 Jednoosý tah

Průběhy experimentální závislosti napětí na poměrné deformaci pro všechny vzorky všech tlouštěk materiálu jsou uvedeny na Obr. 9. Srovnání jednotlivých tlouštěk 1, 2 a 3 mm s referenční křivkou jsou uvedeny na Obr. 10. – 12. Referenční křivkou je v tomto případě průměrná polynomická hodnota, získaná z hodnot všech měřených vzorků. Konkrétní závislosti naměřené pro jednotlivé vzorky jsou uvedeny v příloze P1 – P3.



Obr. 9. Srovnání závislostí napětí na poměrné deformaci pro všechny tloušťky materiálu

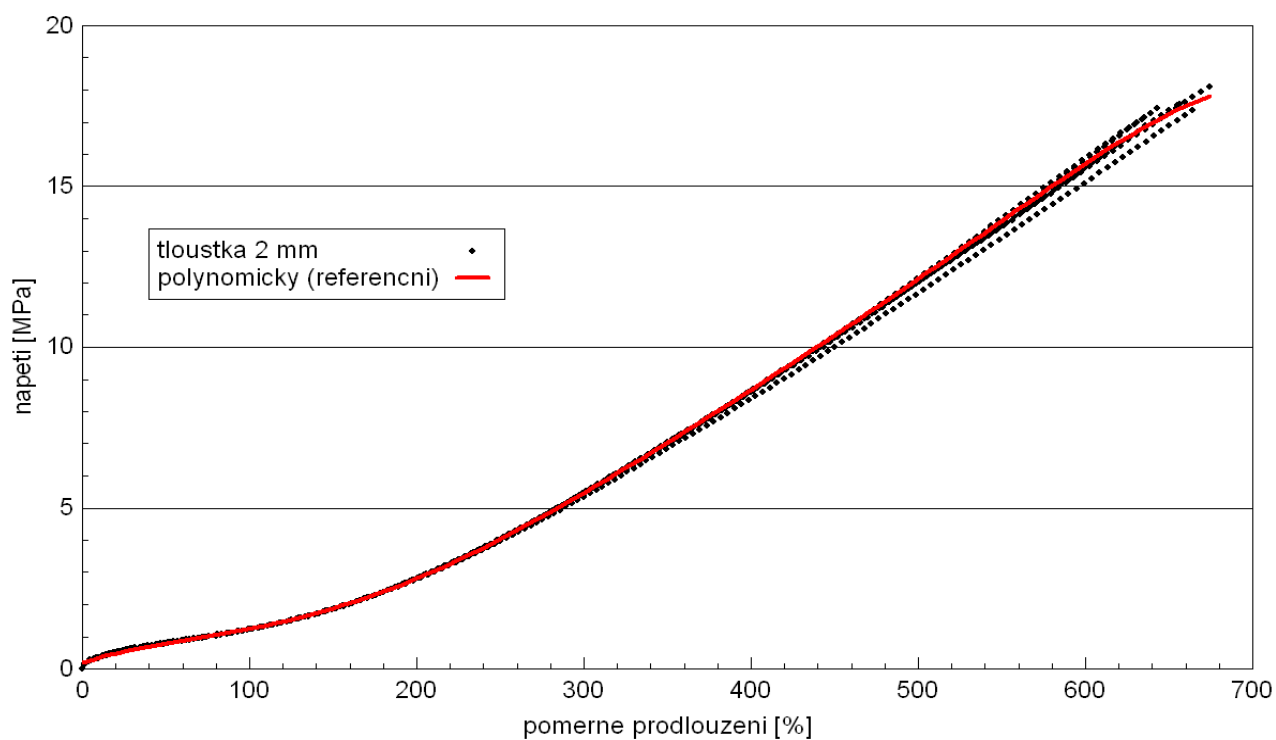
Za pomoci bodů byl vyhodnocen charakteristický průběh pro každý vzorek. Každá tloušťka materiálu byla zastoupena 5 vzorky. Srovnání těchto charakteristických průběhů je uvedeno na Obr. 9.



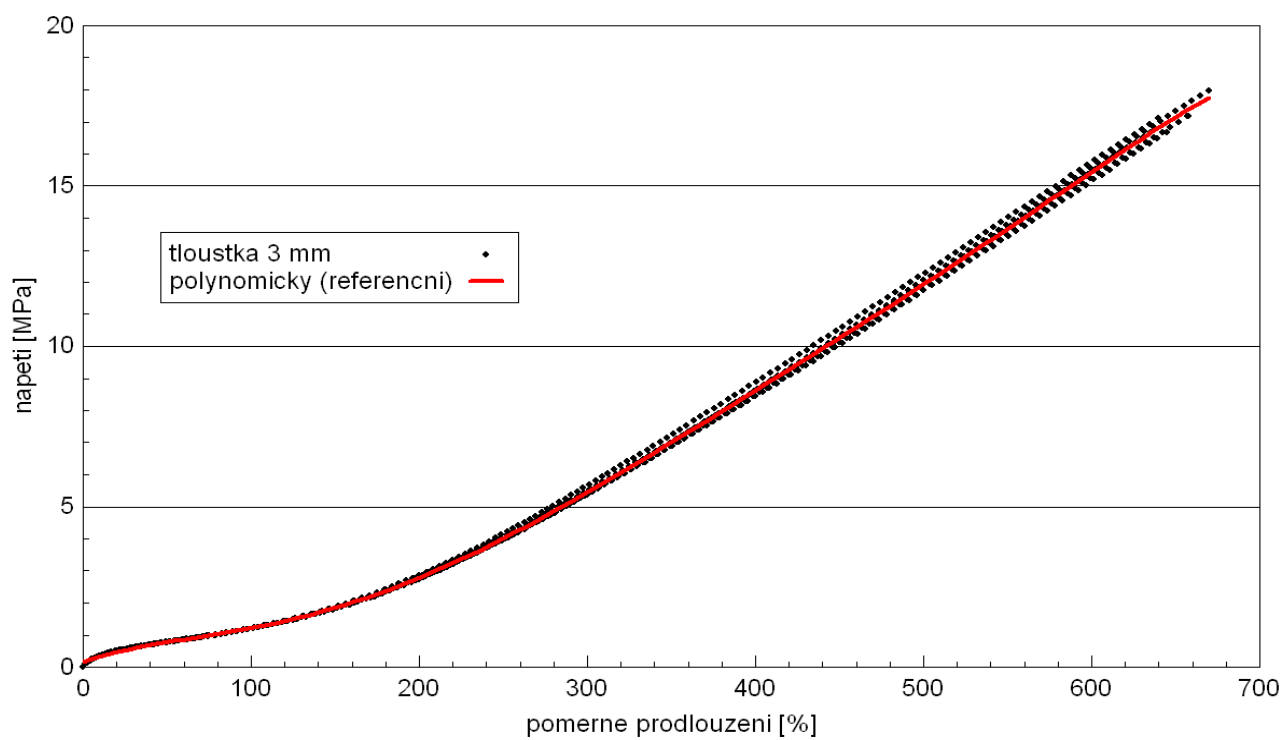
Obr. 10. Srovnání s referenční křivkou pro tloušťku materiálu 1 mm

Za pomoci bodů byl vyhodnocen charakteristický průběh pro vzorky o tloušťce 1 mm. Srovnání těchto charakteristických průběhů s referenční křivkou je uvedeno na Obr. 10.

Za pomoci bodů byl vyhodnocen charakteristický průběh pro vzorky o tloušťce 2 mm. Srovnání těchto charakteristických průběhů s referenční křivkou je uvedeno na Obr. 11.



Obr. 11. Srovnání s referenční křivkou pro tloušťku materiálu 2 mm



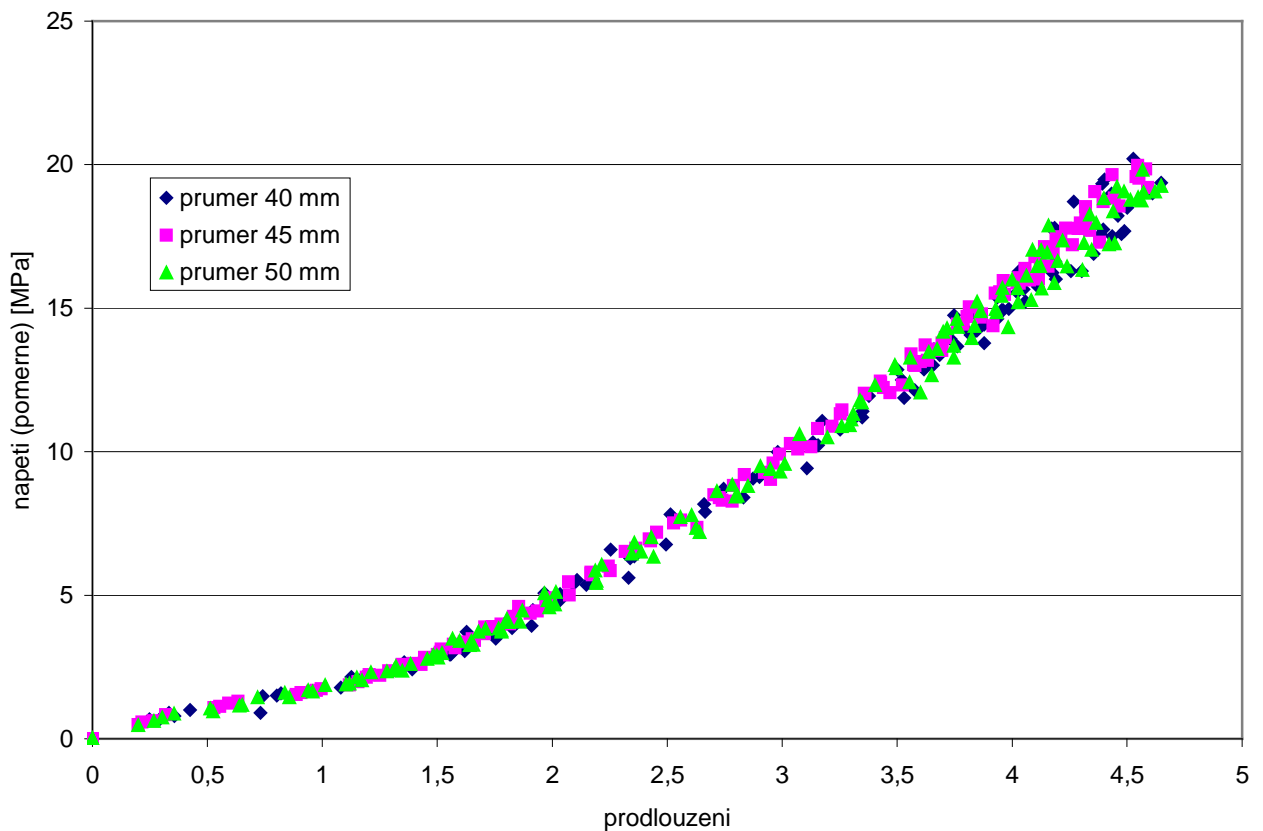
Obr. 12. Srovnání s referenční křivkou pro tloušťku materiálu 3 mm

Za pomoci bodů byl vyhodnocen charakteristický průběh pro vzorky o tloušťce 3 mm. Srovnání těchto charakteristických průběhů s referenční křivkou je uvedeno na Obr. 12.

2.4.2 Dvouosý tah

2.4.2.1 Vliv průměru nafukované části

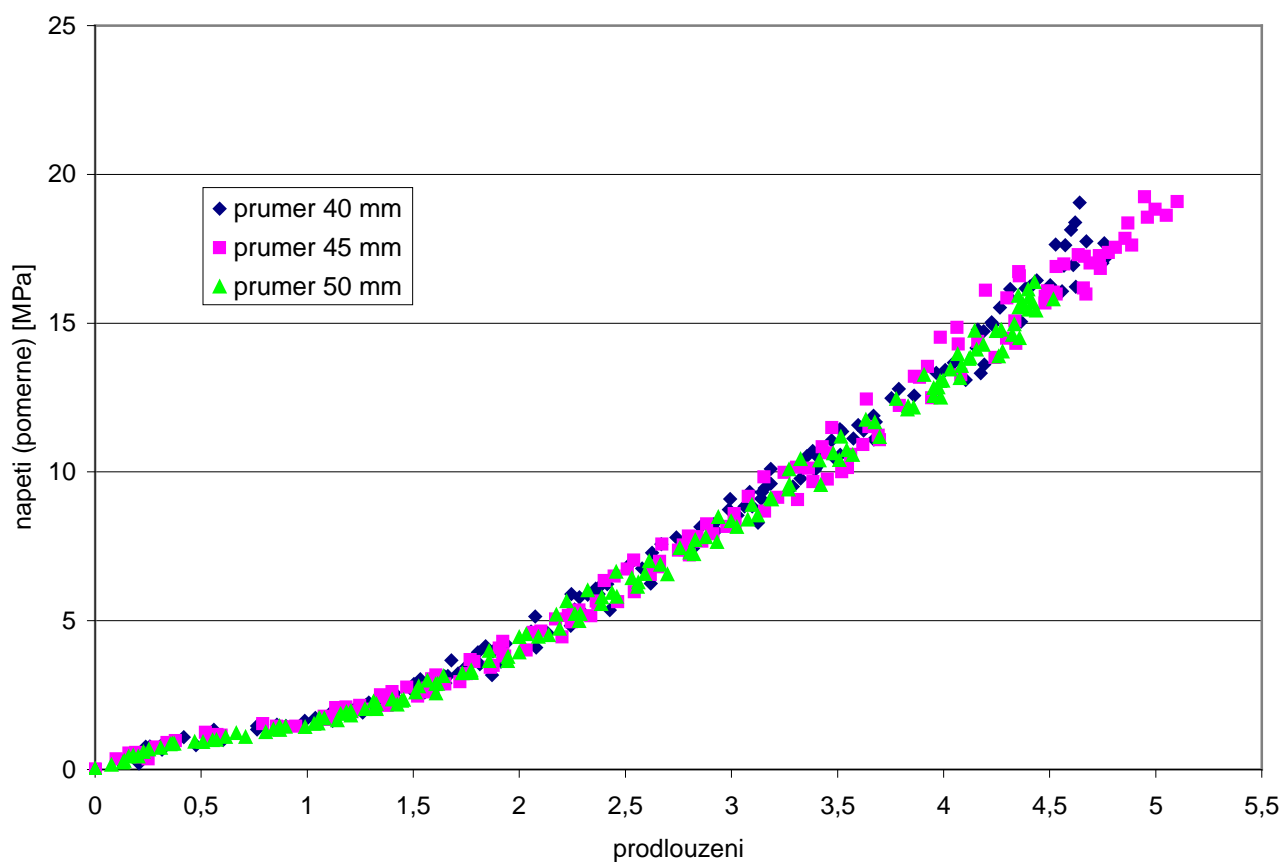
Průběhy experimentální závislosti napětí, vztaženého na aktuální průřez, na prodloužení pro jednotlivé průměry nafukované části vzorků jsou uvedeny na Obr. 13. – 18.



Obr. 13. Vliv průměru nafukované části vzorků (tloušťka materiálu 1 mm)

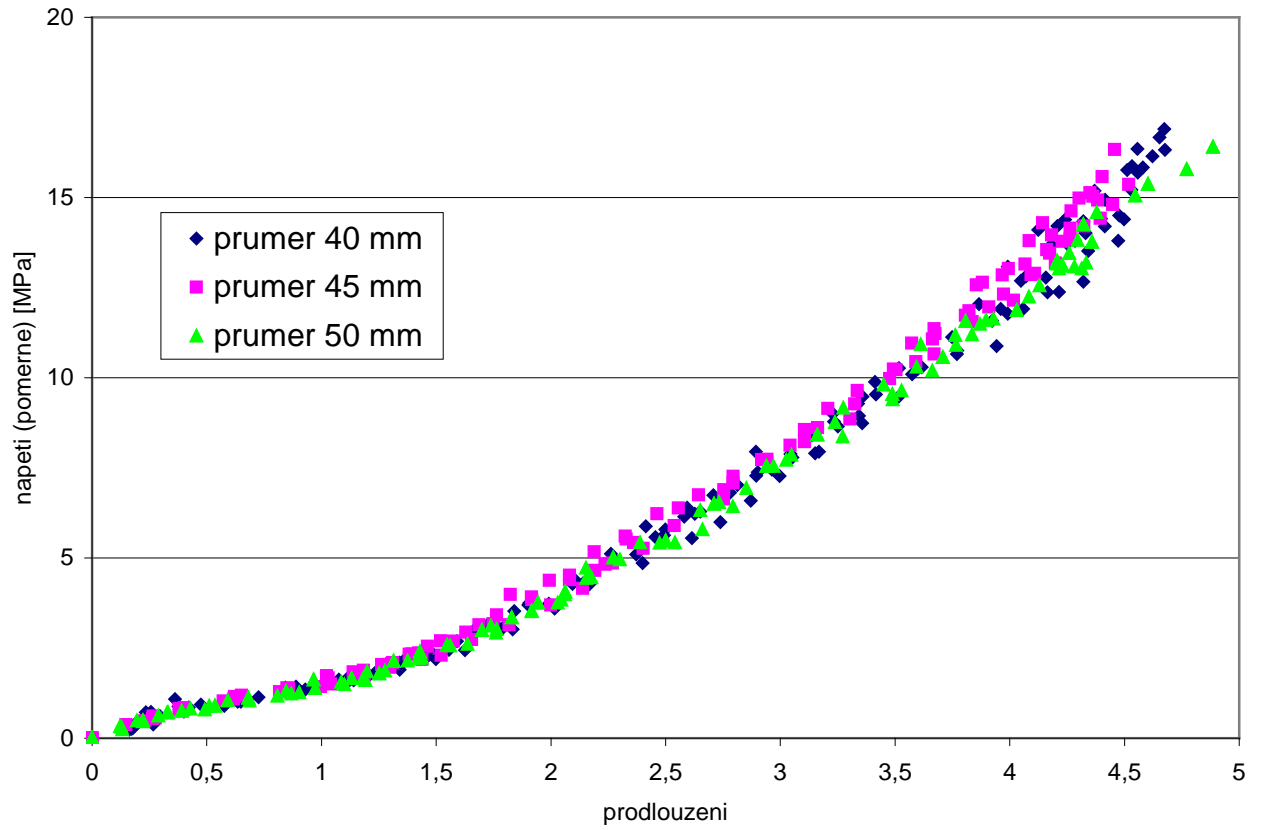
Za pomoci bodů byl vyhodnocen charakteristický průběh pro vzorky s jednotlivými průměry nafukované části. Tloušťka materiálu je 1 mm. Srovnání těchto charakteristických průběhů je uvedeno na Obr. 13.

Za pomoci bodů byl vyhodnocen charakteristický průběh pro vzorky s jednotlivými průměry nafukované části. Tloušťka materiálu je 2 mm. Srovnání těchto charakteristických průběhů je uvedeno na Obr. 14.

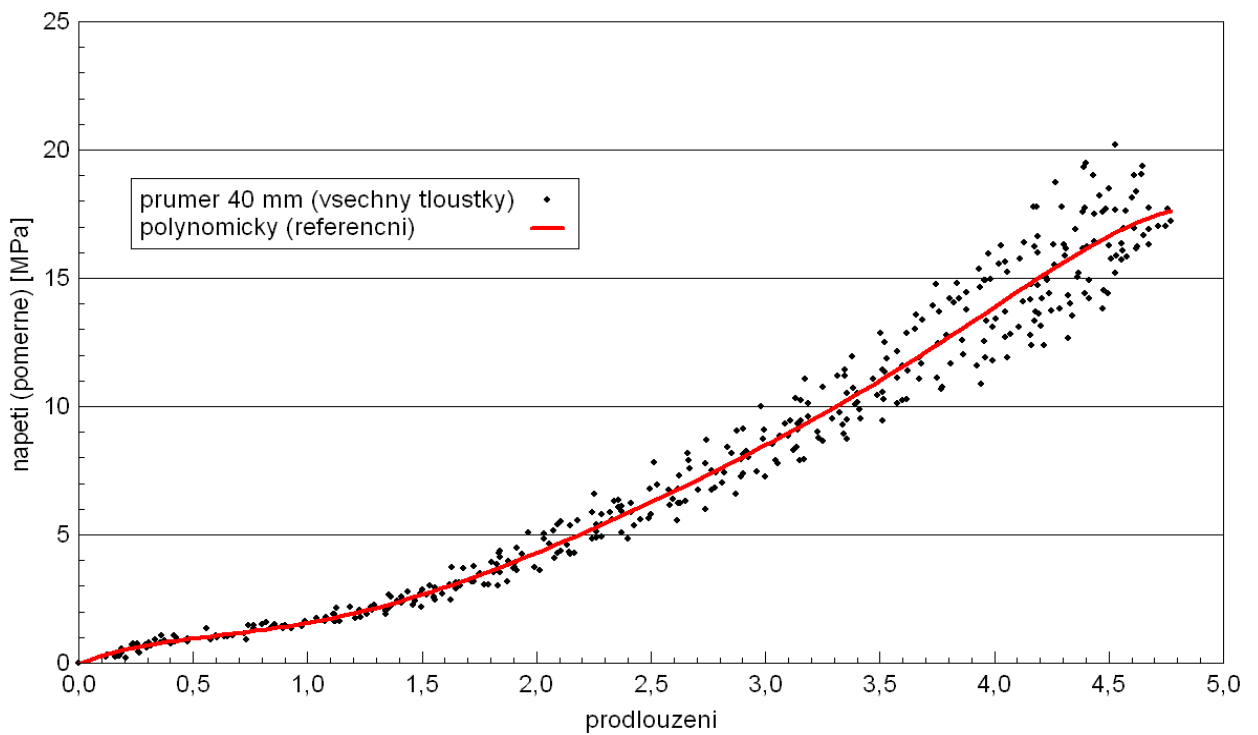


Obr. 14. Vliv průměru nafukované části vzorků (tloušťka materiálu 2 mm)

Za pomoci bodů byl vyhodnocen charakteristický průběh pro vzorky s jednotlivými průměry nafukované části. Tloušťka materiálu je 3 mm. Srovnání těchto charakteristických průběhů je uvedeno na Obr. 15.

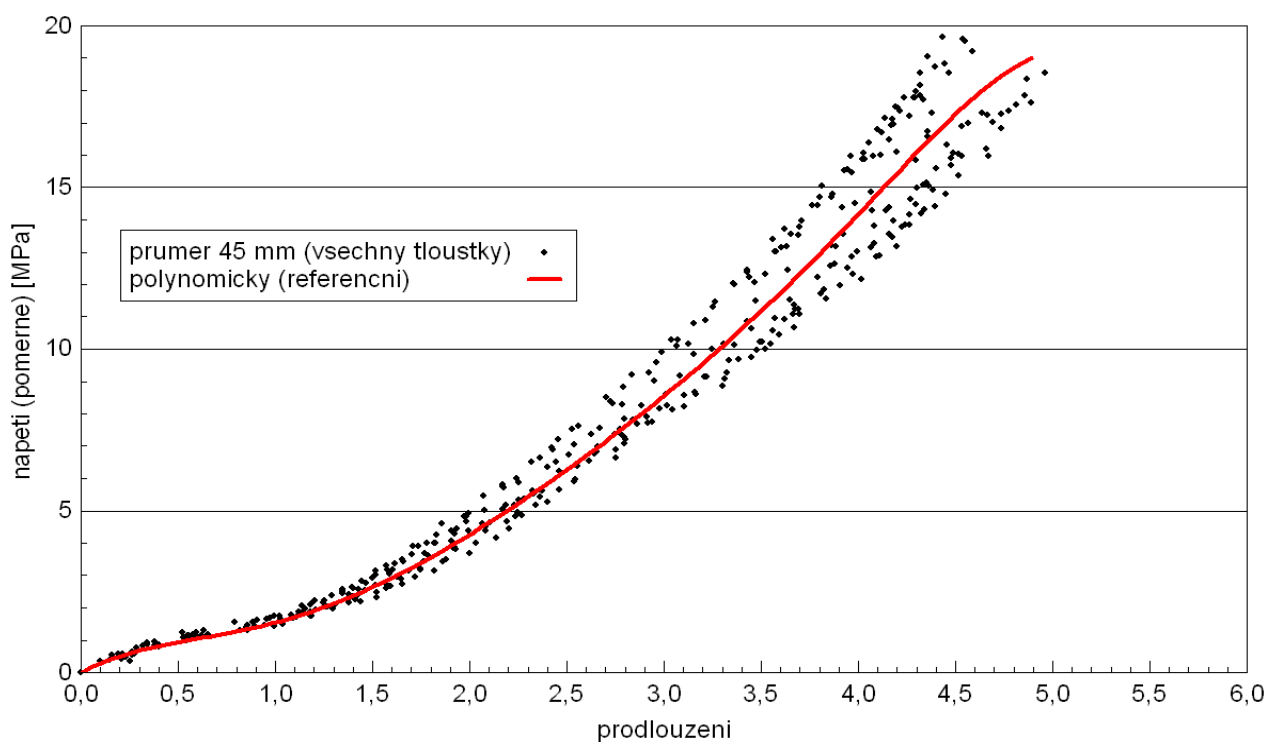


Obr. 15. Vliv průměru nafukované části vzorků (tloušťka materiálu 3 mm)



Obr. 16. Srovnání s referenční křivkou pro průměr nafukované části vzorku 40 mm

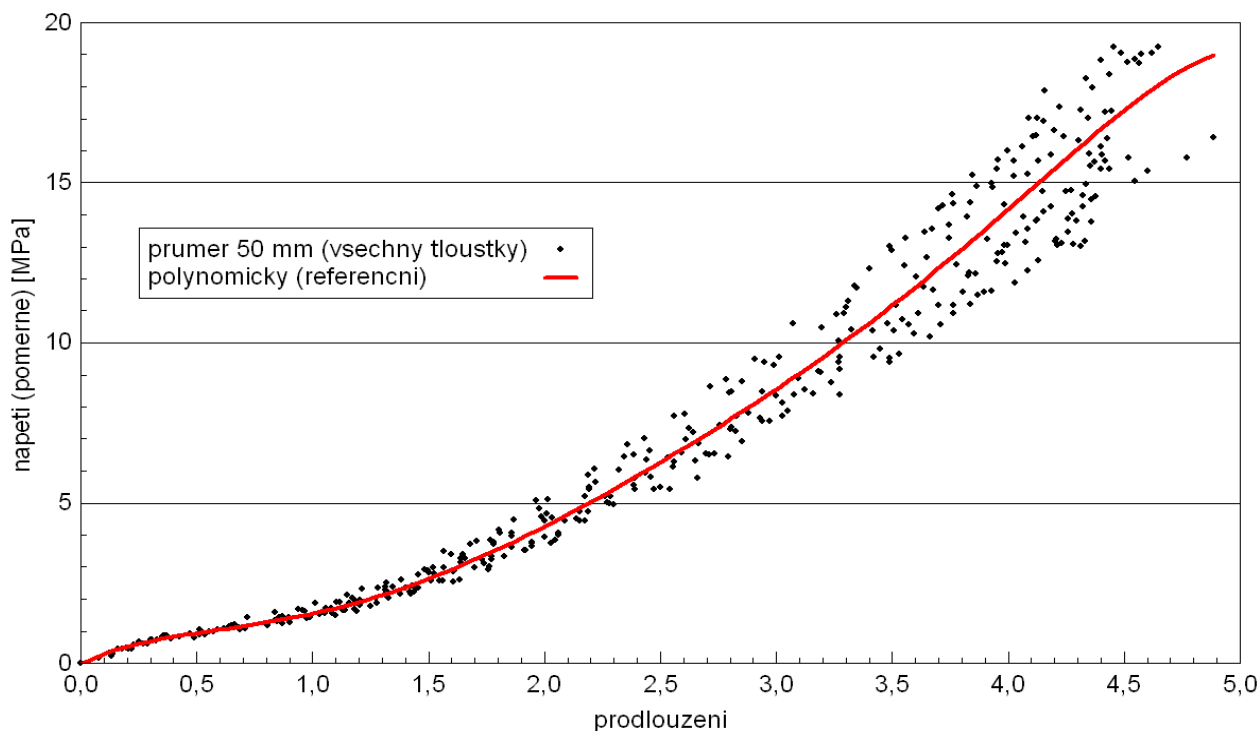
Za pomoci bodů byl vyhodnocen charakteristický průběh pro vzorky s průměrem nafukované části 40 mm. Byly použity všechny tři tloušťky materiálu. Srovnání těchto charakteristických průběhů s referenční křivkou je uvedeno na Obr. 16.



Obr. 17. Srovnání s referenční křivkou pro průměr nafukované části vzorku 45 mm

Za pomoci bodů byl vyhodnocen charakteristický průběh pro vzorky s průměrem nafukované části 45 mm. Byly použity všechny tři tloušťky materiálu. Srovnání těchto charakteristických průběhů s referenční křivkou je uvedeno na Obr. 17.

Za pomoci bodů byl vyhodnocen charakteristický průběh pro vzorky s průměrem nafukované části 50 mm. Byly použity všechny tři tloušťky materiálu. Srovnání těchto charakteristických průběhů s referenční křivkou je uvedeno na Obr. 18.

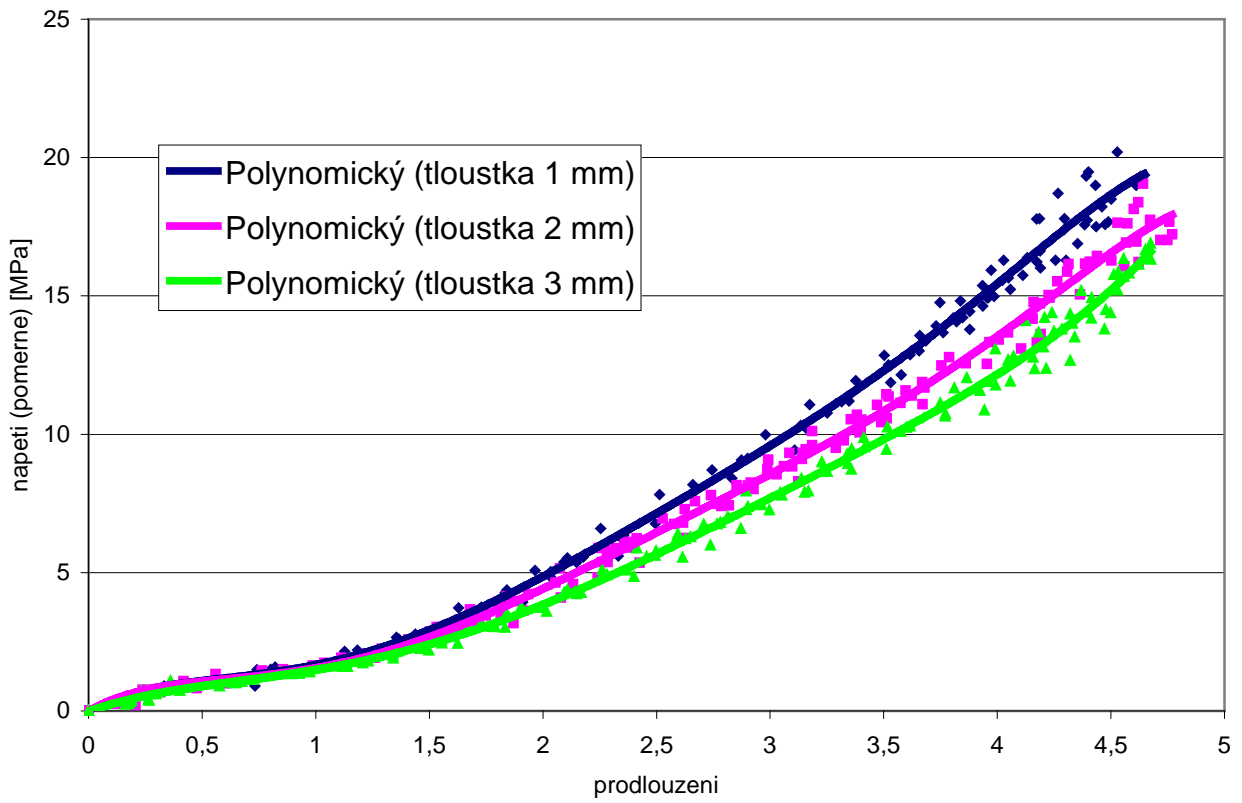


Obr. 18. Srovnání s referenční křivkou pro průměr nafukované části vzorku 50 mm

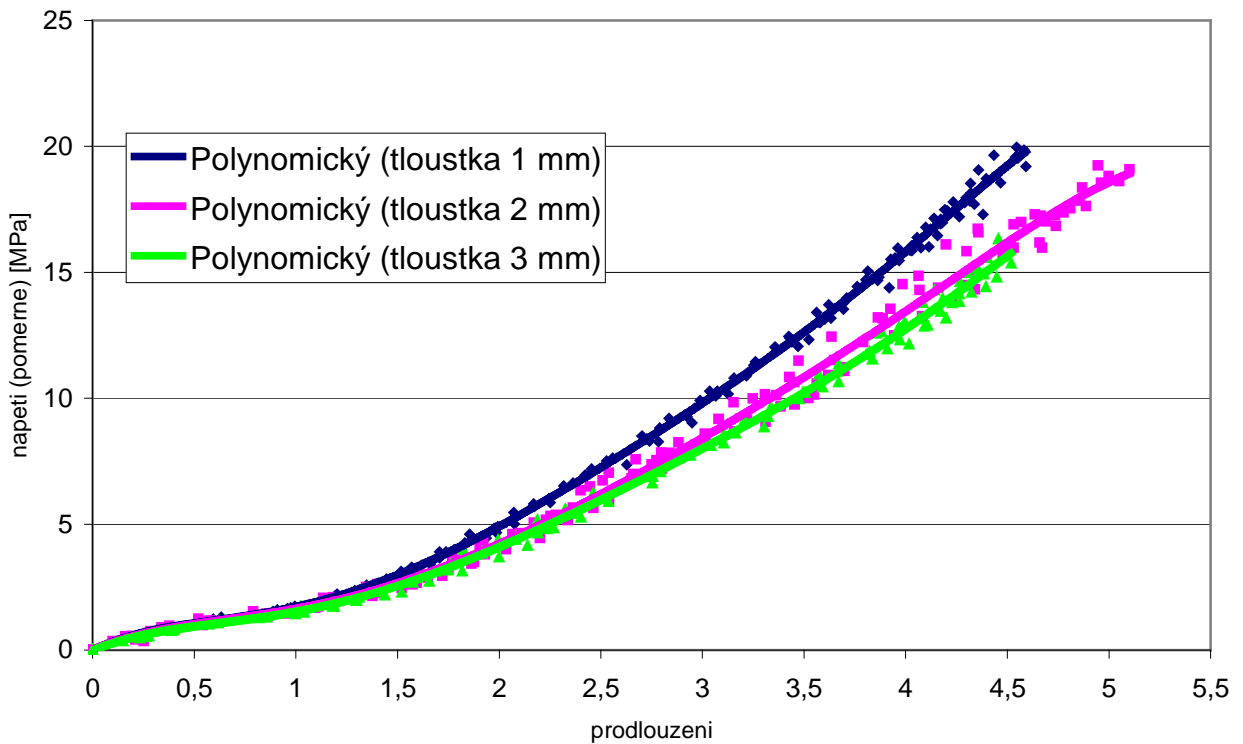
2.4.2.2 Vliv tloušťky materiálu

Průběhy experimentální závislosti napětí, vztaženého na aktuální průřez, na prodloužení pro jednotlivé tloušťky materiálu nafukovaných vzorků jsou uvedeny na Obr. 19. – 33. Další závislosti jsou uvedeny jako příloha P4 – P12.

Za pomoci regresních křivek byl vyhodnocen charakteristický průběh pro vzorky s jednotlivými tloušťkami materiálu. Průměr nafukované části vzorku je 40 mm. Srovnání těchto charakteristických průběhů je uvedeno na Obr. 19.



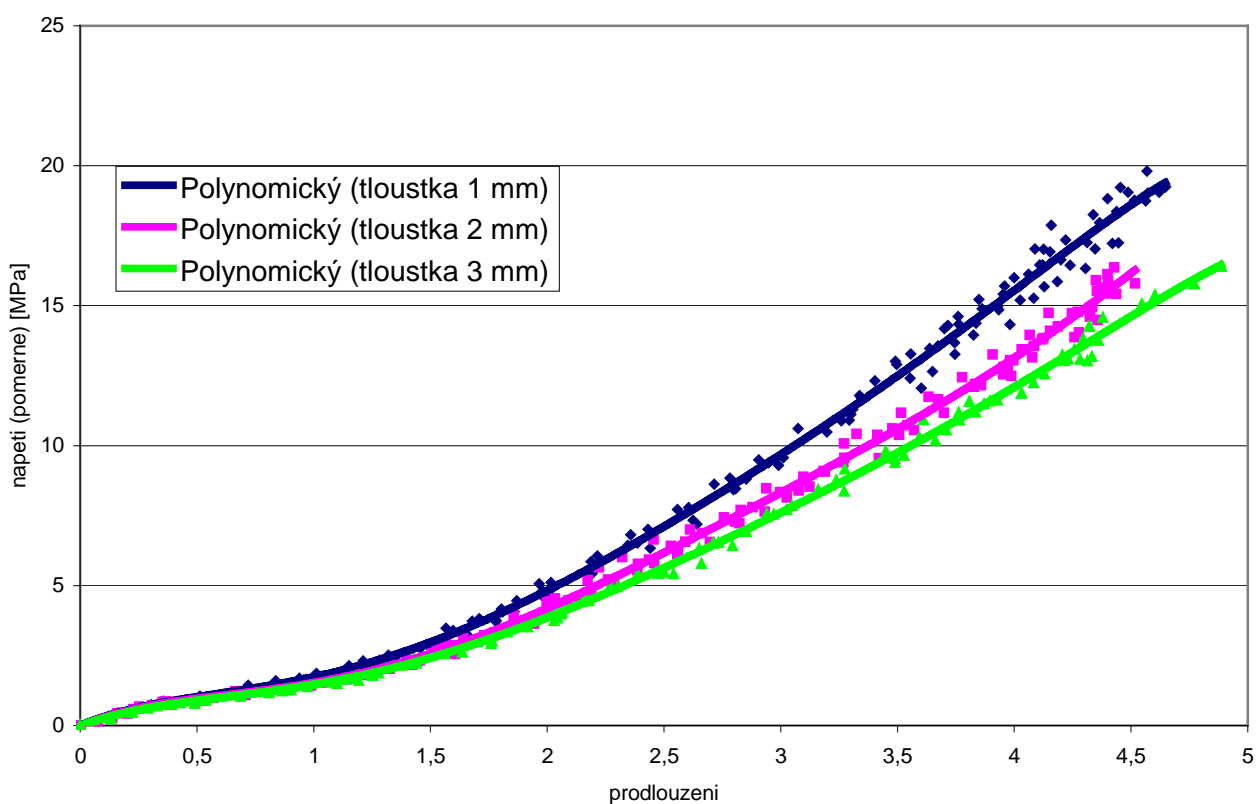
Obr. 19. Vliv tloušťky materiálu (průměr nafukované části vzorku 40 mm)



Obr. 20. Vliv tloušťky materiálu (průměr nafukované části vzorku 45 mm)

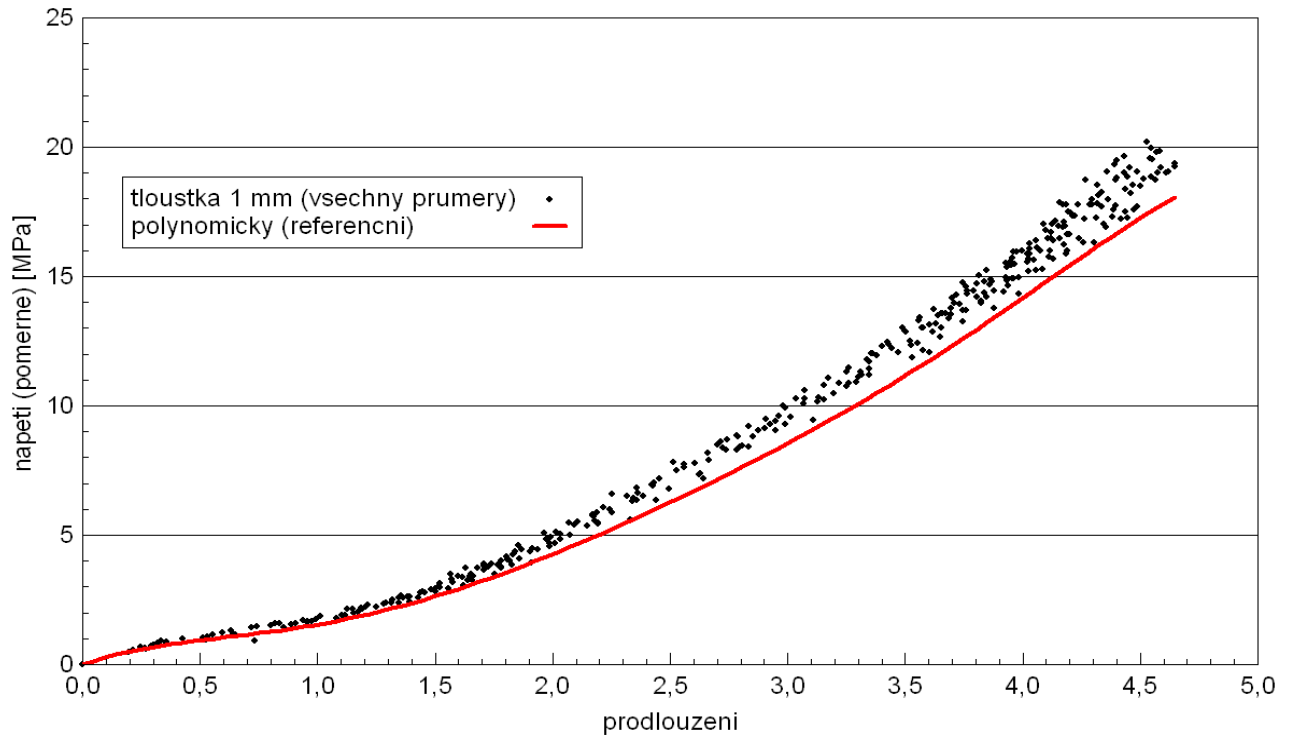
Za pomoci regresních křivek byl vyhodnocen charakteristický průběh pro vzorky s jednotlivými tloušťkami materiálu. Průměr nafukované části vzorku je 45 mm. Srovnání těchto charakteristických průběhů je uvedeno na Obr. 20.

Za pomoci regresních křivek byl vyhodnocen charakteristický průběh pro vzorky s jednotlivými tloušťkami materiálu. Průměr nafukované části vzorku je 50 mm. Srovnání těchto charakteristických průběhů je uvedeno na Obr. 21.

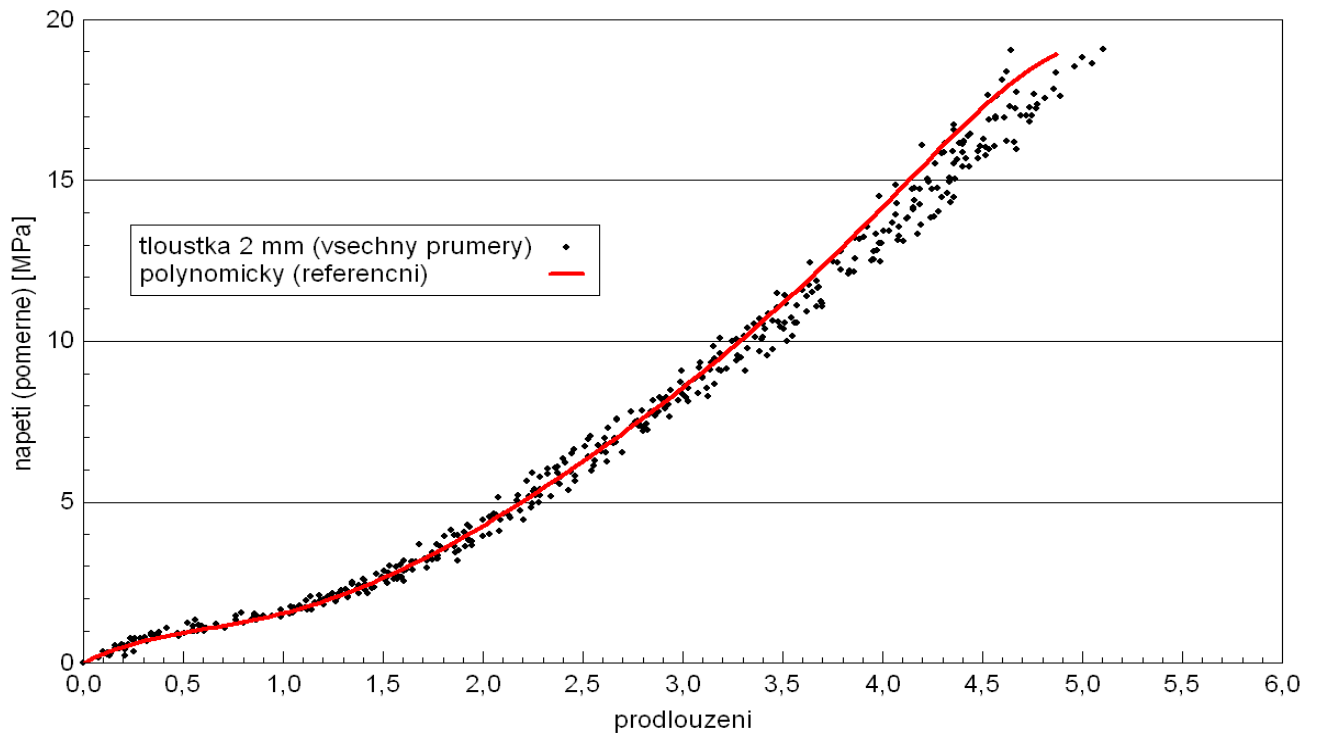


Obr. 21. Vliv tloušťky materiálu (průměr nafukované části vzorku 50 mm)

Za pomoci bodů byl vyhodnocen charakteristický průběh pro vzorky s tloušťkou materiálu 1 mm. Byly použity všechny tři průměry nafukované části vzorků. Srovnání těchto charakteristických průběhů s referenční křivkou je uvedeno na Obr. 22.



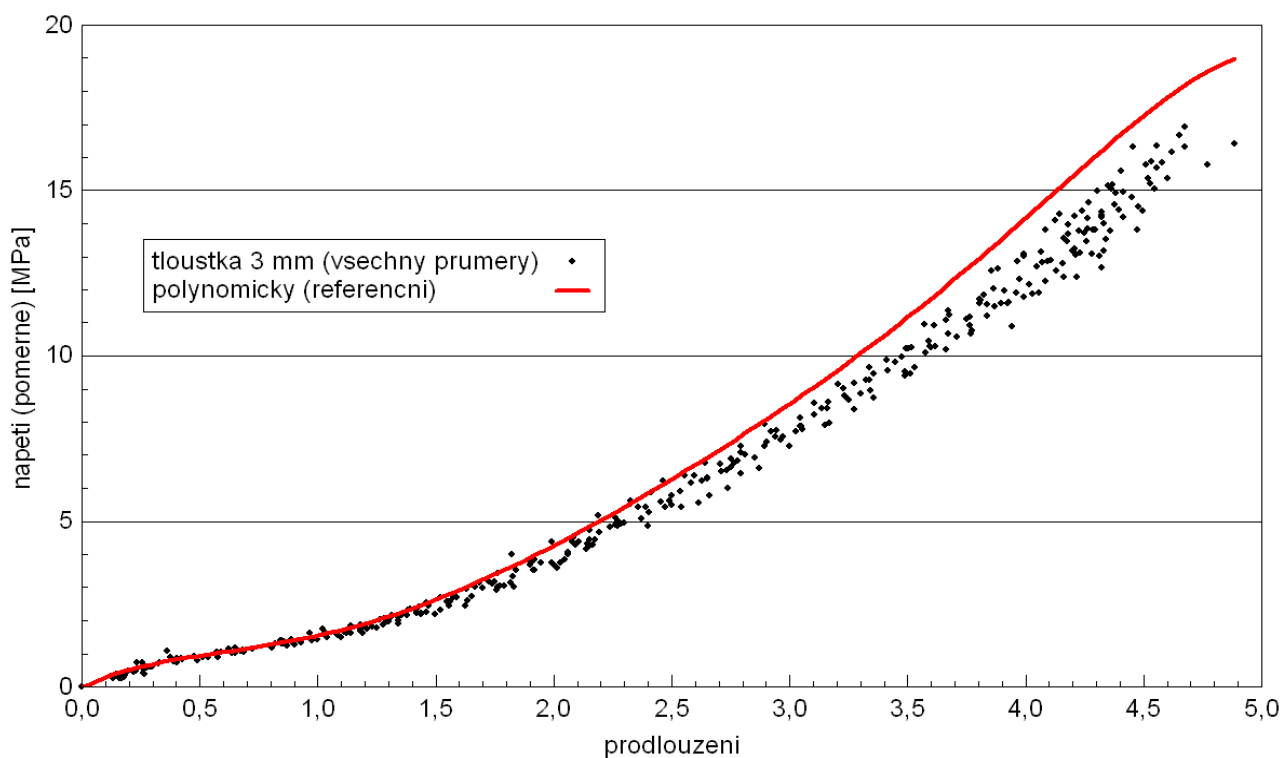
Obr. 22. Srovnání s referenční křivkou pro tloušťku materiálu 1 mm (všechny průměry)



Obr. 23. Srovnání s referenční křivkou pro tloušťku materiálu 2 mm (všechny průměry)

Za pomoci bodů byl vyhodnocen charakteristický průběh pro vzorky s tloušťkou materiálu 2 mm. Byly použity všechny tři průměry nafukované části vzorků. Srovnání těchto charakteristických průběhů s referenční křivkou je uvedeno na Obr. 23.

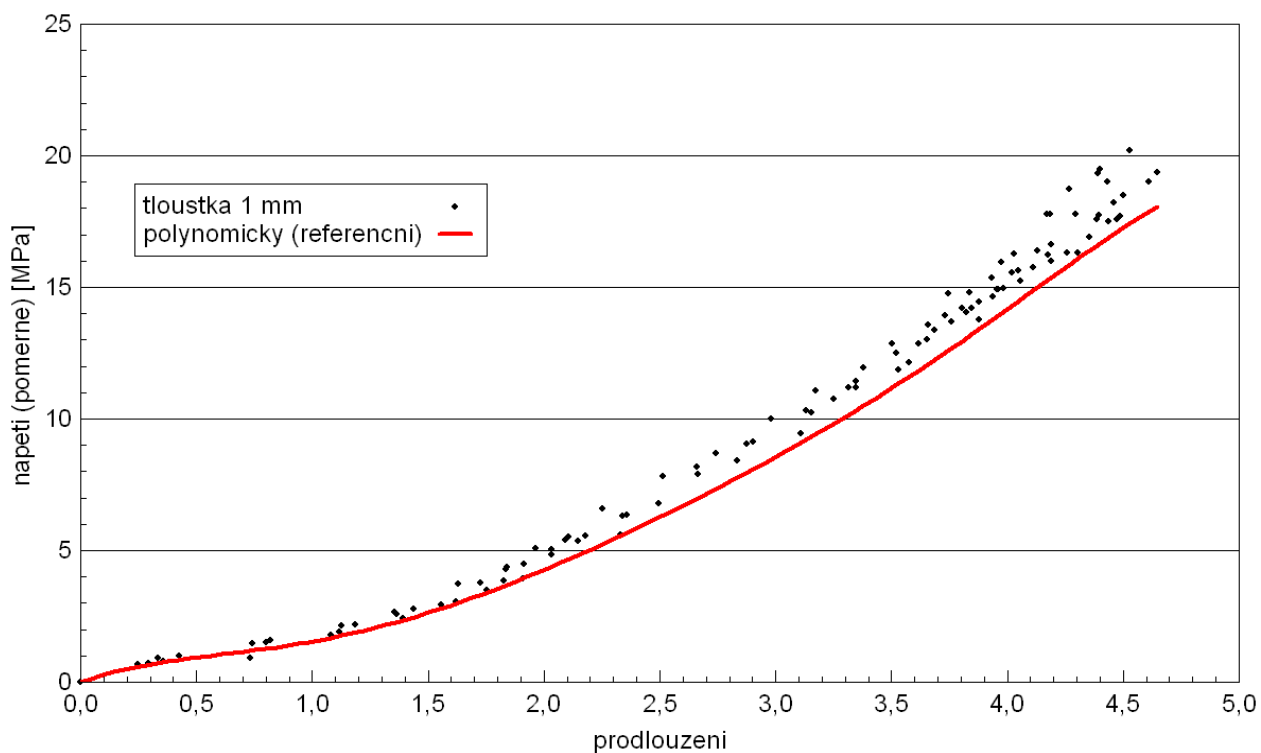
Za pomoci bodů byl vyhodnocen charakteristický průběh pro vzorky s tloušťkou materiálu 3 mm. Byly použity všechny tři průměry nafukované části vzorků. Srovnání těchto charakteristických průběhů s referenční křivkou je uvedeno na Obr. 24.



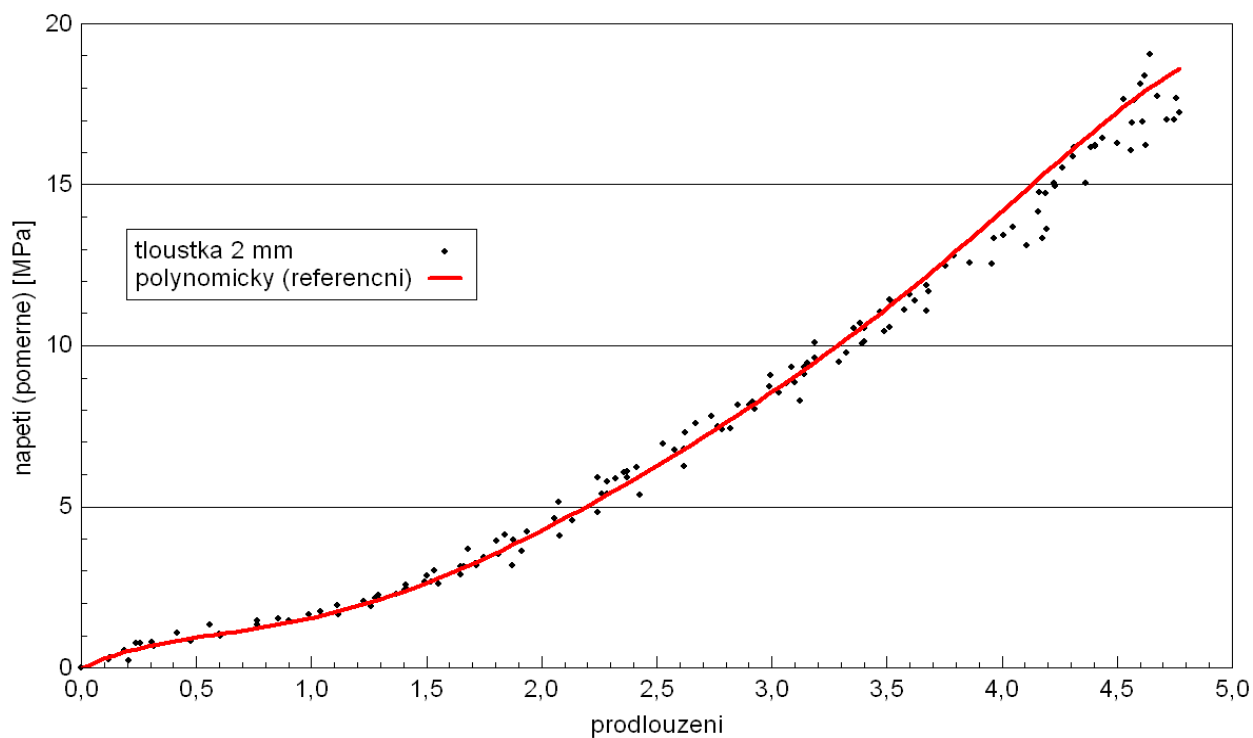
Obr. 24. Srovnání s referenční křivkou pro tloušťku materiálu 3 mm (všechny průměry)

V další části bude následovat postupné porovnání tlouštěk materiálu po jednotlivých průměrech nafukované části vzorků.

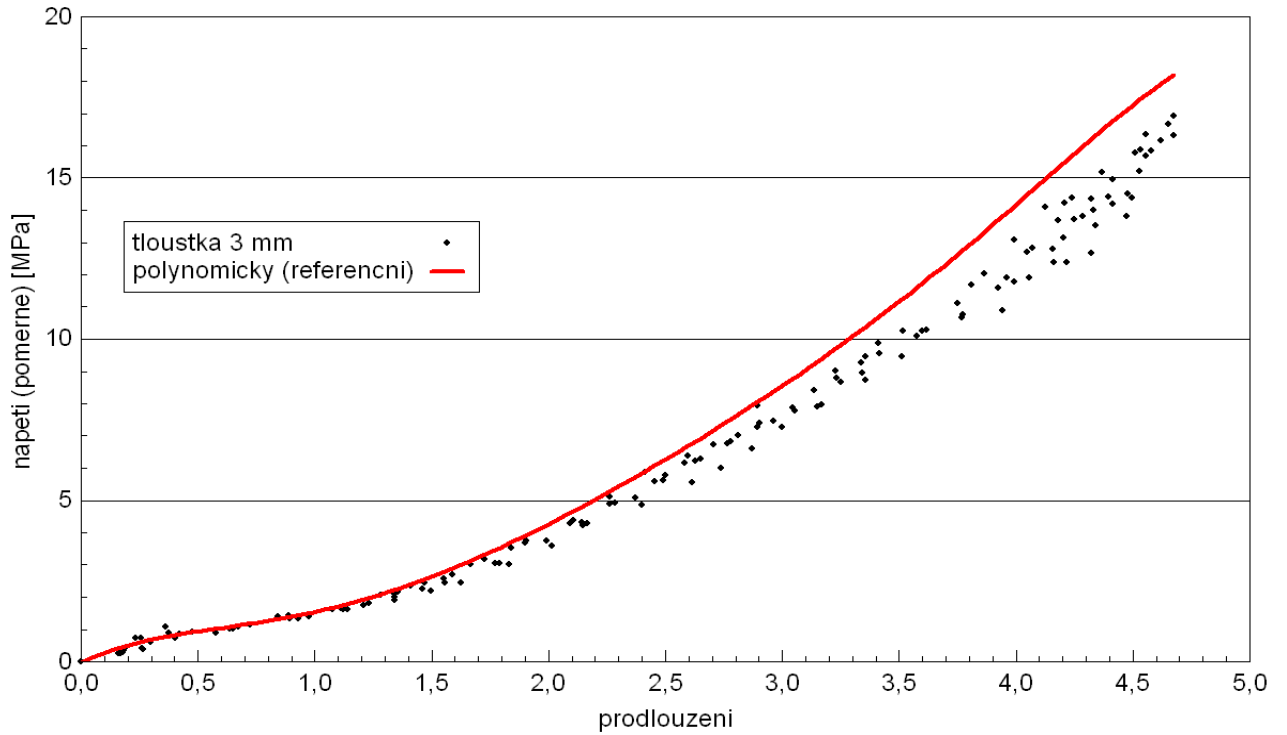
Za pomoci bodů byl vyhodnocen charakteristický průběh pro vzorky s tloušťkou materiálu 1, 2 a 3 mm. Průměr nafukované části je 40 mm. Srovnání těchto charakteristických průběhů s referenční křivkou je uvedeno na Obr. 25. – 27.



Obr. 25. Srovnání s referenční křivkou pro tloušťku materiálu 1 mm (průměr 40 mm)

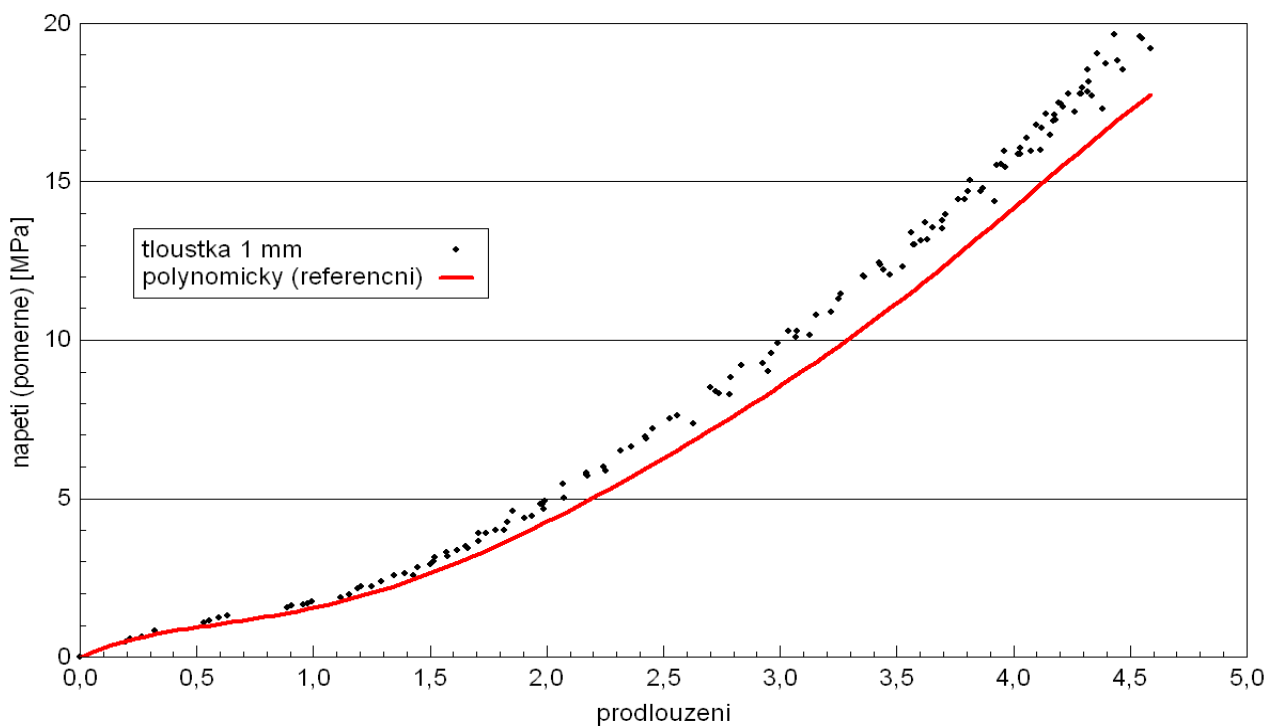


Obr. 26. Srovnání s referenční křivkou pro tloušťku materiálu 2 mm (průměr 40 mm)

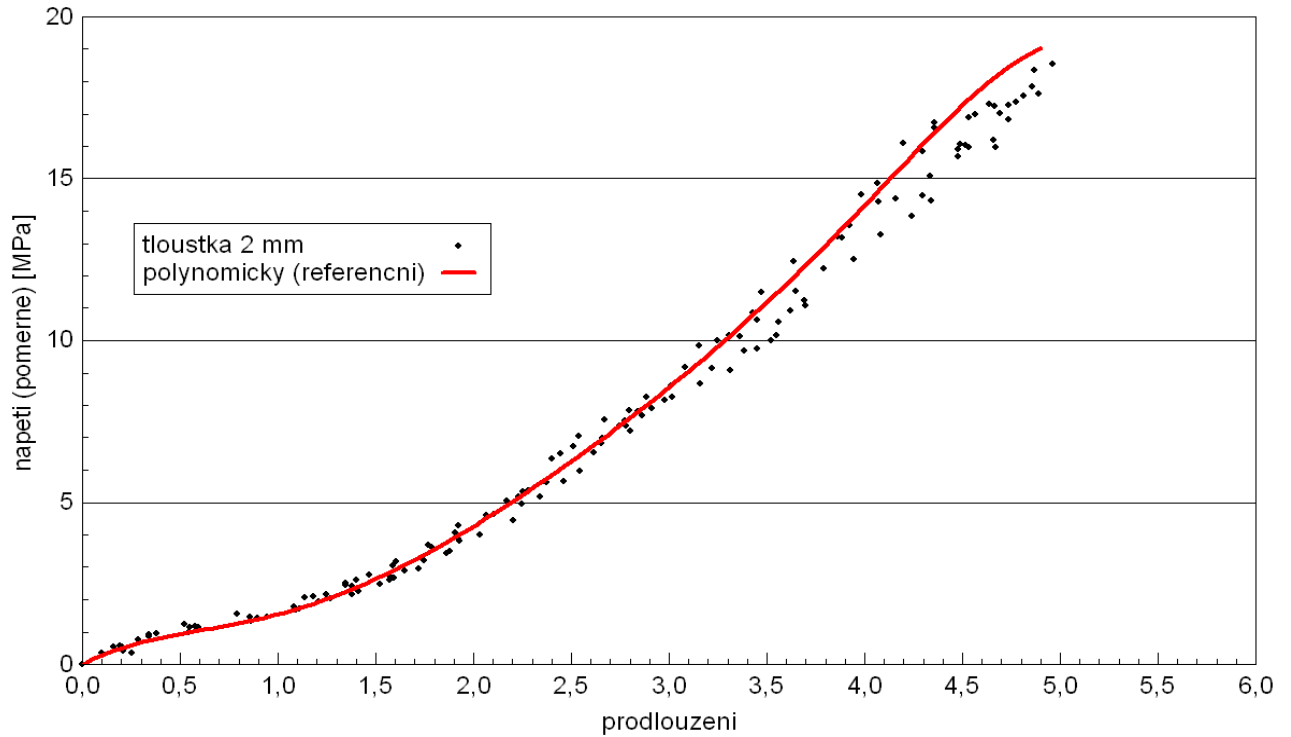


Obr. 27. Srovnání s referenční křivkou pro tloušťku materiálu 3 mm (průměr 40 mm)

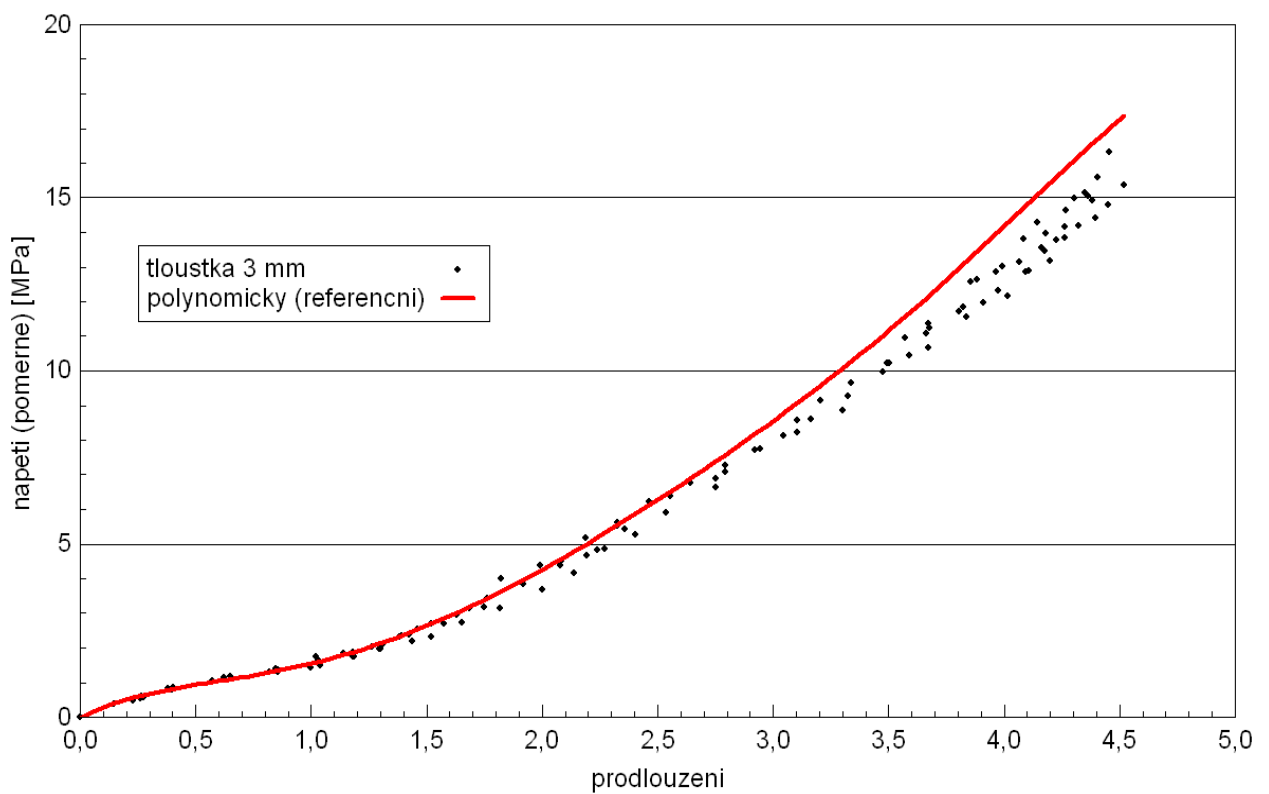
Za pomoci bodů byl vyhodnocen charakteristický průběh pro vzorky s tloušťkou materiálu 1, 2 a 3 mm. Průměr nafukované části je 45 mm. Srovnání těchto charakteristických průběhů s referenční křivkou je uvedeno na Obr. 28. – 30.



Obr. 28. Srovnání s referenční křivkou pro tloušťku materiálu 1 mm (průměr 45 mm)

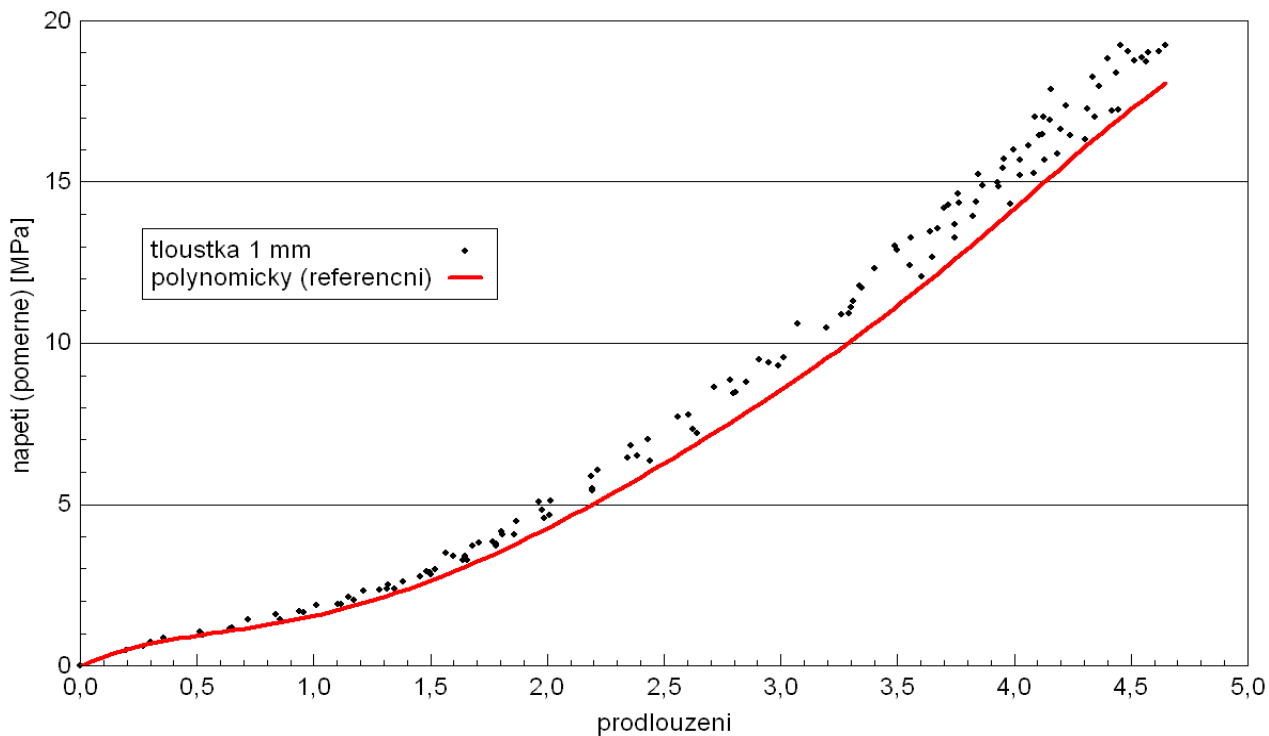


Obr. 29. Srovnání s referenční křivkou pro tloušťku materiálu 2 mm (průměr 45 mm)

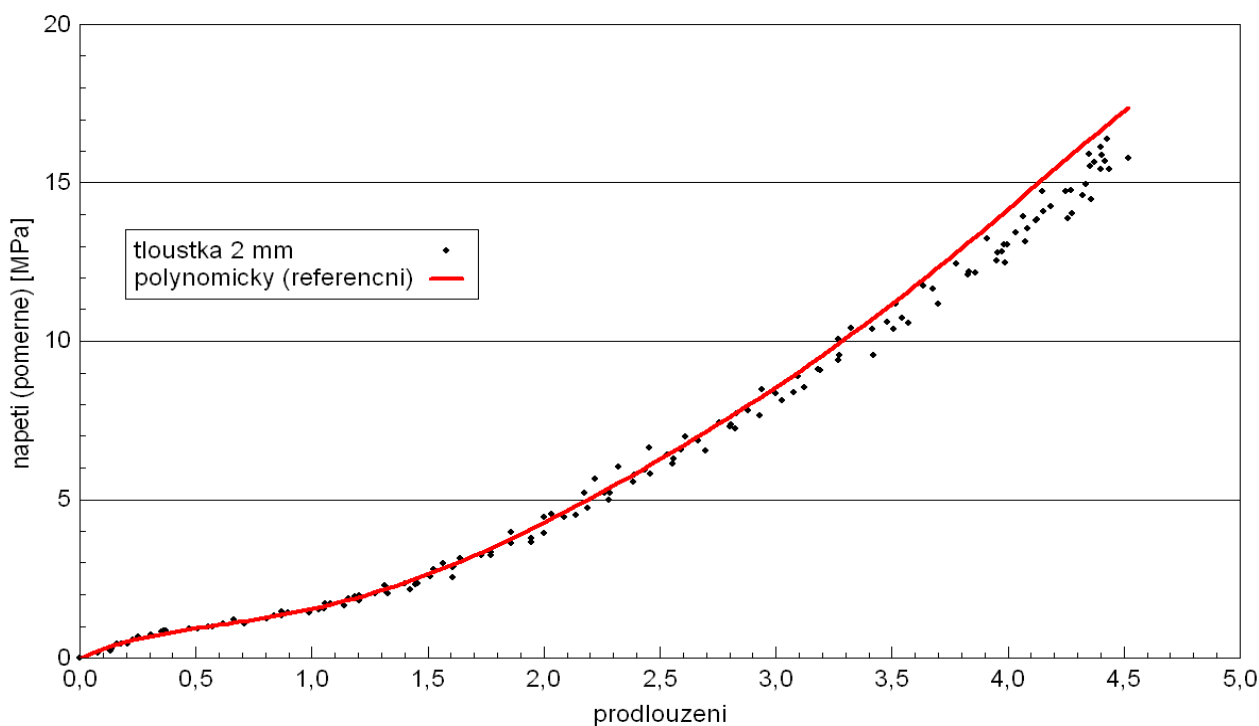


Obr. 30. Srovnání s referenční křivkou pro tloušťku materiálu 3 mm (průměr 45 mm)

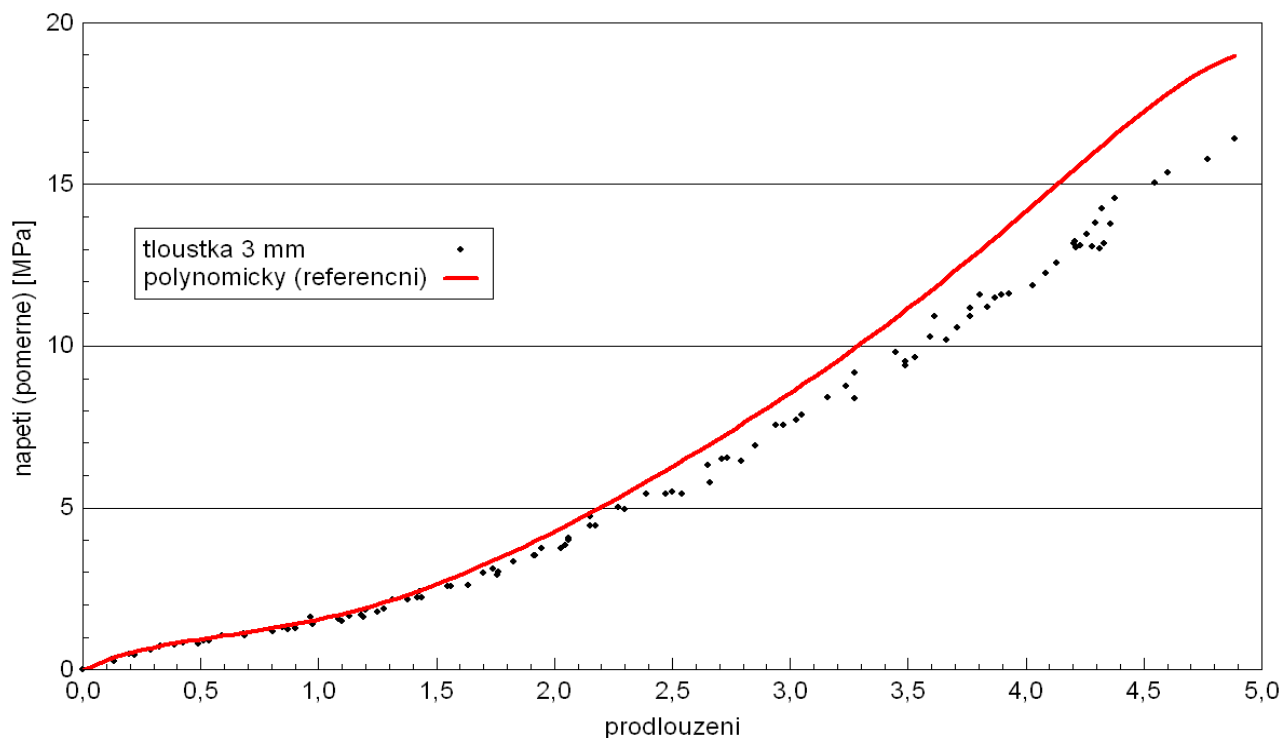
Za pomoci bodů byl vyhodnocen charakteristický průběh pro vzorky s tloušťkou materiálu 1, 2 a 3 mm. Průměr nafukované části je 50 mm. Srovnání těchto charakteristických průběhů s referenční křivkou je uvedeno na Obr. 31. – 33.



Obr. 31. Srovnání s referenční křivkou pro tloušťku materiálu 1 mm (průměr 50 mm)



Obr. 32. Srovnání s referenční křivkou pro tloušťku materiálu 2 mm (průměr 50 mm)



Obr. 33. Srovnání s referenční křivkou pro tloušťku materiálu 3 mm (průměr 50 mm)

2.5 Vyhodnocení výsledků (diskuze)

2.5.1 Jednoosý tah

Už z letmého pohledu na Obr. 9. je patrné, že vliv tloušťky materiálu na výsledky jednoosé tahové zkoušky je minimální. Tuto skutečnost potvrzují Obr. 10. – 12. v nichž byly jednotlivé tloušťky srovnány s referenční křivkou. Referenční křivkou je v tomto případě průměrná polynomická hodnota, získaná z hodnot všech měřených vzorků. Polynomická rovnice referenční křivky je $Y = -1,91191 \cdot 10^{-15} \cdot x^6 + 0,399929 \cdot 10^{-12} \cdot x^5 - 3,22898 \cdot 10^{-9} \cdot x^4 + 1,20869 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 - 1,65702 \cdot 10^{-4} \cdot x^2 + 0,01799 \cdot x + 0,18121$.

Výsledky porovnání na základě koeficientu determinace R^2 ukazuje Tab. I.

Tab. I. Koeficienty determinace pro jednoosý tah

		koeficient determinace R^2
Obr. 10.	tloušťka 1 mm	0,9942
Obr. 11.	tloušťka 2 mm	0,9992
Obr. 12.	tloušťka 3 mm	0,9993

Z Tab. I. jsou zřejmé minimální rozdíly koeficientů determinace pro jednotlivé tloušťky. Všechny se téměř blíží hodnotě 1. Nejvhodnější se ukázala tloušťka materiálu 3 mm. (koeficient determinace R^2 se u této tloušťky blíží nejvíce hodnotě 1)

Změna tloušťky zkušebních vzorků pro jednoosý tah nemá prakticky vliv na přesnost měření.

2.5.2 Dvouosý tah

2.5.2.1 Vliv průměru nafukované části

Obr. 13. – 18. znázorňují vliv velikosti průměru nafukované části vzorku na výsledky dvouosé rovinné zkoušky. Opět byly jednotlivé průměry srovnány s referenční křivkou. Referenční křivkou je v tomto případě průměrná polynomická hodnota získaná z hodnot všech měřených vzorků. Polynomická rovnice referenční křivky je $Y = -0,01938 \cdot x^6 + 0,28283 \cdot x^5 - 1,59690 \cdot x^4 + 4,32700 \cdot x^3 - 4,87041 \cdot x^2 + 3,44267 \cdot x - 0,01625$.

Na základě porovnání velikosti koeficientů determinace R^2 jednotlivých průměrů se ukázalo, že rozdíly mezi jednotlivými průměry jsou minimální. Výsledky porovnání ukazuje Tab. II.

Tab. II. Srovnání průměrů nafukovaných částí vzorků

		koeficient determinace R^2
Obr. 16.	ø 40 mm	0,971
Obr. 17.	ø 45 mm	0,972
Obr. 18.	ø 50 mm	0,967

Z Tab. II. jsou zřejmé minimální rozdíly koeficientů determinace pro jednotlivé průměry. Opět se téměř blíží hodnotě 1. Nejvhodnější se ukázal průměr nafukované části 45 mm. (koeficient determinace R^2 se u tohoto průměru blíží nejvíce hodnotě 1)

Změna průměru nafukované části zkušebních vzorků pro dvouosé rovinné namáhání nemá prakticky vliv na přesnost měření.

Výsledky porovnání průměrů s jednotlivými tloušťkami na základě koeficientu determinace R^2 ukazuje Tab. III.

Tab. III. Srovnání průměrů nafukovaných částí vzorků po jednotlivých tloušťkách

		koeficient determinace R^2
tloušťka 1 mm	ø 40 mm	0,967
	ø 45 mm	0,958
	ø 50 mm	0,970
<hr/>		
tloušťka 2 mm	ø 40 mm	0,990
	ø 45 mm	0,987
	ø 50 mm	0,985
<hr/>		
tloušťka 3 mm	ø 40 mm	0,940
	ø 45 mm	0,968
	ø 50 mm	0,931

Z Tab. III je vidět, že se hodnoty u průměrů po jednotlivých tloušťkách od sebe příliš neliší.

Nejvyšší hodnoty bylo dosaženo u průměru 40 mm při tloušťce materiálu 2 mm.

Jako nejméně vhodný se jeví průměr 50 mm při tloušťce materiálu 3 mm. (nejmenší hodnota koeficientu determinace)

2.5.2.2 Vliv tloušťky materiálu

Obr. 19. – 21. znázorňují vliv tloušťky materiálu na výsledky dvouosé rovinné zkoušky. Z obrázků je jasně patrné, že tloušťka materiálu má na přesnost výsledků vliv. Tuto

skutečnost potvrzují Obr. 22. – 24. v nichž byly jednotlivé tloušťky srovnány s referenční křivkou. Referenční křivkou je v tomto případě průměrná polynomická hodnota, získaná z hodnot všech měřených vzorků. Výsledky porovnání na základě koeficientu determinace R^2 ukazuje Tab. IV.

Tab. IV. Srovnání tlouštěk materiálu

		koeficient determinace R^2
Obr. 22.	tloušťka 1 mm	0,965
Obr. 23.	tloušťka 2 mm	0,988
Obr. 24.	tloušťka 3 mm	0,946

Z Tab. IV. jsou zřejmé rozdíly koeficientů determinace pro jednotlivé tloušťky. Nejvhodnější se ukázala tloušťka materiálu 2 mm. (koeficient determinace R^2 se u této tloušťky nejvíce blíží hodnotě 1)

Změna tloušťky zkušebních vzorků pro dvouosé rovinné namáhání má určitý vliv na přesnost měření.

Dále jsou na Obr. 25. – 33. postupně porovnány s referenční křivkou tloušťky materiálu po jednotlivých průměrech nafukovaných částí vzorků. Výsledky porovnání na základě koeficientu determinace R^2 ukazuje Tab. V.

Tab. V. Srovnání tlouštěk materiálu po jednotlivých průměrech

			koeficient determinace R^2
Obr. 25.	ø 40 mm	tloušťka 1 mm	0,967
Obr. 26.		tloušťka 2 mm	0,990
Obr. 27.		tloušťka 3 mm	0,940
Obr. 28.	ř 45 mm	tloušťka 1 mm	0,958
Obr. 29.		tloušťka 2 mm	0,987
Obr. 30.		tloušťka 3 mm	0,968
Obr. 31.	ř 50 mm	tloušťka 1 mm	0,970
Obr. 32.		tloušťka 2 mm	0,985
Obr. 33.		tloušťka 3 mm	0,931

Tab. V ukazuje určité rozdíly hodnot determinačních koeficientů u tloušťek po jednotlivých průměrech.

Nejvyššího koeficientu bylo dosaženo u tloušťky 2 mm o průměru nafukované části 40 mm.

Z předchozího porovnání hodnot koeficientů determinace R^2 vychází jako nejvhodnější tato geometrie vzorku:

- **pro jednoosý tah** : tloušťka materiálu 1, 2 i 3 mm (nemá téměř vliv na výsledky)
- **pro dvouosý tah (Bubble Inflation Technique)** :
 - o tloušťka materiálu 2 mm
 - o průměr nafukované části vzorku: může být použit 40, 45 i 50 mm (nemá téměř vliv na výsledky)

Z praktického hlediska je taktéž nejvhodnější tloušťka materiálu 2 mm. Vzorky tloušťky 1 mm se hůře připravují a vzorky tloušťky 3 mm zase hůře nafukují. Průměr nafukované části vzorku je nejvhodnější 50 mm. Nafoukne se do větší bubliny, ze které se lépe odečítají potřebné údaje pro následné vyhodnocování. Další výhodou tohoto průměru je menší velikost tlaku P potřebného na porušení vzorku (viz. Tab. VI).

Tab. VI. Průměrná hodnota tlaku potřebná na porušení vzorku

průměr [mm]	tlak P [Mpa]
40	0,210
45	0,192
50	0,181

ZÁVĚR

V rámci této diplomové práce byla provedena studie vlivu geometrie (rozměrů) zkušebních vzorků na přesnost výstupních dat při jednoosém a dvouosém namáhání. Dále pak určení charakteristiky závislosti napětí na poměrné deformaci, jejich popis a srovnání pro různé rozměry zkušebních vzorků. Testy probíhaly na gumárenské směsi s označením S 1234, která se běžně využívá k výrobě bočnic pneumatik. Byly připraveny tři různé tloušťky vzorků 1, 2 a 3 mm (5 kusů od každé tloušťky) s třemi různými průměry nafukované části 40, 45 a 50 mm. (5 kusů od každého průměru). Tyto vzorky byly podrobeny mechanickým zkouškám a to dvouosému tahu který byl simulován metodou nafukování (Bubble Inflation Technique). Dále se prováděl jednoosý tah dle ISO 37 na vzorcích o tloušťce 1, 2 a 3 mm (5 kusů od každé tloušťky). Výsledky těchto dvou metod byly vyneseny do grafů a vzájemně porovnány mezi sebou pomocí hodnot koeficientů determinace R^2 .

U jednoosého namáhání vyšlo najevo, že vliv změny tloušťky zkušebního tělesa na výslednou přesnost měření nemá téměř žádný vliv. Lze použít jakoukoliv ze tří tlouštěk.(viz 2.5)

U dvouosého namáhání se prokázalo, že na výsledky měření nemá vliv změna průměru nafukované části vzorku. Ne už tak docela toto platí při změně tloušťky vzorku. Tady se prokázal určitý vliv na výsledky měření. Jako optimální lze považovat tloušťku 2 mm.(viz 2.5)

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- (1) ČSN ISO 37: *Pryž z vulkanizovaných nebo termoplastických kaučuků – Stanovení tahových vlastností.*
- (2) Špaček, J. *Technologie gumárenská a plastikářská II.* Brno : Rektorát vysokého učení technického v Brně, 1980
- (3) Franta, I. *Gumárenská technologie I* Praha : Nakladatelství technické literatury, 1979. ISBN 04-618-79
- (4) Franta, I. *Gumárenská technologie II* Praha : Nakladatelství technické literatury, 1969. ISBN 04-626-69
- (5) Kubík, J. Zytka A. *Zkušební metody v gumárenství* Praha : Nakladatelství technické literatury, 1962. ISBN 04-618-62
- (6) Štěpán, M. *Gumárenská technologie VI* Praha : Státní nakladatelství technické literatury, 1965. ISBN 04-632-65
- (7) Kohnke, P. *ANSYS – Theory reference.* Canonsburg, PA, USA: ANSYS, Inc., 1998. 965s.
- (8) Ciesielski, A. *An Introduction to Rubber Technology.* Shawbury, UK: Rapra Technology Limited, 2000.
- (9) Jančík, M. *Zkoušení Hyperelastických materiál.* Zlín: 2005, Technologická Fakulta, Bakalářská Práce
- (10) Gent, A., N. *Engineering with rubber.* Munich: Carl Hauser Verlag, 2001. 365s. ISBN 3-446-21403-8
- (11) Morton, M. *Rubber technology.* 2. vyd. New York, USA: Van Nostrand Reinhold, 1973. 603s.
- (12) Haderka, M. *Vliv parametrů vulkanizace na mechanické vlastnosti elastomerů.* Zlín: 2006, Technologická Fakulta, Diplomová Práce
- (13) Harper, Ch., A. *Handbook of plastics and elastomers.* New York, USA: McGraw-Hill, 1975. 1000s. ISBN 0-07-026681-6

-
- (14) Kolář, V., Němec, I., Kanický, V. *FEM Principy a praxe metody konečných prvků* Praha : Computer Press, 1997. 402s.
 - (15) Ogden, R.W. *Non-linear Elastic Deformation*. New York, USA : Dover Publications, 1997
 - (16) Smith L.P. *The language of Rubber*. London, UK Du Pont de Nemours International, 1993. ISBN 0 7506 1413 7
 - (17) Reuge N., Schmidt F. M. *Eleastomer Biaxial Characterization Using Bubble Inflation Technique*. Polymer engineering and science, March 2001, Vol. 41, No.3

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

W je potenciál deformační energie

I_i je deformační invarianta pro materiálové modely

P je tlak, v [Mpa]

c_{ij} je materiálová konstanta

E je počáteční modul pružnosti, v [MPa]

μ_i je materiálová konstanta

α_i je materiálová konstanta

λ_i je poměrné protažení, v [%]

σ_{ij} je napětí ve směru ij , v [MPa]

E_{ij} je Lagrangeův deformační tenzor

ε_i je poměrná deformace

δ je tažnost, v [%]

L je délka pracovní části po protažení, v [mm]

L_0 je původní délka pracovní části, v [mm]

F je zatěžovací síla, v [N]

s je plocha průřezu pracovní části, v [mm²]

t je tloušťka vzorků, v [mm]

D je průměr nafukované části, v [mm]

X je velikost úseku pro zjištění deformace, v [mm]

ϕ je průměr nafukované části zkušebního vzorku

R^2 je koeficient determinace

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Jednoosá napjatost	12
Obr. 2 Dvouosá napjatost.....	13
Obr. 3 Čistý smyk	14
Obr. 4 Řez kmenem <i>Hevea brasiliensis</i>	20
Obr. 5 Zkušební těleso tvaru oboustranné lopatky	34
Obr. 6 Zkušební těleso kruhového tvaru při zkoušce	37
Obr. 7 Zkušební těleso kruhového tvaru s orýsováním (čárkovaně)	37
Obr. 8 Schéma zkušebního zařízení pro dvouosý tah	38
Obr. 9 Srovnání závislostí napětí na poměrné deformaci pro všechny tloušťky materiálu .	40
Obr. 10 Srovnání s referenční křivkou pro tloušťku materiálu 1 mm.....	41
Obr. 11 Srovnání s referenční křivkou pro tloušťku materiálu 2 mm	42
Obr. 12 Srovnání s referenční křivkou pro tloušťku materiálu 3 mm.....	42
Obr. 13 Vliv průměru nafukované části vzorků (tloušťka materiálu 1 mm)	43
Obr. 14 Vliv průměru nafukované části vzorků (tloušťka materiálu 2 mm)	44
Obr. 15 Vliv průměru nafukované části vzorků (tloušťka materiálu 3 mm)	45
Obr. 16 Srovnání s referenční křivkou pro průměr nafukované části vzorku 40 mm.....	45
Obr. 17 Srovnání s referenční křivkou pro průměr nafukované části vzorku 45 mm.....	46
Obr. 18 Srovnání s referenční křivkou pro průměr nafukované části vzorku 50 mm.....	47
Obr. 19 Vliv tloušťky materiálu (průměr nafukované části vzorku 40 mm)	48
Obr. 20 Vliv tloušťky materiálu (průměr nafukované části vzorku 45 mm)	48
Obr. 21 Vliv tloušťky materiálu (průměr nafukované části vzorku 50 mm)	49
Obr. 22 Srovnání s referenční křivkou pro tloušťku materiálu 1 mm (všechny průměry) ..	50
Obr. 23 Srovnání s referenční křivkou pro tloušťku materiálu 2 mm (všechny průměry)...	50
Obr. 24 Srovnání s referenční křivkou pro tloušťku materiálu 3 mm (všechny průměry)...	51

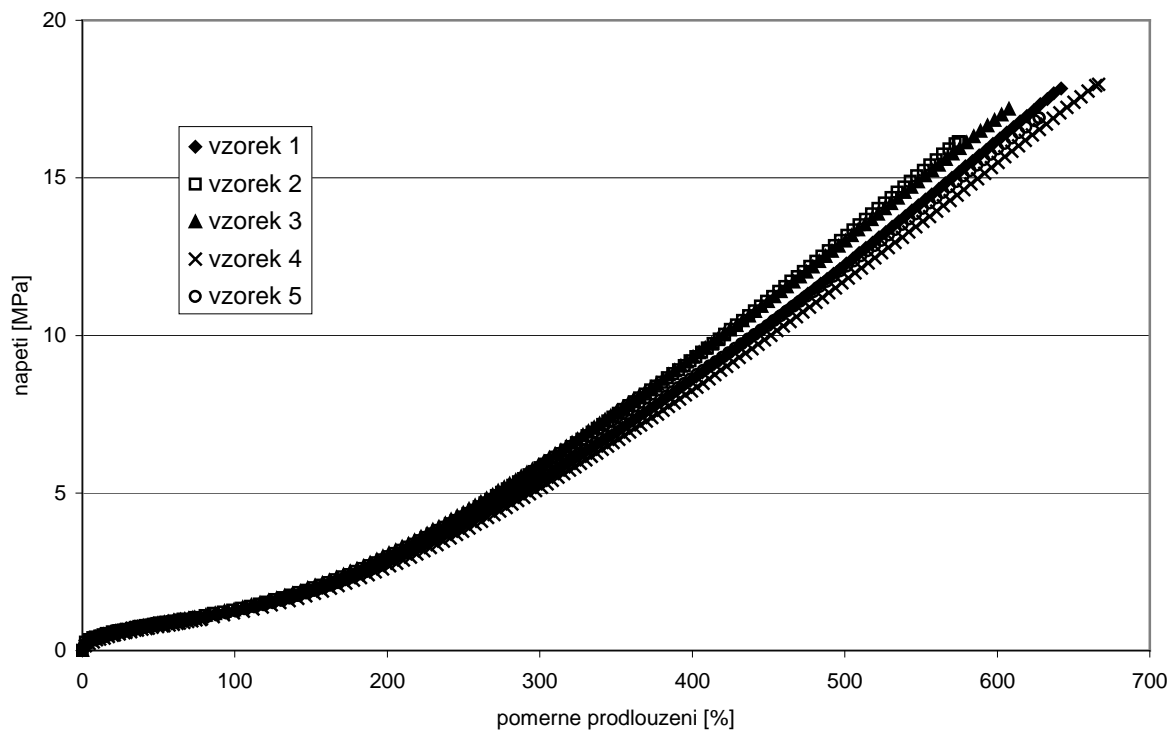
Obr. 25 Srovnání s referenční křivkou pro tloušťku materiálu 1 mm (průměr 40 mm)	52
Obr. 26 Srovnání s referenční křivkou pro tloušťku materiálu 2 mm (průměr 40 mm)	52
Obr. 27 Srovnání s referenční křivkou pro tloušťku materiálu 3 mm (průměr 40 mm)	53
Obr. 28 Srovnání s referenční křivkou pro tloušťku materiálu 1 mm (průměr 45 mm)	53
Obr. 29 Srovnání s referenční křivkou pro tloušťku materiálu 2 mm (průměr 45 mm)	54
Obr. 30 Srovnání s referenční křivkou pro tloušťku materiálu 3 mm (průměr 45 mm)	54
Obr. 31 Srovnání s referenční křivkou pro tloušťku materiálu 1 mm (průměr 50 mm)	55
Obr. 32 Srovnání s referenční křivkou pro tloušťku materiálu 2 mm (průměr 50 mm)	55
Obr. 33 Srovnání s referenční křivkou pro tloušťku materiálu 3 mm (průměr 50 mm)	56

SEZNAM TABULEK

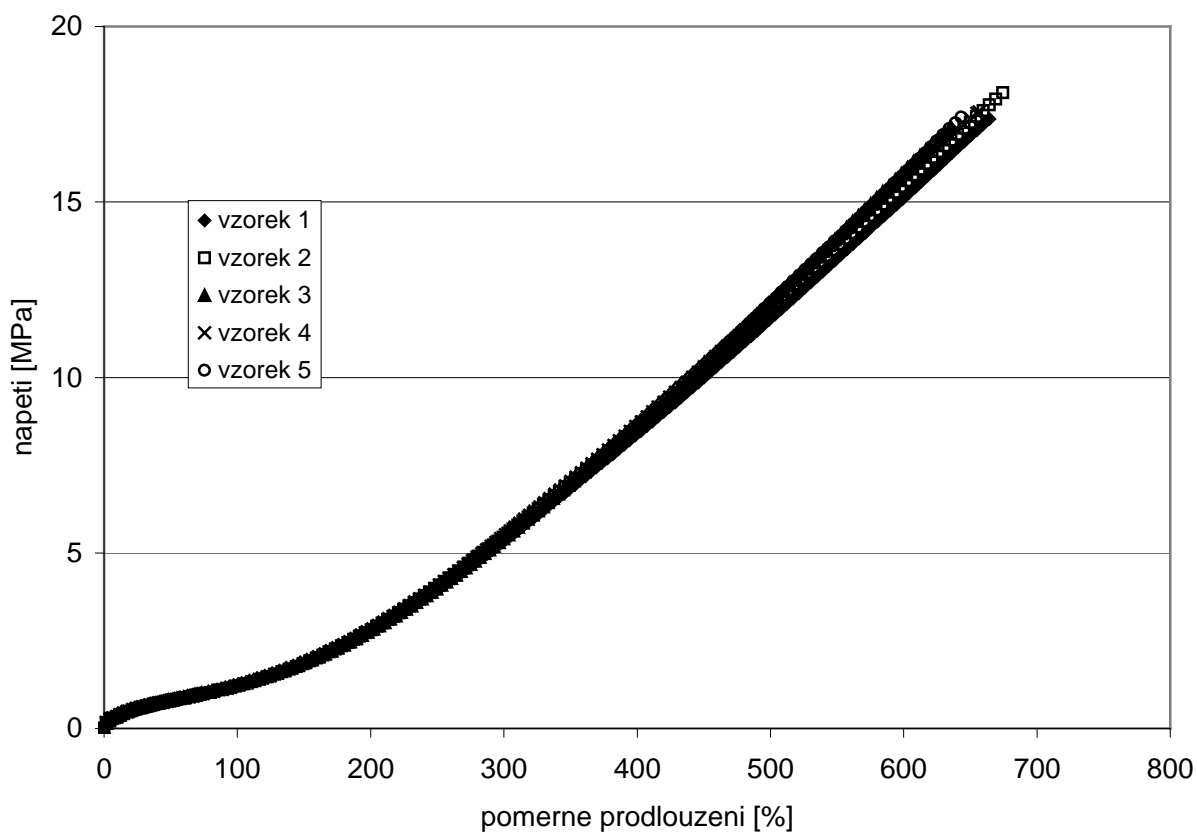
Tab. I Koeficienty determinace pro jednoosý tah	57
Tab. II Srovnání průměrů nafukovaných částí vzorků	57
Tab. III Srovnání průměrů nafukovaných částí vzorků po jednotlivých tloušťkách.....	58
Tab. IV Srovnání tlouštěk materiálu	59
Tab. V Srovnání tlouštěk materiálu po jednotlivých průměrech	59
Tab. VI Průměrná hodnota tlaku potřebná na porušení vzorku	61

SEZNAM PŘÍLOH

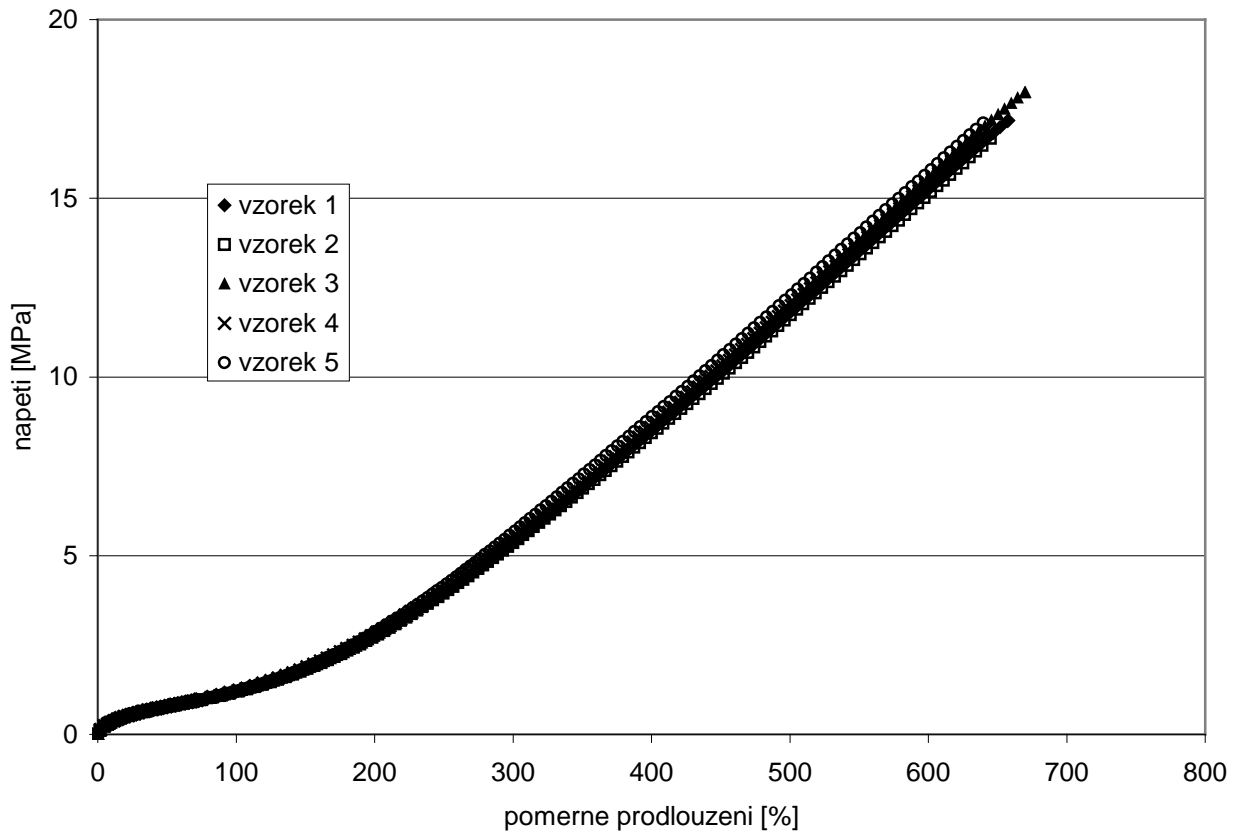
P1. Závislost napětí na poměrné deformaci (tloušťka 1 mm)



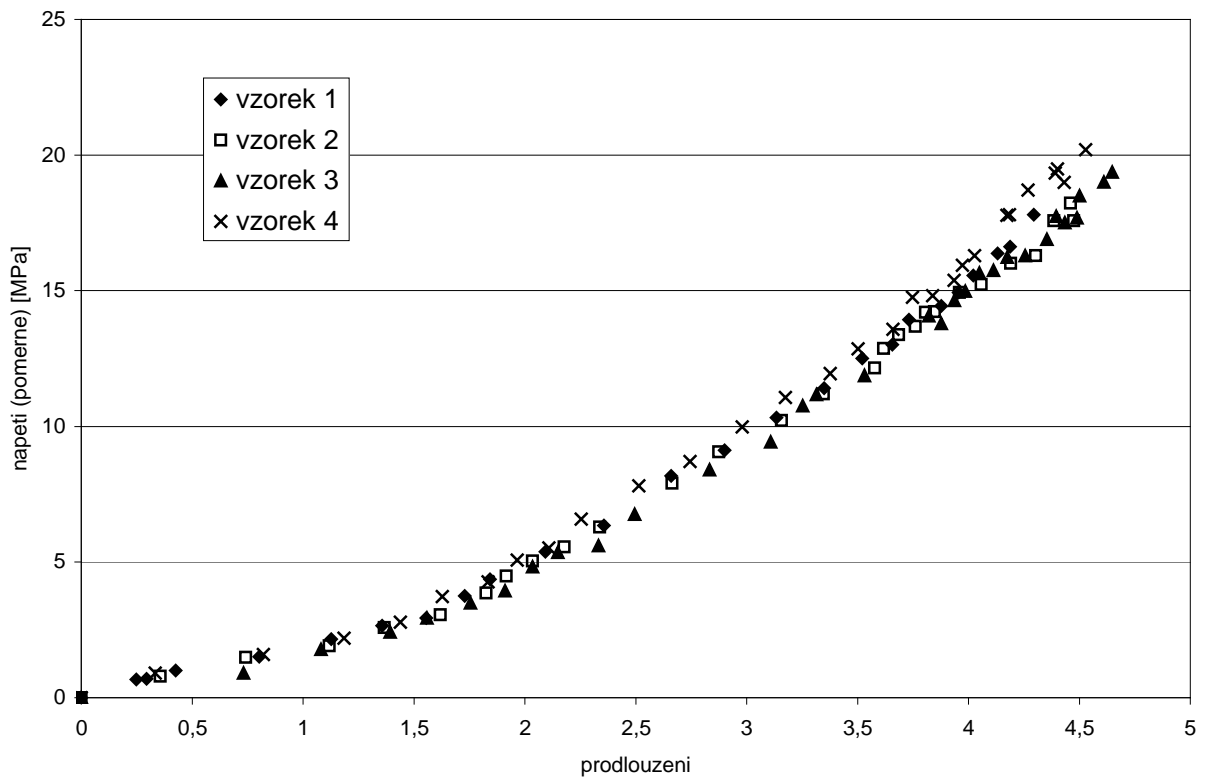
P2. Závislost napětí na poměrné deformaci (tloušťka 2 mm)



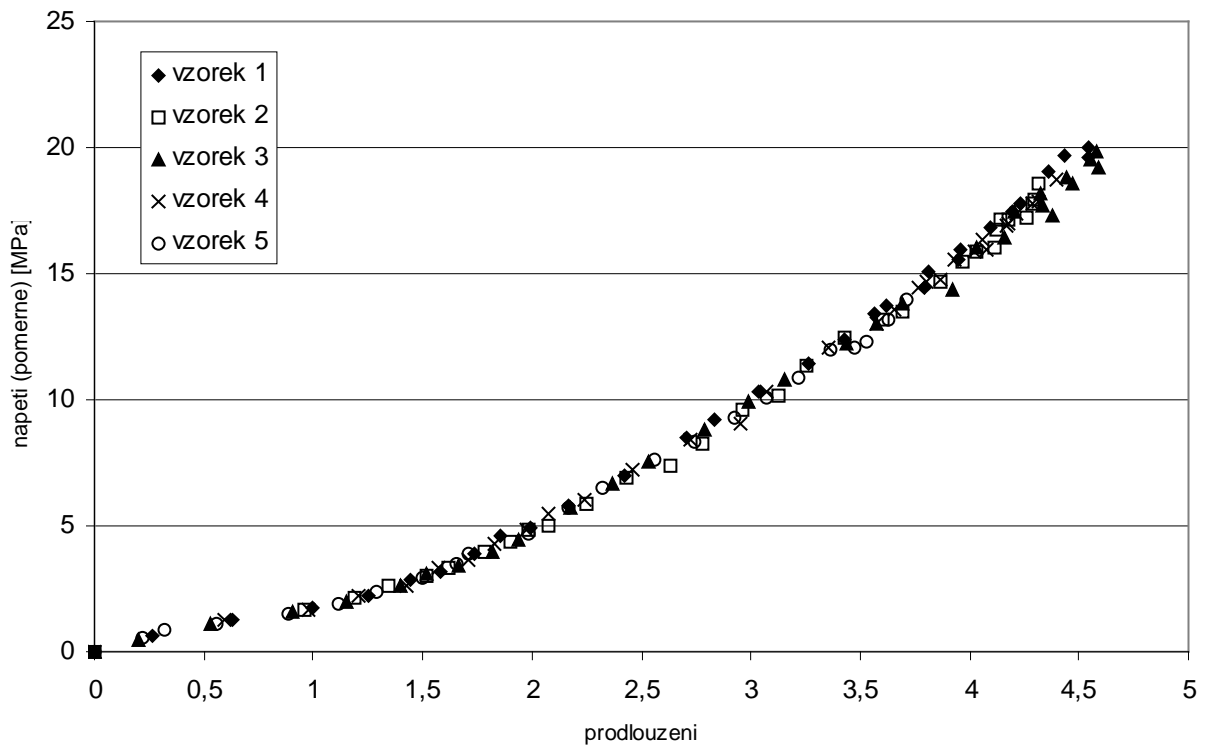
P3. Závislostí napětí na poměrné deformaci (tloušťka 3 mm)



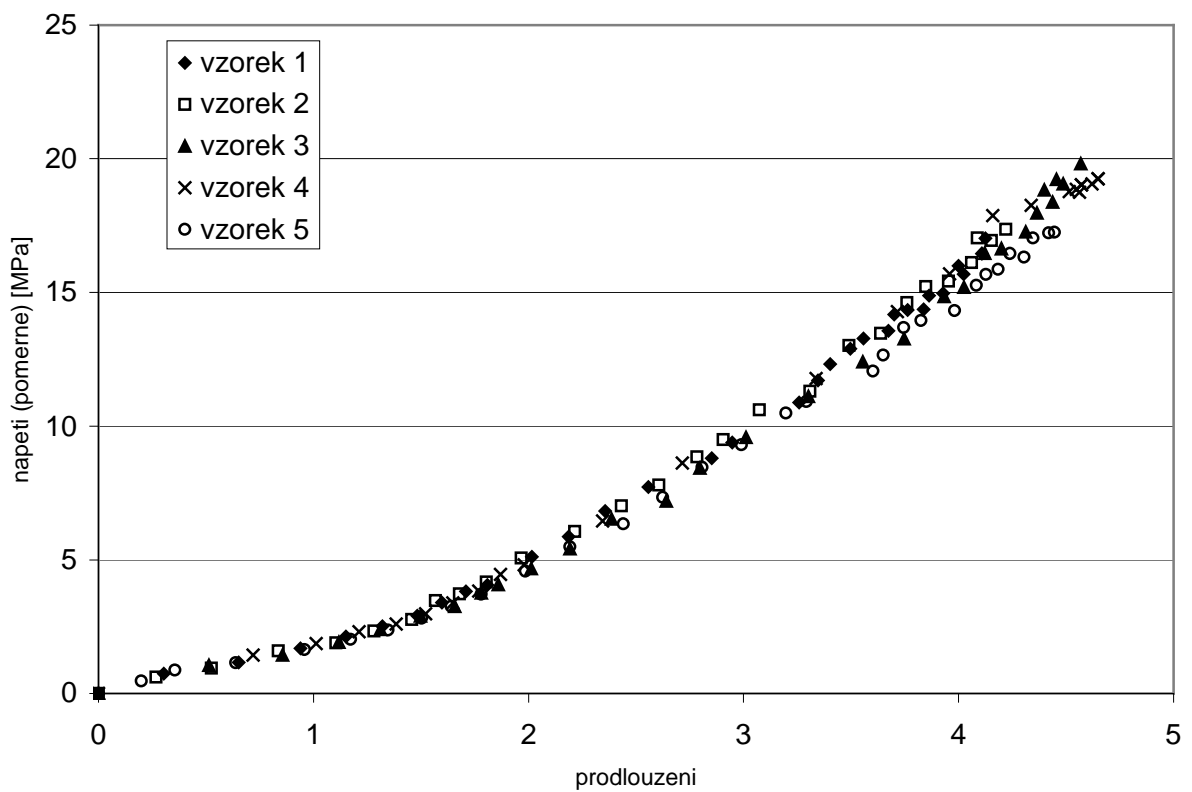
P4. Vzorky (tloušťka 1 mm, průměr 40 mm)



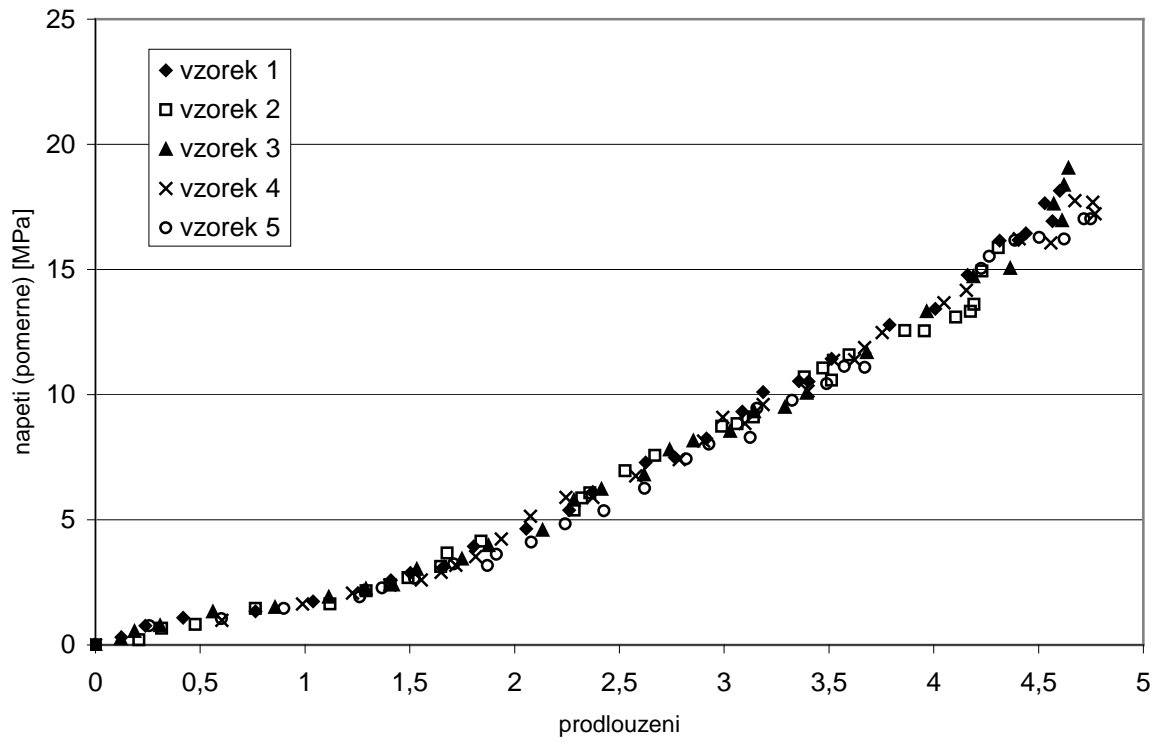
P5. Vzorky (tloušťka 1 mm, průměr 45 mm)



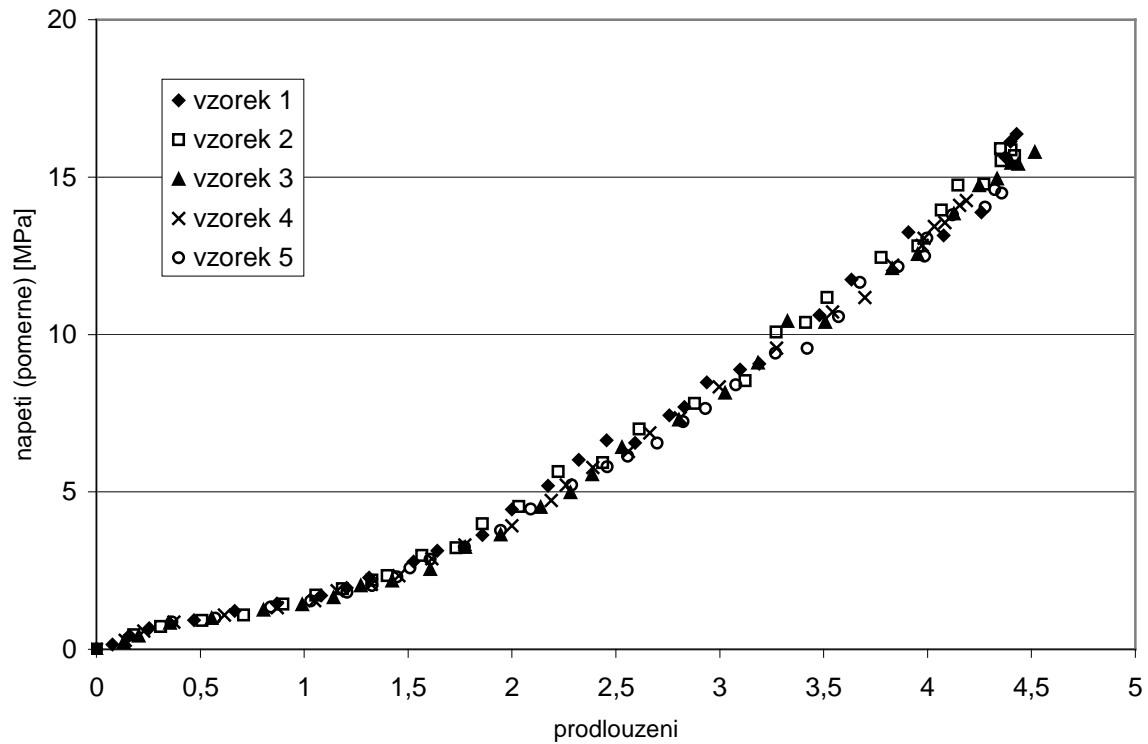
P6. Vzorky (tloušťka 1 mm, průměr 50 mm)



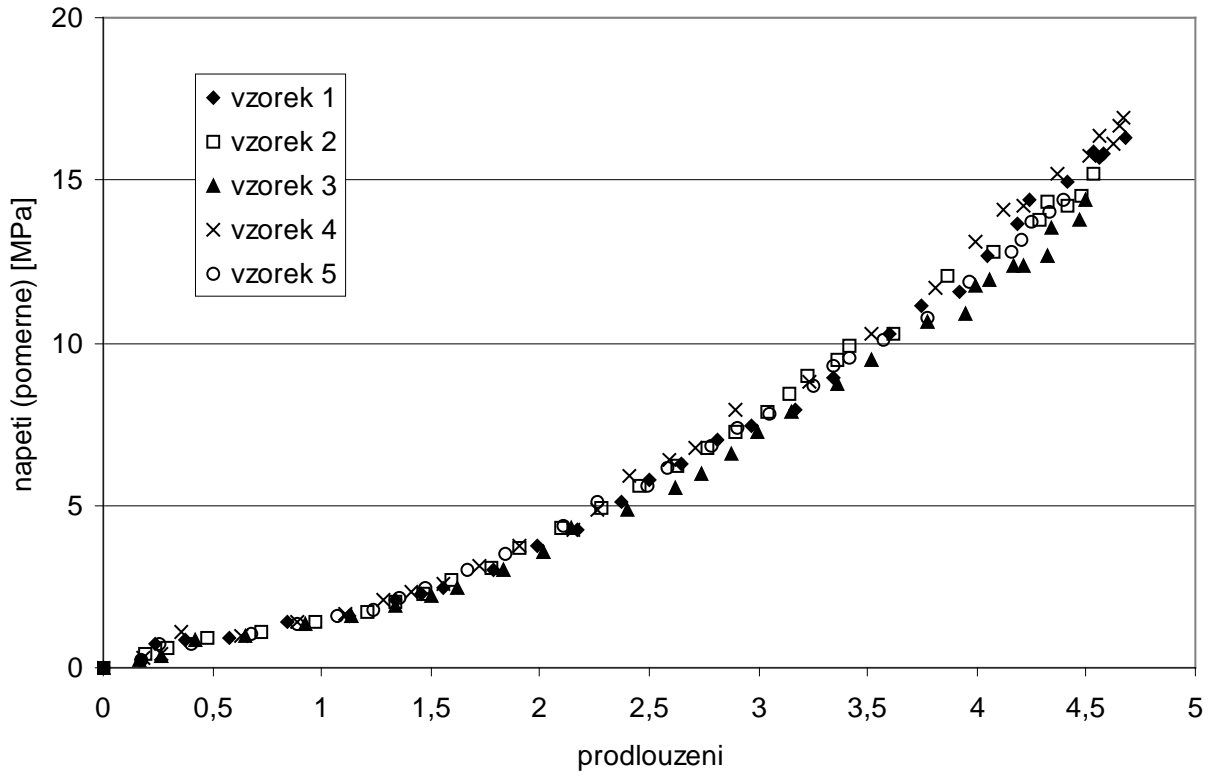
P7. Vzorky (tloušťka 2 mm, průměr 40 mm)



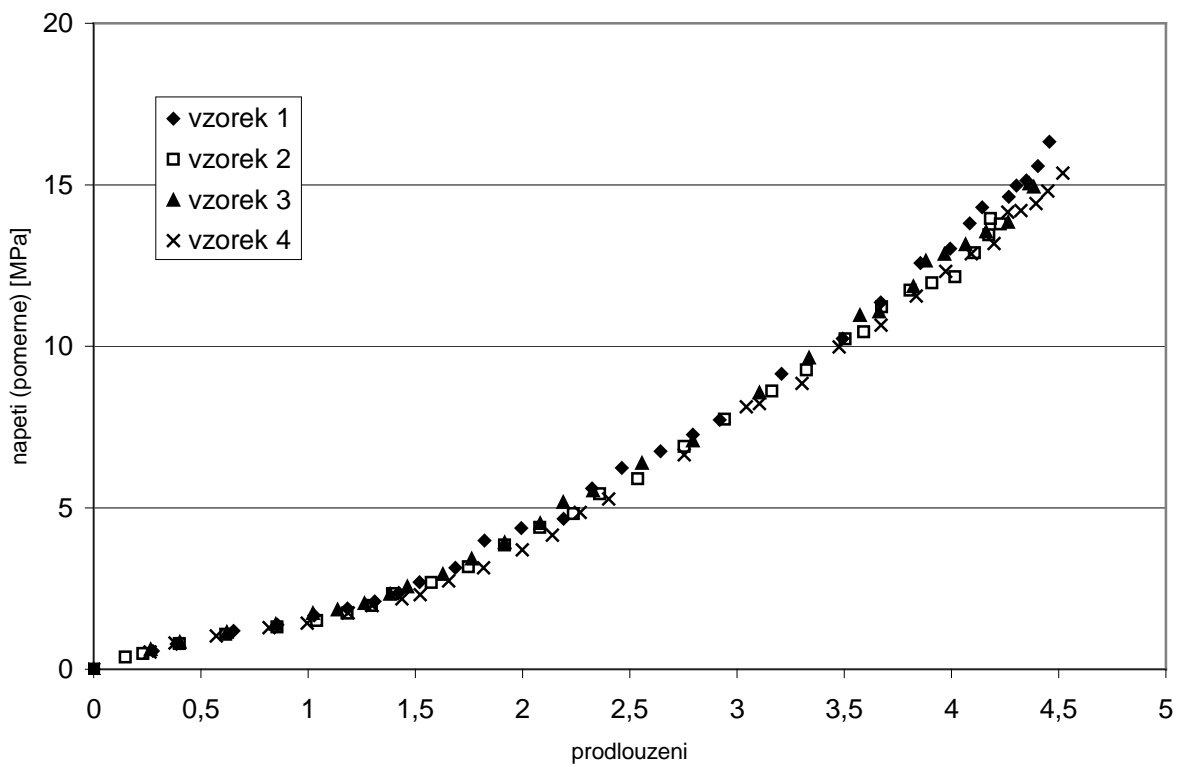
P8. Vzorky (tloušťka 2 mm, průměr 45 mm)



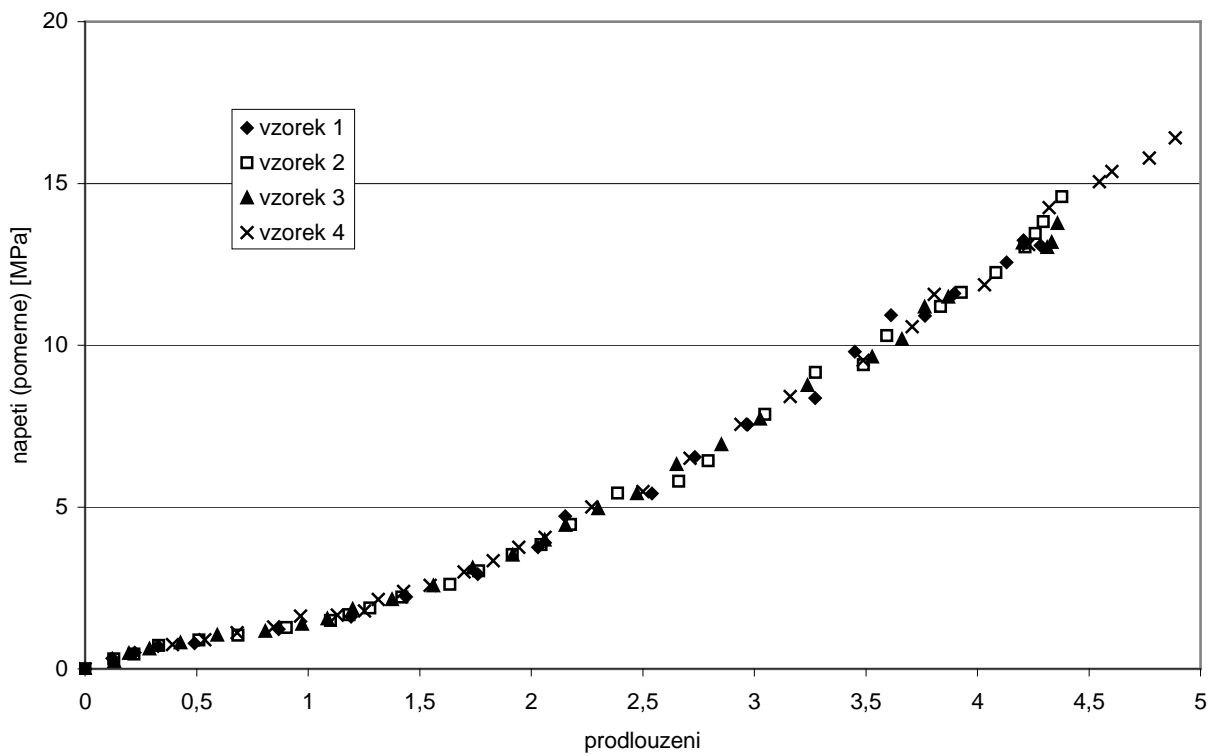
P9. Vzorky (tloušťka 2 mm, průměr 50 mm)



P10. Vzorky (tloušťka 3 mm, průměr 40 mm)



P11. Vzorky (tloušťka 3 mm, průměr 45 mm)



P12. Vzorky (tloušťka 3 mm, průměr 50 mm)

