



# Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

## Fakulta technologická

Teze disertační práce

### **Studium objemových změn elastomerů s využitím DIC metod**

**Study of Volume Changes in Elastomers Using DIC Methods**

Autor: **Ing. Barbora Kotlánová, Ph.D.**

Studijní program: P0788D270012 Nástroje a procesy

Školitel: doc. Ing. Jakub Javořík Ph.D.

Oponenti: prof. Ing. Dagmar Měřínská, Ph.D.  
prof. Ing. Jan Krmela, Ph.D.  
doc. Ing. Václav Sebera, Ph.D.

Zlín, říjen 2025

© Barbora Kotlánová

Vydala **Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně** v edici **Doctoral Thesis Summary**.  
Publikace byla vydána v roce 2025.

*Klíčová slova: DIC, elastomer, objemová změna, Poissonovo číslo, objemový modul pružnosti, protažení*

*Key words: DIC, elastomer, volume change, Poisson's Ratio, bulk modulus, stretch*

Plná verze disertační práce je dostupná v Knihovně UTB ve Zlíně.

ISBN 978-80-7678-366-9

## **ABSTRAKT**

Cílem této práce je zkoumat závislost objemového modulu elastomerů na protažení při různých deformačních módech za použití digitální korelace obrazu (DIC) jako metody měření. Získané informace mohou pomoci lépe porozumět mechanickému chování elastomerů pod různými zatěžovacími podmínkami a jejich zpracování vedoucí k jejich efektivnějšímu využití v praxi.

V teoretické části práce je analyzován současný stav řešené problematiky měření objemových změn, včetně přehledu existujících metod a jejich omezení. Jsou zde také uvedeny základní informace o elastomerech, jejich chemické struktuře a mechanickém chování, s důrazem na faktory ovlivňující jejich stlačitelnost. Dále je v této části popsána metoda měření DIC, princip, technické požadavky a možnosti využití v různých oblastech výzkumu.

Experimentální část práce je zaměřena na provedení experimentu, který zahrnuje výrobu zkušebních těles, popis metody měření objemových změn při jednoosém a dvouosém tahu se záznamem deformací pomocí DIC zařízení, postup vyhodnocování dat a analýzu získaných výsledků.

## **ABSTRACT**

The aim of this work is to investigate the dependence of the bulk modulus of elastomers on stretch at different deformation modes using digital image correlation (DIC) as a measurement method. The information obtained can enable a better understanding of the mechanical behaviour of elastomers under different loading conditions and their processing, leading to more effective use in practice.

The theoretical part of the thesis analyses the current state of the problem of measuring volume changes, including an overview of existing methods and their limitations. Basic information about elastomers, their chemical structure and mechanical behaviour is also presented, with emphasis on the factors affecting their compressibility. Additionally, this section describes DIC measurement method, the principle, technical requirements and possible applications in various research fields.

The experimental part of the thesis focuses on the experiment, which includes the production of test specimens, a description of the method of measuring volume changes under uniaxial and biaxial tension with recording of deformations using DIC equipment, data evaluation process and analysis of the obtained results.

## OBSAH

1. SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY .....	5
2. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE .....	9
3. ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ .....	10
3.1 Výpočetní vztahy .....	10
4. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....	15
4.1 Materiál a výroba zkušebních těles .....	15
4.2 Metody měření objemových změn s využitím DIC .....	16
4.2.1 Měření jednoosým tahem .....	16
4.2.2 Měření dvouosým tahem .....	17
4.3 VÝSLEDKY .....	19
4.3.1 Jednoosý tah .....	19
4.3.2 Dvouosý tah .....	26
5. DISKUZE VÝSLEDKŮ .....	32
5.1 Jednoosý tah .....	33
5.2 Dvouosý tah .....	37
6. PŘINOS PRÁCE PRO VĚDU A PRAXI .....	40
7. ZÁVĚR .....	41
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....	42
SEZNAM OBRÁZKŮ .....	47
SEZNAM TABULEK .....	48
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	49
PUBLIKAČNÍ AKTIVITY .....	51
ODBORNÝ ŽIVOTOPIS .....	53

# 1. SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Při uplatnění elastomerních materiálů v různých aplikacích, včetně běžných i náročných, se využívají jejich typické hyperelastické vlastnosti, jako je schopnost velké deformace při malých zatíženích a relativní objemová nestlačitelnost. Elastomery tvoří rozmanitou skupinu polymerních materiálů, jejichž vlastnosti a chování závisí na složení i způsobu zpracování. Klasickými výrobky gumárenského průmyslu jsou pneumatiky, pásy, řemeny, těsnící prvky, hadice, části obuvi a oblečení [1, 2]. Pryžové prvky mohou být také použity jako tvářecí nástroje. Skupinou elastomerních materiálů jsou také silikony význačné zejména kompatibilitou s živými organismy, a proto jsou součástí biomedicínských aplikací. Už jen při vypsání těchto základních prvků z možného využití elastomerů je zřejmé, že zkoumání a měření jejich mechanických vlastností je důležitým a obsáhlým tématem.

Jedním z častých předpokladů při aplikaci elastomerních výrobků je jejich obecně uvažovaná objemová nestlačitelnost [3]. Předpoklad změny tvaru bez změny objemu je zjednodušenou okrajovou podmínkou například při návrhu těsnících prvků nebo pryžokovových elementů pro pružné uchycení pohyblivých či vibrujících strojních součástí a celků (tzv. silentbloky). Hypotéza objemové nestlačitelnosti, která je v těchto případech aplikována, vychází z hodnoty Poissonova čísla blízké 0,5 a je vztahově popsána v kapitole 3.1 níže. Nicméně i přes to jsou objemové změny v elastomerních materiálech patrné a vhodnými metodami také měřitelné.

Již začátkem 20. století byly popisovány změny objemu v gumárenských výrobcích, zapříčiněné zatěžováním elastomerů, kdy dochází k tomu, že kolem částic plniv) vznikají prázdná místa (voids). Ztužující i neztužující plniva vytváří vazby s polymerním řetězcem elastomeru (matrice) a v nezatíženém stavu jsou spolu pevně spojeny. Při zatížení dochází k natahování polymerních řetězců ve směru zatížení a k přetržení vazeb mezi částicemi. Tím dochází ke vzniku zmíněných dutin. Množství a velikost takto vzniklých dutin je ovlivněno množstvím plniv a jejich distribucí a dispergací v objemu elastomeru. Projevy objemové změny se tedy mohou lišit v rámci objemu zkoumaného tělesa. Dalším pozorovaným faktorem ovlivňujícím objemové změny elastomerů je schopnost krystalizace polymerních řetězců pryže při mechanickém, teplotním a kombinovaném zatížení. Velikost objemové změny je tedy závislá na materiálových faktorech (složení gumárenské směsi, typ kaučuku, velikost plniv, tvar plniv a jejich měrný povrch, distribuce a dispergace plniv, respektive velikost agregátů, stupeň vulkanizace), druhu zpracovatelské technologie (polymerní řetězce jsou více orientovány ve směru válcování apod.) a okrajových podmínkách při zatížení (uchycení, druh namáhání, teplota) [4-8,32, 36-39].

Pozorování a kvantifikování objemových změn v elastomerech se od té doby věnovala celá řada výzkumníků. Zásadním problémem, který je z části i motivací předkládaného výzkumu, je však neporovnatelnost jednotlivých výsledků

získaných v průběhu let. Ta je dána tím, že nebyla stanovena a používána jednotná metodika měření objemových změn, a tedy jednotlivé experimenty byly prováděny různými technikami, za využití různých druhů zatížení a často i při variaci teploty. Dalším důležitým aspektem vedoucím k neporovnatelnosti měření je vysoká variabilita mechanických vlastností elastomerů způsobená složením a technologickým zpracováním směsi a výrobků z ní. [8, 10]

Z experimentálních metod je častým přístupem dilatometrie s využitím stlačování zkušební tělesa hydrostatickým tlakem nebo za pomoci pístu [7, 8]. Během tahových zkoušek bývá používáno cyklické zatěžování nebo zkoušky tečení materiálu (creep). Tyto metody se osvědčily v určování Poissonova čísla, vztaženého právě k chování při tečení [9, 10]. Změny v objemu elastomerních materiálů mohou být také funkcí času, teploty a cyklického zatěžování v tahových i tlakových módech [11, 12]. Obecně se většina literárních zdrojů uvedených výše i níže shoduje na tom, že konkrétní hodnoty veličin souvisejících s hyperelastickým chováním elastomerů nejsou normalizovatelné (vzhledem k jedinečnosti gumárenských směsí a technologií výroby v závislosti na konkrétní aplikaci) a je proto nutné stanovit opakovatelnou a spolehlivou metodiku pro měření těchto veličin.

Na výsledky měření mají také vliv statistické a systematické chyby. Lze definovat několik hlavních příčin vzniku chyb při tahových zkouškách elastomerních těles – variace v geometrii zkušební tělesa, uchycení tělesa, povrchy bohaté na polymerní řetězce vzniklé lisováním, nulový referenční stav napětí/deformace. Variace v geometrii zkušební tělesa je dána technologií jeho vytvoření. Obráběná zkušební tělesa vykazují přesnější rozměry a menší náchylnost k povrchovým vadám než tělesa přímo lisovaná nebo vysekávaná. Související změna průřezu tělesa se pak projevuje jako statistická chyba v měření. Zbylé zmíněné chyby jsou spíše systematického charakteru. Uchycení tělesa, zvláště v případě použití kleštin, má vliv na změnu efektivní měřené délky zkušební tělesa. Při lisování jsou povrchy v kontaktu s lisovací formou bohatší na polymerní řetězce, což má za následek mírný pokles naměřeného modulu pružnosti. Poslední zmíněný faktor souvisí s malým mechanickým předpětím při upnutí tělesa. To může mít vliv na výsledky měření zejména v oblasti nízkých deformací. [36]

Trendem zkoumání viskoelastického chování elastomerních materiálů je v současné době provádění měření za využití optických snímacích metod [13-16]. Změny objemu elastomerů jsou oproti změnám tvaru minoritní a používání detailních pozorovacích nástrojů je logickým důsledkem snahy o co nejpřesnější záznam sledovaných závislostí. Obrovský rozmach výpočetní techniky pak umožňuje využívání softwarových řešení, za jejichž pomoci se propojují záznamová zařízení, zkušební stroje a ostatní hardwarové prvky pro měření. Využití takto sofistikovaných metod má za následek efektivní dodatečné zpracování (postprocessing) a vyhodnocování naměřených dat. Rozšířenou metodou se stává digitální korelace obrazu (DIC, z angl. digital image correlation)

založená zjednodušeně na porovnávání referenčního snímku a snímku aktuálního (deformovaného) v čase, kdy je možno sledovat a vykreslovat požadované závislosti v měřítku úplného deformačního pole (full-field measurement) [17]. Pro zajištění rozlišitelnosti snímků v průběhu měření deformace je potřeba pozorovaná tělesa opatřit skvrnitým a dobře rozeznatelným vzorem (speckle pattern), jehož kvalita ovlivňuje přesnost a spolehlivost provedených měření [18]. V tomto dílčím odvětví optických měřících metod také probíhají výzkumné kroky [19], které si kladou za cíl co nejvíce snížit vliv přídavného materiálu na výsledky testování.

I přes značný potenciál DIC pro charakterizaci mechanického chování hyperelastických materiálů, však stále není tato metoda plně využívána. Měření v režimu úplných deformačních polí umožňují kvantifikovat materiálové konstanty a parametry pro výpočtové vztahy. Tyto parametry se v současnosti získávají z experimentálních dat, například pomocí metody virtuálních polí (VFM, virtual fields method) nebo digitální korelace obrazu (DIC), nebo dalších optických metod umožňujících měření úplného deformačního pole. Následně se využívají jako vstup do konečně prvkových simulací (MKP, nebo také FEM z angl. finite element method). Měření úplného deformačního pole je také vhodný nástroj pro charakterizaci mechanismů deformací a poškození, které se podílejí na vzniku a šíření trhlin. Vzhledem k citlivosti vlastností polymerních látek na změnu teploty, lze při kombinaci DIC s infračervenou termografií (IRT z angl. infrared thermography) identifikovat a kvantifikovat vliv změny teploty na viskozitu, změny mikrostruktury nebo na vznik a propagaci trhlin [8]. Porovnáváním konečně prvkové metody a digitální korelace obrazu se zabírali autoři výzkumné práce [20], kdy byla modelována i testována dvouosá napjatost elastomerní membrány pomocí metody nafukování. Výsledkem bylo stanovení vhodné metodiky kalibrace konečně prvkové analýzy v závislosti na naměřených datech.

Množství výzkumů se věnuje použití DIC metody pro stanovení vlastností elastomerů při tečení materiálu. Autory výzkumu [9] byla sledována závislost Poissonova čísla na čase a teplotě okolí při použití různé hodnoty napětí u komerčně využívaných elastomerů (EPDM, NBR, CR). Testování po dobu 300 hodin u všech testovaných vzorků ukázalo postupný nárůst Poissonova čísla na ustálenou hodnotu během prvních desítek hodin. Obecně lze také uvést, že Poissonovo číslo roste se zvyšující se teplotou okolí. Trend nárůstu Poissonova čísla s teplotou při tečení byl pozorován také při testování silikonových elastomerů, kdy bylo použito krátkodobého (10 min.) zatížení [10]. Stejný výzkumný tým se také zabýval pozorování Poissonových čísel a následnou mírou zotavení z krátkodobého (3 hod.) zatížení [5].

Konkrétní problematika určování objemových změn elastomerů a souvisejících veličin za využití DIC je zkoumána řadou výzkumných týmů. Velmi činným autorem je například profesor Le Cam, který ve spolupráci s dalšími vědci vydává celou řadu sumarizačních [7] i konkrétních [11] publikací již od začátku tohoto

tisíciletí. Míra objemových změn v elastomerech je, jak už bylo zmíněno, ovlivněna zejména složením směsi. Velkou roli hrají jak použitá plniva, tak i samotný výchozí typ kaučuku a s tím související proces vzniku makromolekulárních řetězcových sítí. Porovnáváním elastomerů plněných částicemi [21] při tahovém zatížení a snímání metodou stereo DIC s dvěma kamerami bylo zjištěno, že zvětšení objemu po vyvolaném napětí 6 MPa bylo u HNBR (hydrogenovaný nitrilbutadienový kaučuk) okolo 5 %, naproti tomu objemová změna u materiálu FKM (fluoroelastomer) byla až okolo 20 %. Studie [22] pak při dosažení objemové změny nižší než 5 % považuje elastomer stále za nestlačitelný. V tomto případě bylo využito snímání metodou stereo DIC s využitím čtyř kamer, čímž vznikají podmínky pro detailní mapování lokální variace v objemu. Čtyř-kamerová stereo DIC sestava byla použita také ve výzkumné práci [23], kdy byl kladen důraz zejména na vhodné nastavení snímací aparatury. Pro kalibraci zařízení byly pečlivě voleny parametry — velikost podoblasti (subset size), rozestup mezi body (step size) a velikost prostoru kolem bodu (filter size). Bylo stanoveno, že významným kritériem pro vypovídající výsledky analýzy je parametr vyhlazení (smoothing parameter) ovlivňující filtraci vypočtených hodnot. Objemové změny byly pozorovány jak při vysokých, tak při nízkých hodnotách deformací. V rámci prováděného experimentu bylo zjištěno, že při nízkých hodnotách protažení se objemové změny jeví jako vratné – dutiny vzniklé v důsledku namáhání se při uvolnění elastické deformace uzavírají zpět. Naopak při vysokých protaženích se změna objemu projevuje hysterezní smyčkou (návratová křivka po odlehčení neodpovídá křivce při zatěžování), což může být způsobeno tím, že některé dutiny jsou již v oblasti plastických deformací. Druhým důvodem hysterezního průběhu může být pomalejší kinetika uzavírání dutin při odlehčení po větší deformaci, nicméně autoři uvažují kombinaci obou jevů.

Z uvedeného výčtu dosavadního výzkumu v oblasti objemových změn elastomerů je patrné, že nebylo ve větší míře zkoumána závislost objemové změny na protažení při statických zkouškách a konkrétně závislost objemového modulu  $K$  na protažení  $\lambda$ . Právě touto problematikou se zabývá předkládaná práce, a to za využití optické metody DIC, kdy bude pozorován také vliv použitých plniv a jejich objemového zastoupení na objemovou stlačitelnost elastomerů.

## 2. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Disertační práce se zaměřuje na zkoumání objemových změn elastomerů během deformace s využitím bezkontaktní optické metody digitální korelace obrazu (DIC). Cílem je navrhnout a ověřit experimentální metodiku, která umožní spolehlivé a opakovatelné měření a vyhodnocení těchto změn, včetně porovnání vlivu různých faktorů, jako je velikost zatížení a přítomnost plniv. Různé režimy zatěžování (jednoosý, dvouosý tah) byly využity při návrhu výpočetních vztahů a analýze chování elastomerů. Pomocí metody DIC je sledován vývoj objemového modulu a Poissonova čísla v závislosti na deformaci a zároveň ověřena její využitelnost při charakterizaci nelineárního chování elastomerů ve větších přetvořeních.

Součástí práce je také porovnání různých výpočetních přístupů ke stanovení objemového modulu a vytvoření doporučeného metodického postupu pro hodnocení objemového chování elastomerů v závislosti na zatěžovacím režimu a materiálovém složení. Získané poznatky mohou být dále využity při vývoji a optimalizaci materiálových modelů, které zohledňují konečná přetvoření a mírnou objemovou stlačitelnost.

Postup řešení disertační práce:

- Vypracování literární rešerše a analýza současného stavu v oblasti měření objemových změn elastomerů se zaměřením na použití metody digitální korelace obrazu (DIC).
- Příprava experimentu sestávající z návrhu experimentu, výroby a přípravy zkušebních těles vhodných pro jednoosé a dvouosé zatěžování.
- Realizace experimentu zahrnující provedení navržených experimentálních měření jednoosého a dvouosého tahu a získání dat z těchto zkoušek.
- Vyhodnocení získaných dat a interpretace jejich významu v rámci studované problematiky.

### 3. ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ

Experimentální část disertační práce byla navržena tak, aby umožnila sledování objemových změn elastomerů při různých režimech zatěžování s důrazem na systematické zpracování dat a jejich interpretaci. Výchozím bodem byla výroba zkušebních těles z přírodního kaučuku (NR) se ztužujícími plnivými (saze N220) a neztužujícími plnivými (saze N660) v koncentracích 60, 80 a 100 DSK. Směsi byly připraveny v laboratořích Fakulty technologické UTB ve Zlíně, kde proběhla jejich vulkanizace a následné vysekávání těles do požadovaných tvarů. Pro měření jednoosým tahem byla použita zkušební tělesa oboustranných lopatek dle normy ČSN ISO 37 (typ 1) a pro dvouosý tah byla použita tělesa kruhového tvaru. Záznam deformace probíhal pomocí metody stereo DIC s využitím dvou kamer a výpočetního softwaru Mercury RT. Měření bylo provedeno za laboratorních podmínek, a to jak při jednoosém, tak i dvouosém zatěžování zkušebních těles. Výpočty potřebné pro stanovení objemového modulu pružnosti a Poissonova čísla byly provedeny na základě vztahů definovaných níže v kap. 3.1. Naměřená data byla dále zpracována v prostředí MS Excel, kdy k analýze a statistickému vyhodnocení výsledků byly využity nástroje softwarů Minitab 21 a QCExpert. Výstupem těchto analýz byly regresní modely závislosti objemového modulu a Poissonova čísla na protažení.

#### 3.1 Výpočetní vztahy

Pro popis míry objemových změn byla využita veličina objemový modul pružnosti  $K$  a Poissonovo číslo  $\nu$ , které byly vypočítávány z deformací získaných metodou stereo DIC. Chování elastomerů při jednoosém a dvouosém zatěžování spolu úzce souvisí a některé vztahy pro dvouosý stav vycházejí z předpokladů platných pro jednoosý tah [32–35]. Poissonovo číslo  $\nu$  bylo určeno z poměru skutečné příčné poměrné deformace  $\varepsilon_{Tt}$  [-] bylo určeno z poměru skutečné příčné poměrné deformace  $\varepsilon_t$  [-]:

$$\nu = -\frac{\varepsilon_{Tt}}{\varepsilon_t} \quad (3.1)$$

Kdy skutečná podélná poměrná deformace  $\varepsilon_t$  [-] je funkcí podélného protažení  $\lambda$  [-], které je dáno poměrem původní délky  $l_0$  [mm] a deformované délky  $l$  [mm].

$$\varepsilon_t = \ln \lambda, \lambda = \frac{l}{l_0} \quad (3.2)$$

Skutečná příčná poměrná deformace  $\varepsilon_{Tt}$  [-] je funkcí příčného zúžení  $\lambda_T$  [-], které odpovídá poměru deformované šířky  $b$  [mm] k jeho původní šířce  $b_0$  [mm].

$$\varepsilon_{Tt} = \ln \lambda_T, \lambda_T = \frac{b}{b_0} \quad (3.3)$$

Objemový modul pružnosti  $K$  [MPa] je vyjádřen poměrem mezi skutečným napětím  $\sigma_t$  [MPa] a poměrnou změnou objemu  $\theta$  [-].

$$K = \frac{\sigma_t}{\theta} \quad (3.4)$$

Skutečné napětí  $\sigma_t$  [MPa] je definováno jako síla  $F$  [N] vztažená na skutečný průřez  $S$  [mm<sup>2</sup>], vypočtený z původního (počátečního) průřezu  $S_0$  [mm<sup>2</sup>] a příčného zúžení  $\lambda_T$  [-]. Počáteční průřez tělesa  $S_0$  je určen součinem počáteční šířky  $b_0$  [mm] a počáteční tloušťky  $t_0$  [mm].

$$\sigma_t = \frac{F}{S} \quad (3.5)$$

$$S = S_0 \cdot \lambda_T^2 \quad (3.6)$$

$$S_0 = b_0 \cdot t_0 \quad (3.7)$$

Poměrná změna objemu  $\theta$  [-] je dána vztahem mezi původním objemem tělesa  $V_0$  [mm<sup>3</sup>] a objemem tělesa po zatížení  $V$  [mm<sup>3</sup>].

$$\theta = \frac{V - V_0}{V_0} \quad (3.8)$$

U jednoosého tahu dochází k podélné deformaci v jednom směru a ke stejným příčným deformacím ve dvou zbývajících směrech. Poměrná změna objemu je pak vyjádřena vztahem (3.10).

$$\theta = (1 + \varepsilon_{Tt})^2 \cdot (1 + \varepsilon_t) - 1 = \lambda_T^2 \cdot \lambda - 1 \quad (3.9)$$

Pro vyjádření příčného zúžení z podélného protažení lze vycházet ze vztahu (3.1) a při dosazení vztahů (3.2) a (3.3) pak platí:

$$\nu = -\frac{\ln \lambda_T}{\ln \lambda} \quad (3.10)$$

Vyjádřením příčného zúžení ze vztahu (3.10) dostáváme tvar (3.11)

$$\lambda_T = e^{-\nu \cdot \ln \lambda} \quad (3.11)$$

Příčné zúžení při jednoosém namáhání můžeme také vyjádřit ze vztahu (3.9), kdy dostáváme tvar (3.12).

$$\lambda_T = \left( \frac{\theta + 1}{\lambda} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.12)$$

Ze vztahů (3.11) a (3.12) lze odvodit výraz (3.13), kde je poměrná změna objemu funkcí podélného zúžení.

$$e^{-v \cdot \ln \lambda} = \left( \frac{\theta + 1}{\lambda} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\theta = \lambda \cdot e^{-2v \cdot \ln \lambda} - 1 \quad (3.13)$$

Pro popis objemové tuhosti, poměrné změny objemu, podélných a příčných deformací při dvouosé napjatosti je potřeba provést několik odvození a zavést několik hypotéz zmíněných níže. Uvažuje se těleso o tvaru desky s původním objemem  $V_0$  [mm<sup>3</sup>], původní tloušťkou  $t_0$  [mm] a jednotkovou délkou stran. Vzhledem k výrazně menší tloušťce vůči ostatním rozměrům je objem dán vztahem (3.14).

$$V_0 = 1 \cdot 1 \cdot t_0 \quad (3.14)$$

Po zatížení dvouosým namáháním dojde k podélnému protažení  $\lambda$  [-] obvodových stran tělesa. Tloušťka tělesa po zatížení  $t$  [mm] se mění s příčným zúžením při dvouosém namáhání  $\lambda_{Td}$  [-] dle (3.16). Objem tělesa po zatížení je určen dle (3.15), respektive dle (3.17) po dosazení rovnice (3.16).

$$V = \lambda \cdot \lambda \cdot t \quad (3.15)$$

$$t = t_0 \cdot \lambda_{Td} \quad (3.16)$$

$$V = \lambda^2 \cdot \lambda_{Td} \cdot t_0 \quad (3.17)$$

Poměrná změna objemu  $\theta$  [-] je dána vztahem (3.8) mezi původním objemem tělesa  $V_0$  [mm<sup>3</sup>] a objemem tělesa po zatížení  $V$  [mm<sup>3</sup>] platným i pro dvouosé namáhání. Dosazením vztahů (3.15) a (3.17) vzniká rovnice (3.18), jejíž úpravou je získán tvar (3.19), analogický vztahu (3.9) pro jednoosé namáhání. Poměrné protažení  $\lambda$  [-] je dáno poměrem deformované délky tělesa  $l$  [mm] a jeho původní délky  $l_0$  [mm], stejně jako při jednoosém namáhání (3.2).

$$\theta = \frac{V - V_0}{V_0} = \frac{\lambda_{Td} \cdot \lambda^2 \cdot t_0 - t_0}{t_0} \quad (3.18)$$

$$\theta = \lambda_{Td} \cdot \lambda^2 - 1 \quad (3.19)$$

Poměrné protažení  $\lambda$  [-] je dáno poměrem deformované délky tělesa  $l$  [mm] a jeho původní délky  $l_0$  [mm], stejně jako při jednoosém namáhání (3.2).

Při dvouosém namáhání, konkrétně při nafukování kruhového zkušebního tělesa, je původní délka  $l_0$  [mm] stanovena dle vztahu (3.20), kde  $\beta_0$  [rad] je úhel zakřivení nedeformovaného tělesa,  $L$  [mm] je měřená délka na povrchu zkušebního tělesa.

$$l_0 = \frac{\beta_0 \cdot L}{\sin \beta_0} \quad (3.20)$$

Deformovaná délka dvouose namáhaného tělesa je pak obdobně určena dle vztahu (3.21), kde úhel  $\beta$  [rad] je úhel zakřivení deformovaného tělesa.

$$l = \frac{\beta \cdot L}{\sin \beta} \quad (3.21)$$

Při dvouosé napjatosti vyvolané nafukováním je také sledován parametr poloměr zakřivení zkušebního tělesa  $r$  [mm].

$$r = \frac{L}{2 \cdot \sin \beta} \quad (3.22)$$

Objemový modul  $K$  [MPa] je vyjádřen jako poměr skutečného napětí při dvouosé napjatosti  $\sigma_{td}$  [MPa] a poměrné změny objemu  $\theta$  [-].

$$K = \frac{\sigma_{td}}{\theta} \quad (3.23)$$

Skutečné napětí při dvouosém tahu  $\sigma_{td}$  [MPa] vychází z rovnice membránové napjatosti, kde  $p$  [MPa] je zatěžující tlak,  $r$  [mm] je poloměr zakřivení nafouknutého zkušebního tělesa (3.22) a tloušťka tělesa je dána vztahem (3.16).

$$\sigma_{td} = \frac{p \cdot r}{2 \cdot t_0 \cdot \lambda_{Td}} \quad (3.24)$$

Pro výpočet skutečného napětí dle (3.24) je nutné vyjádřit příčné zúžení  $\lambda_{Td}$  [-] pomocí podélného prodloužení  $\lambda$  [-]. Je uvažováno, že při jednoosém tahu i dvouosém tahu tělesa dochází ke stejné podélné deformaci.

$$\lambda_j = \lambda_d = \lambda \quad (3.25)$$

Podmínka stejné poměrné objemové změny při dvouosém i jednoosém namáhání je:

$$\theta = \theta_j = \theta_d \quad (3.26)$$

Pro jednoosý tah platí, že je dosaženo podélného protažení v jednom směru  $\lambda_1 = \lambda$ , a zároveň stejného příčného zúžení ve dvou zbývajících směrech  $\lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_{Tj}$ . Pro dvouosý tah pak platí předpoklad, že je dosaženo totožného podélného protažení ve dvou směrech, tedy  $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$ , a zároveň je dosaženo příčného zúžení

ve zbývající směru  $\lambda_3 = \lambda_{Td}$ . To odpovídá vztahům (3.9) a (3.19), kdy při dosazení do (3.26) dostáváme rovnici (3.27), respektive po úpravě vztah (3.28).

$$\lambda_{Tj}^2 \cdot \lambda - 1 = \lambda_{Td} \cdot \lambda^2 - 1 \quad (3.27)$$

$$\lambda_{Td} = \frac{\lambda_{Tj}^2}{\lambda} \quad (3.28)$$

Do získaného vztahu mezi příčnou deformací dvouosého a jednoosého tahu lze nyní zahrnout faktor stlačitelnosti materiálu dle vztahu (3.11), kdy je po úpravě získán vztah (3.30)

$$\lambda_{Td} = \frac{(e^{-\nu \cdot \ln \lambda})^2}{\lambda} = \frac{1}{\lambda \cdot e^{2\nu \cdot \ln \lambda}} \quad (3.29)$$

Po dosazení do rovnice skutečného membránového napětí (3.24) pak tedy finální podoba vztahu je zapsána jako (3.31).

$$\sigma_{td} = \frac{p \cdot r}{2 \cdot t_0 \cdot \left( \frac{1}{\lambda \cdot e^{2\nu \cdot \ln \lambda}} \right)} \quad (3.30)$$

## 4. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

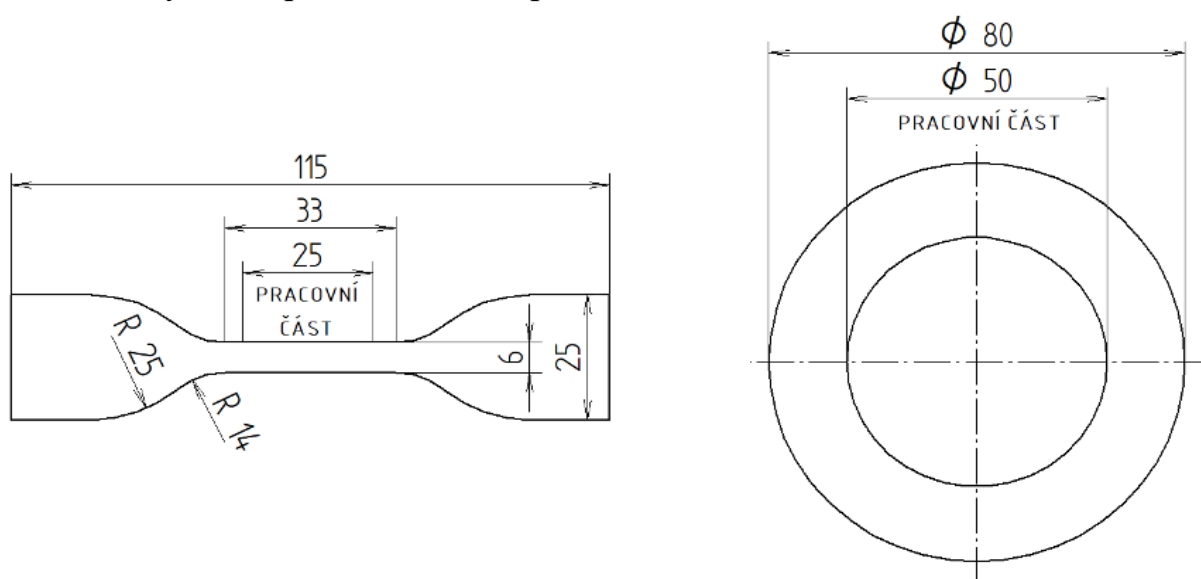
Experimentální část se věnuje použitým materiálům, přípravě zkušebních těles a metodám měření objemových změn při jednoosém a dvouosém zatěžování včetně postupu měření a způsobu vyhodnocení dat.

### 4.1 Materiál a výroba zkušebních těles

Navržená kaučuková směs byla vybrána s ohledem na požadované chování zkušebních těles při mechanických zkouškách a sledování deformací metodou DIC. Pro sledování vlivu plniv byly zvoleny dva druhy sazí – ztužující N220 a neztužující N660 – a třikrát byla měněna jejich koncentrace (60, 80 a 100 DSK).

Základem směsi byl přírodní kaučuk NR NAT 10. Do směsi byly dále přidány běžně používané přísady: oxid zinečnatý a stearin reagující za vzniku stearanu zinečnatého, který působí jako aktivátor vulkanizace; změkčovadlo RAE olej s nízkým obsahem polycyklických aromatických uhlovodíků; ztužující saze N220 s měrným povrchem  $114 \pm 5 \text{ m}^2/\text{g}$  a absorpčním číslem  $114 \pm 6 \text{ cm}^3/100 \text{ g}$ ; neztužující saze N660 s měrným povrchem  $35 \pm 5 \text{ m}^2/\text{g}$  a absorpčním číslem  $90 \pm 5 \text{ cm}^3/100 \text{ g}$ ; 6PPD působící jako antiozonant a antioxidant; DCBS jako sulfenamidový urychlovač sírné vulkanizace a síra OT33 jako vulkanizační činidlo s dobrou dispergovatelností a tepelnou stabilitou.

Míchání probíhalo v hnětiči a na dvouválci s vizuální kontrolou kvality směsi. Směs bez urychlovačů a síry byla následně využita pro měření tokových křivek a stanovení parametrů vulkanizace pomocí MDR reometru. Poté byl v hnětiči do směsi přimíchán vulkanizační systém (síra, urychlovač vulkanizace) a směs byla válcováním připravena k vulkanizaci na hydraulickém lisu při  $160 \text{ }^\circ\text{C}$ . Zkušební tělesa byla vysekávána ze ztvulkanizovaných desek o tloušťce  $\sim 2 \text{ mm}$ , přičemž pro jednoosý tah měla tvar lopatek dle ČSN ISO 37 (Typ 1) a pro dvouosý tah kruhový tvar s pracovní částí o průměru 50 mm.



Obr. 4.1: Rozměry zkušebních těles – pro jednoosý tah vlevo, pro dvouosý tah vpravo

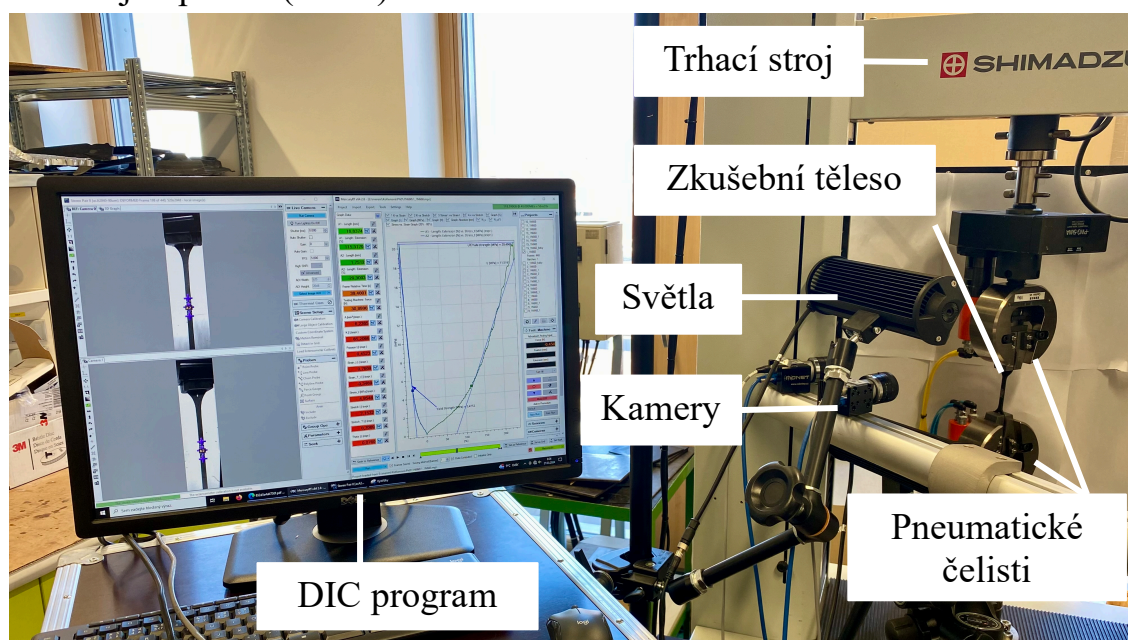
## 4.2 Metody měření objemových změn s využitím DIC

Objemové změny byly měřeny při jednoosém a dvouosém tahu se záznamem deformací metodou stereo DIC. Jednoosý tah byl proveden zkouškou tahem na univerzálním trhacím stroji, dvouosý nafukováním kruhového tělesa pomocí upínacího přípravku a přívodu stlačeného vzduchu.

### 4.2.1 Měření jednoosým tahem

Pro měření jednoosým tahem byl využit univerzální zkušební stroj SHIMADZU AGS-50kNXD s programem TRAPEZIUM X, ke kterému bylo připojeno zařízení DIC skládající se z PC s výpočetním programem Mercury RT, dvou LED lamp M-Tech WLO603, dvou stereo kamer Basler acA2040–90um a objektivů Kowa Lens LM25HC F1.4 f25mm. Kamery s maximální snímkovou frekvencí 90 snímků za sekundu a rozlišením 4 Mpx byly umístěny ve vzdálenosti 320 mm od měřeného zkušební tělesa a svíraly úhel 20°. Zaznamenané snímky měly rozlišení 608 × 2048 px, velikost pixelu 5,5 × 5,5 μm s rychlostí pořizování 5 snímků za sekundu. Kamery DIC byly kalibrovány kalibrační mřížkou s vzdáleností bodů 2 mm při vypočtené průměrné chybě reprojekce 0,3 px.

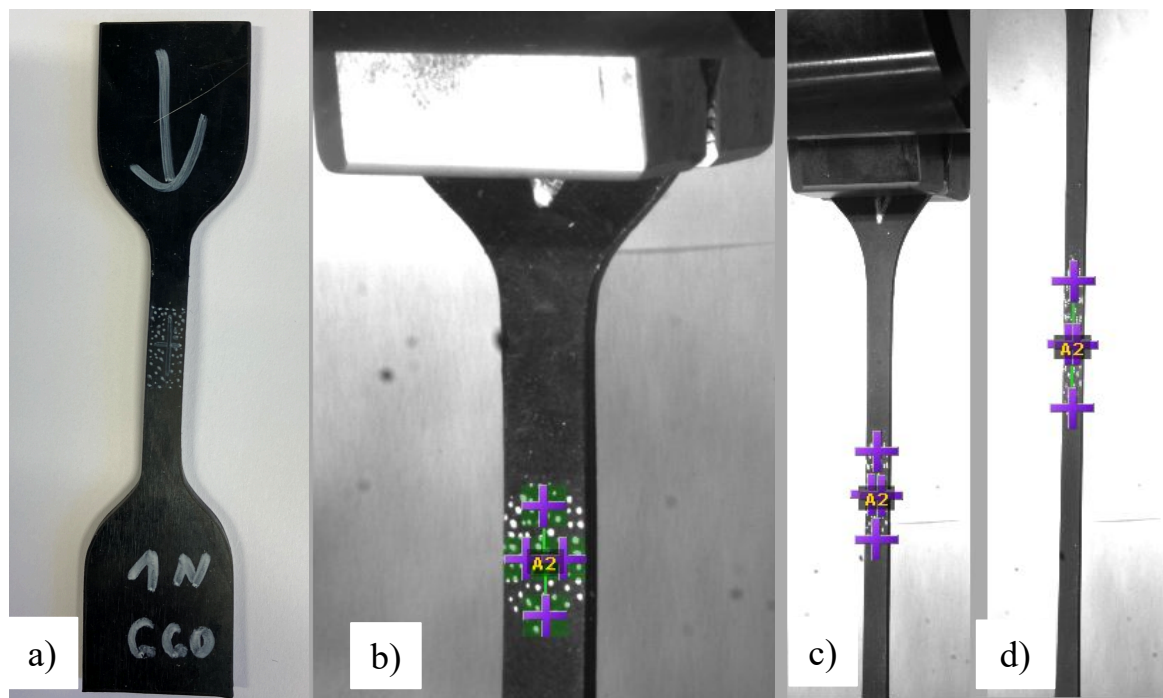
Měření probíhalo za laboratorních podmínek při teplotě 21 °C a rychlost posuvu příčnicku trhacího stroje byla nastavena 100 mm/min. Celkem bylo provedeno šest sérií měření, třikrát pro neztužující plniva (N660) a třikrát pro ztužující plniva (N220).



Obr. 4.2: Experimentální zařízení pro měření jednoosým tahem

Zkušební tělesa (obr. 4.1) byla opatřena skvrnitým vzorem pomocí bílého fixu a uprostřed byla označena měřená oblast křížkem o velikosti 10 × 4 mm, přičemž tělesa byla namáhána tahem do hodnoty skutečné deformace  $\varepsilon_t$  200 %, která odpovídá skutečnému protažení  $\lambda_t = 300$  % ( $\lambda_t = 3$ ). Velikost nastavené výpočetní podoblasti byla zvolena 40 × 40 px. V programu Mercury RT byly nastaveny

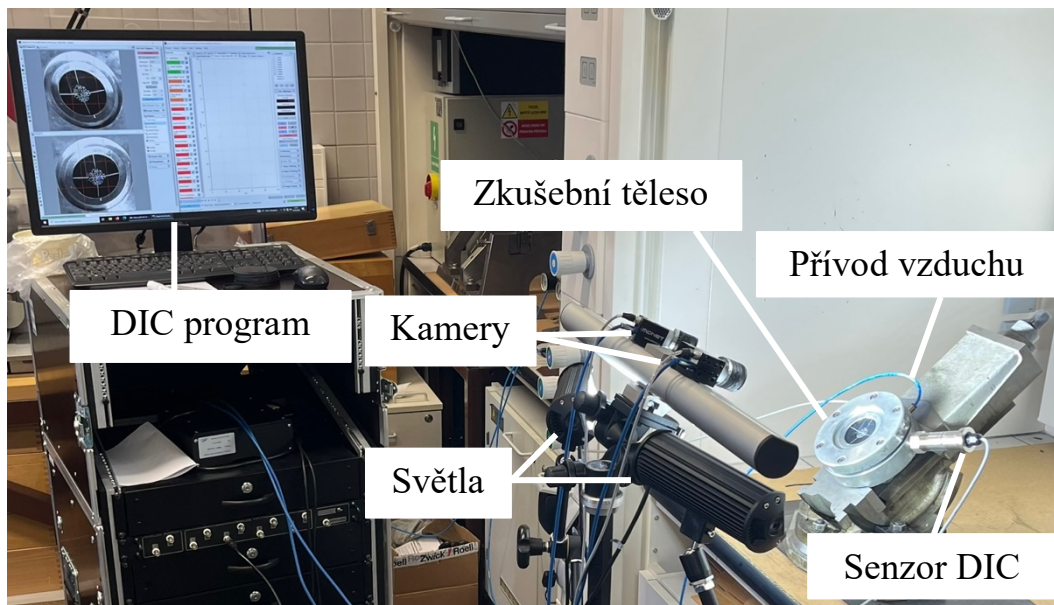
výpočetní vztahy dle kapitoly 3 a na základě těchto vztahů byly zadány na vykreslování požadované grafické závislosti objemového modulu pružnosti  $K$  na protažení  $\lambda$  a Poissonova čísla  $\nu$  na protažení  $\lambda$  ze kterých bude dále stanoveno Poissonovo číslo, které bude následně použito k vyhodnocování dat u zkoušky dvouosým tahem.



Obr. 4.3: Zkušební těleso – a) příprava před měřením, b) vstupní parametry, c) protažení  $\lambda$  200 % a d) protažení  $\lambda$  300 %

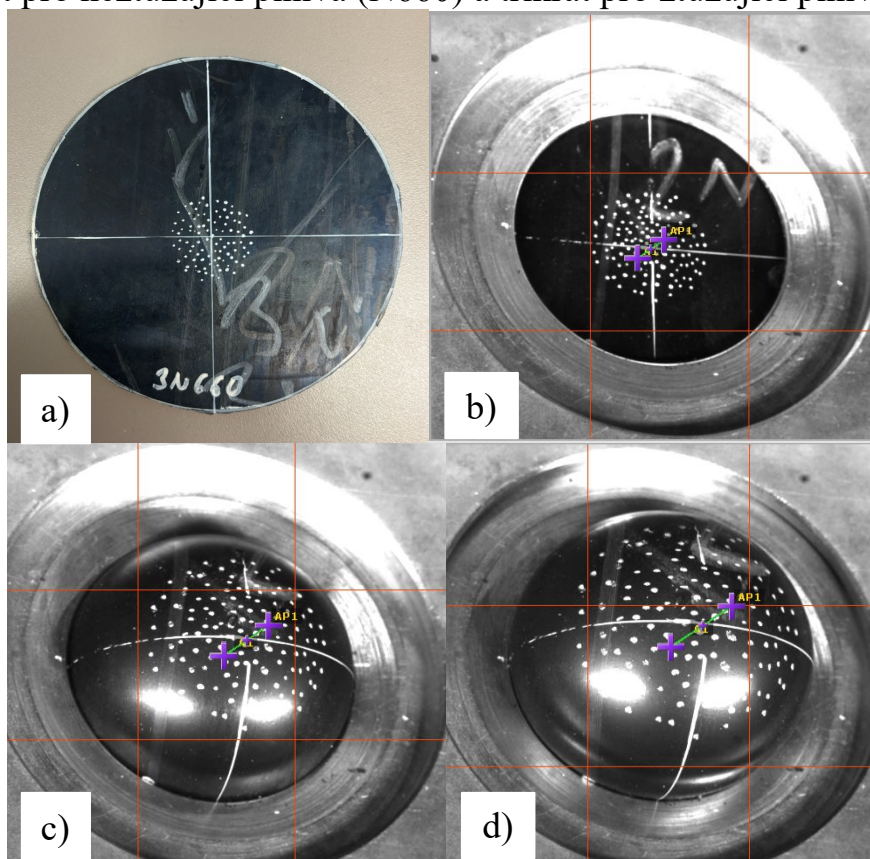
#### 4.2.2 Měření dvouosým tahem

Byl použit speciální přípravek pro experimentální měření dvouosé napjatosti, kdy je zkušební těleso kruhového tvaru (obr. 4.1) upnuto mezi dva kovové prstence a zajištěno pomocí šesti šroubů umístěných po obvodu prstenců. Následně je jednou stranou přiváděn vzduch pod tlakem, který zkušební těleso nafukuje. Deformace byly zaznamenávány DIC zařízením s výpočetním programem Mercury RT skládajícím se ze stejných komponent jako u měření jednoosým tahem (kap. 4.2.1) a tlak byl měřen pomocí manometru BD Sensors DMP 33 s rozsahem měření 0–6 barů a přesností 0,125 % FSO. Rozmístění DIC zařízení vůči zkušebnímu tělesu upnutému v přípravku s přívodem vzduchu (obr. 4.4) zahrnovalo i senzor pro měření zatížení, který byl propojen s DIC zařízením. Při měření dvouosým tahem byly kamery s maximální snímkovou frekvencí 90 snímků za sekundu a rozlišením 4 Mpx umístěny ve vzdálenosti 360 mm od povrchu zkušebního tělesa. Kamery svíraly úhel  $26^\circ$  a snímání probíhalo rychlostí 5 snímků za sekundu. Zaznamenané snímky měly rozlišení  $1384 \times 1358$  px a velikost jednoho pixelu byla  $5,5 \times 5,5 \mu\text{m}$ . Kalibrace kamer byla také provedena pomocí kalibrační mřížky se vzdáleností bodů 2 mm, vypočtená průměrná chyba reprojekce dosáhla hodnoty 0,3 px.



Obr. 4.4 Experimentální zařízení pro měření dvouosým tahem

Za laboratorní teploty 21 °C probíhalo zatěžování zkušebního tělesa postupným zvyšováním tlaku přiváděného vzduchu. Pro každou směs byla provedena jedna série měření zkušebních těles kruhového tvaru po 10 kusech, celkem tedy šest sérií, třikrát pro neztužující plniva (N660) a třikrát pro ztužující plniva (N220).



Obr. 4.5: Zkušební těleso – a) příprava před měřením, b) vstupní parametry, c) protažení  $\lambda$  150 %, d) protažení  $\lambda$  200 %

Pro dvouosý tah byla použita tělesa kruhového tvaru, která byla opatřena skvrnitým vzorem aplikovaným bílým fixem. Středová oblast určená k vyhodnocování deformace byla vyznačena křížem a soustřednou kružnicí o poloměru 10 mm. Deformace byly snímány do hodnoty skutečné poměrné deformace  $\varepsilon_t = 100\%$  odpovídající protažení  $\lambda_t = 200\%$  ( $\lambda_t = 2$ ). Dosažení vyšší deformace nebylo možné vzhledem k provoznímu limitu zařízení a riziku porušení zkušebních těles. Výpočetní podoblast byla nastavena na velikost  $40 \times 40$  px. V softwaru Mercury RT byly použity výpočetní vztahy uvedené v kapitole 3, přičemž pro výpočty bylo uvažováno Poissonovo číslo stanovené z měření při jednoosém zatěžování. Na základě těchto vstupů byly vykresleny závislosti objemového modulu pružnosti  $K$  na protažení  $\lambda$ .

### 4.3 VÝSLEDKY

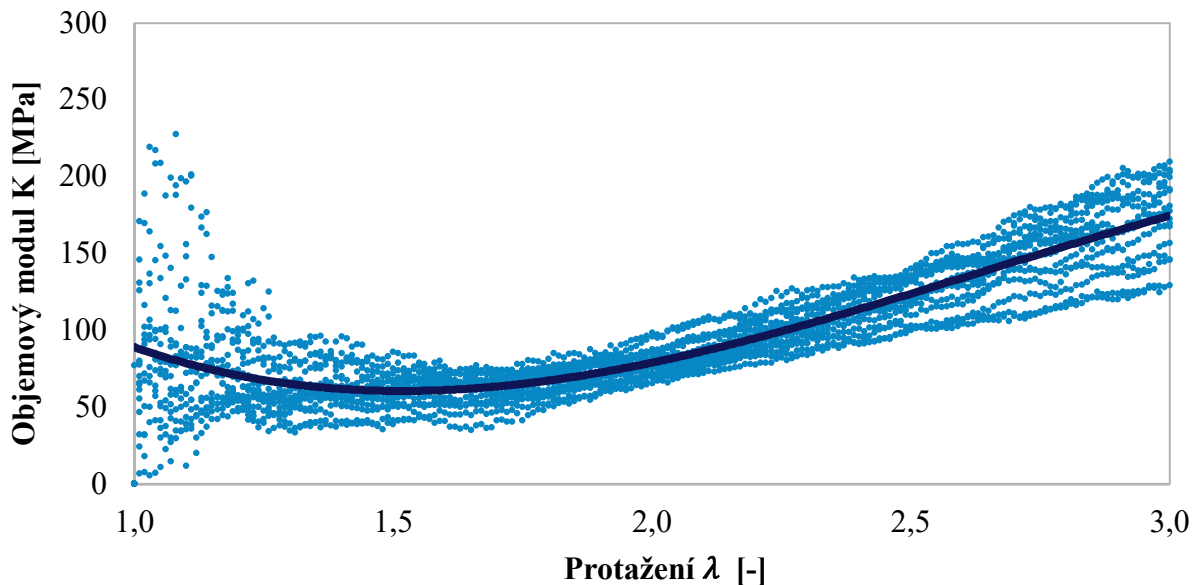
Celkem bylo vyrobeno a testováno šest sérií zkušebních těles, jejichž složení se liší v druhu použitých sazí (N220, N660) a hmotnostním zastoupení těchto sazí v gumárenské směsi (60, 80, 100 dsk). Pro každou měřenou směs bylo při jednoosém zatěžování testováno 15 zkušebních těles a pro dvouosý tah bylo testováno 10 zkušebních těles. Tato podkapitola prezentuje dílčí výsledky z měření objemových změn metodou DIC. Uvedeny jsou vybrané směsi – 1N660 (neztužující, 60 dsk) a 1N220 (ztužující, 60 dsk), a to pro oba způsoby zatěžování. U dvouosého tahu jsou zahrnuty varianty s konstantním Poissonovým číslem  $\nu$  a s Poissonovým číslem jako funkcí protažení  $\lambda$ . Výsledky ukazují průběhy objemového modulu  $K$  a Poissonova čísla  $\nu$  v závislosti na  $\lambda$  a jsou interpretovány s ohledem na typ plniva, jeho koncentraci a míru deformace.

#### 4.3.1 Jednoosý tah

Zkušební tělesa všech šesti směsí byla testována jednoosým tahem s využitím metody DIC, kdy pro každou směs bylo provedeno 15 měření. Naměřená data byla interpolována [40] s využitím výpočetních vztahů uvedených v kap. 3.1 a dále zpracována do podoby průměrné křivky pro každou sledovanou závislost. V rámci předzpracování byla provedena grafická kontrola základních charakteristik dat. Na základě fyzikálního předpokladu, že hodnota objemového modulu  $K$  nemůže být záporná, byla měření vykazující záporné hodnoty označena za chybová a vyřazena z další analýzy. Nástroji v programech MiniTab®17 a QC-Expert 3.3 byly navrženy regresní modely a ověřena významnost statistických parametrů průměrných křivek proložených polynomem. Odhady těchto parametrů jsou uvedeny v tabulkách doplňujících grafy závislostí objemového modulu pružnosti  $K$  a Poissonova čísla  $\nu$  na protažení  $\lambda$ . Naměřená data jsou v grafech světle modrá, proložené křivky tmavě modré.

Závislost objemového modulu na protažení pro směs 1N660 je zobrazena na obrázku 4.6. Širší rozptyl naměřených dat v oblasti nízkých deformací je důsledkem nižší rozlišitelnosti metody DIC právě v této oblasti, což bylo

pozorováno i při předcházejících experimentálních měřeních. Tento jev se tedy opakuje ve všech dalších měřeních. Statistické hodnoty naměřených dat jsou uvedeny v tabulce 4.1. Data byla proložena polynomem třetího řádu, kdy tento regresní model je dostatečně významný pro popis daných dat (tabulka 4.2).



Obr. 4.6: Závislost objemového modulu  $K$  na protažení  $\lambda$  pro směs 1N660

V počáteční fázi deformace lze pozorovat pokles objemového modulu. V této oblasti dochází k restrukturalizaci polymerních řetězců (orientují se ve směru zatěžování), čímž dochází k uvolnění vnitřních napětí a přechodnému snížení tuhosti. Vzhledem k druhu a množství plniva není prostorová struktura tak výrazně omezena jako u dalších směsí. Pokles objemového modulu ustává postupným dosahováním rovnováhy mezi natahováním polymerní sítě a podporou poskytovanou dispergovanými částicemi plniva. Přestože je obsah plniva nízký a jedná se o neztužující plnivo, jeho přítomnost částečně omezuje objemové změny, a tím zvyšuje odpor proti deformaci. Při vyšších protaženích ( $\lambda$  vyšší než 2) dochází ke zřetelnému nárůstu objemového modulu. Polymerní řetězce již jsou v této oblasti ve značné míře orientované ve směru zatížení, čímž se snižuje jejich schopnost se dále reorganizovat. U přírodního kaučuku je také možná částečná krystalizace vlivem namáhání, což dále zvyšuje tuhost systému, a tedy odolnost vůči objemovým změnám.

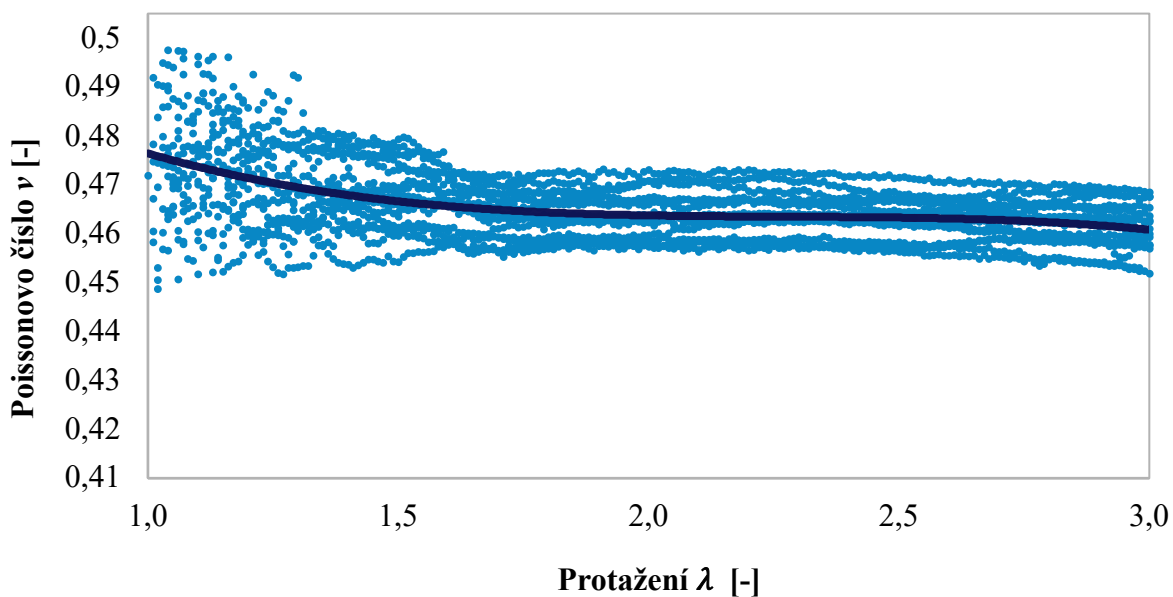
Tabulka 4.1: Statistické hodnoty  $K$  pro směs 1N660

Protažení $\lambda$	Průměr	Směrodat. odchylka	Minimum	Maximum	Medián
1,25	63,07	21,52	39,63	114,15	53,69
1,50	60,54	12,86	38,79	85,78	61,32
1,75	63,46	10,44	41,23	77,82	65,00
2,00	79,33	10,20	65,24	77,82	76,47
2,25	100,36	13,19	82,05	122,24	97,91
2,50	121,21	14,04	99,83	122,24	120,62
2,75	146,31	21,53	111,15	178,32	152,51
3,00	174,37	25,17	129,13	209,43	172,50

Tabulka 4.2: Charakteristika regresního modelu závislosti  $K$  na  $\lambda$  pro 1N660

Odhad regresních parametrů				
$K = b_0 + b_1 \lambda + b_2 \lambda^2 + b_3 \lambda^3 + \varepsilon$	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$
	368,72	-468,95	216,69	-27,31
Charakteristiky regresního modelu				
Korelační koeficient $R$	0,996			
Koeficient determinace $R^2$	0,992			
Predikovaný korelační koeficient $R_p$	0,991			
Střední kvadratická chyba predikce	7,85 MPa			
Akaikeho informační kritérium	838,45			
Charakteristika regresního modelu				
Fisher-Snedecorův test	model je významný			

Grafická závislost Poissonova čísla na protažení pro směs 1N660 je zobrazena na obrázku 4.7. Platí zde stejné omezení měřící metody v oblasti nízkých deformací a data byla vyhodnocena stejným postupem jako u předchozí závislosti (statistické hodnoty souboru naměřených dat tabulka 4.3, proložení průměrných dat polynomicou závislostí tabulka 4.4). Poissonovo číslo vykazuje u této směsi mírný pokles v závislosti na protažení. Nízká koncentrace plniv ponechává polymerní matici dostatečně tvárnou a umožňuje rovnoměrné rozložení deformace. Materiál si tak zachovává vysokou míru objemové stálosti i při rostoucím protažení. Charakter závislosti odpovídá také pozorovanému průběhu závislosti objemového modulu (obr. 4.6), kdy nedochází k významnému narušení struktury, což potvrzuje i stabilní Poissonovo číslo.



Obr. 4.7: Závislost Poissonova čísla  $\nu$  na protažení  $\lambda$  pro směs 1N660

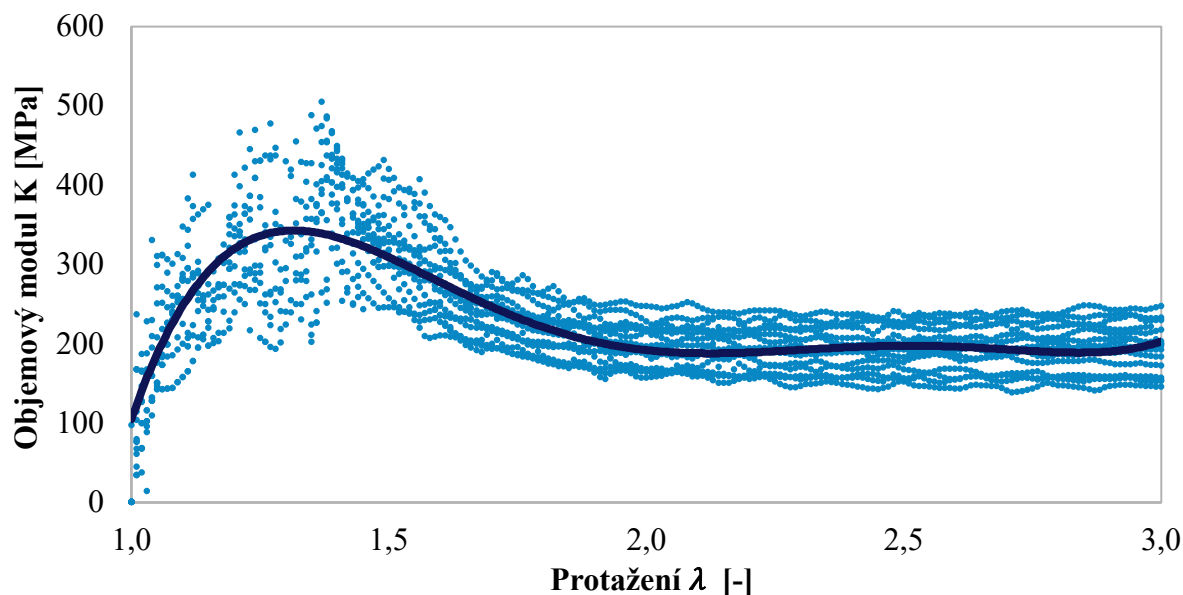
Tabulka 4.3 Statistické hodnoty  $\nu$  pro směs 1N660

Protažení $\lambda$	Průměr	Směrodat. odchylka	Minimum	Maximum	Medián
1,25	0,4701	0,0103	0,4531	0,4882	0,4701
1,50	0,4677	0,0076	0,4542	0,4794	0,4672
1,75	0,4635	0,0054	0,4561	0,4713	0,4632
2,00	0,4638	0,0052	0,4573	0,4713	0,4628
2,25	0,4640	0,0049	0,4575	0,4725	0,4636
2,50	0,4630	0,0044	0,4563	0,4725	0,4634
2,75	0,4620	0,0044	0,4543	0,4699	0,4631
3,00	0,4611	0,0046	0,4518	0,4684	0,4610

Tabulka 4.4: Charakteristika regresního modelu závislosti  $\nu$  na  $\lambda$  pro 1N660

Odhad regresních parametrů				
$\nu = b_0 + b_1 \lambda + b_2 \lambda^2 + b_3 \lambda^3 + \varepsilon$	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$
		0,5346	-0,0929	0,0407
Charakteristiky regresního modelu				
Korelační koeficient R	0,979			
Koeficient determinace $R^2$	0,959			
Predikovaný korelační koeficient $R_p$	0,975			
Střední kvadratická chyba predikce	0,0223			
Akaikeho informační kritérium	-1533,95			
Charakteristika regresního modelu				
Fisher-Snedecorův test	model je významný			

Objemový modul v závislosti na protažení je pro kaučukovou směs 1N220, která obsahuje 60 dsk ztužujících plniv N220, zobrazen na obrázku 4.8. Průměrná data z naměřených dat jsou proložena polynomem pátého řádu. Charakteristika regresního modelu je uvedena v tabulce 4.5. Statistické hodnoty naměřených dat jsou uvedeny v tabulce 4.6.



Obr. 4.8: Závislost objemového modulu  $K$  na protažení  $\lambda$  pro směs 1N220

Ztužující saze N220 poskytují zpevňující účinek, který je patrný z nárustu objemového modulu v oblasti malých deformací. Po dosažení maximální hodnoty dochází k přerušení části interakcí matrice-plnivo v důsledku narůstajícího napětí. Polymerní síť se začíná přeuspořádávat, dochází k rozvolňování původních vazeb a celková schopnost směsi odolávat objemovým změnám se snižuje. Od hodnoty protažení  $\lambda \approx 2$  dochází ustálení průběhu a hodnota objemového modulu se zdá relativně konstantní. Tento průběh nasvědčuje k dosažení určité rovnováhy mezi jevy, které zvyšují a snižují objemovou tuhost. Pokles tuhosti je dán především vlivem reorganizace polymerních řetězců. Při deformaci mají řetězce tendenci orientovat se ve směru zatížení. Tato schopnost se postupně vyčerpává a dochází k poklesu tuhosti a odolnosti vůči změnám objemu. Orientace řetězců je také doprovázena vznikem mikrotrhlin a lokálních zón snížené hustoty. Tyto jevy pak mohou mít také vliv na pokles tuhosti materiálu. Na druhé straně je pokles tuhosti kompenzován obsahem ztužujícího plniva. Menší velikost primárních částic, složitost aglomerátů, vysoký měrný povrch a schopnost interakcí s polymerem zapříčiňují vznik fyzikálních, mechanických zámkových a chemických vazeb v řetězci. Tyto vazby pak mají významný vliv na zachování objemového modulu při zatížení.

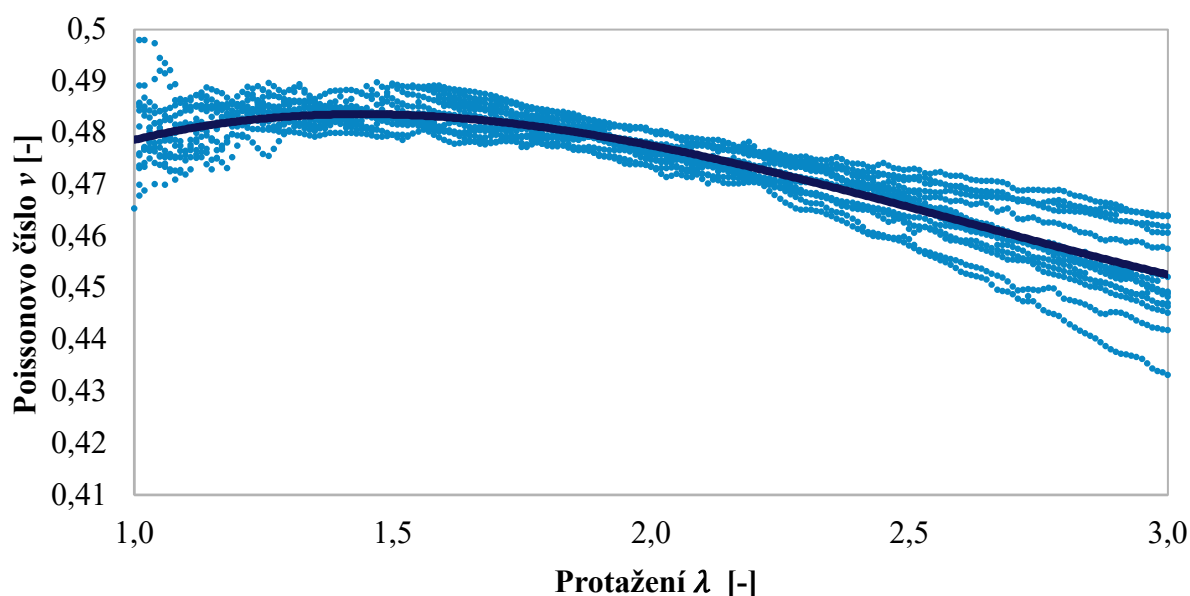
Tabulka 4.5: Statistické hodnoty  $K$  pro směs 1N220

Protažení $\lambda$	Průměr	Směrodat. odchylka	Minimum	Maximum	Medián
1,25	330,91	84,76	206,73	430,56	334,61
1,50	319,55	48,75	245,41	419,86	312,52
1,75	228,01	30,69	185,21	280,44	235,52
2,00	200,19	25,67	163,97	280,44	201,52
2,25	196,84	25,85	158,31	241,52	193,84
2,50	194,64	25,59	155,05	241,52	194,44
2,75	196,76	27,37	155,57	236,74	195,65
3,00	195,77	31,03	152,74	247,30	199,56

Tabulka 4.6: Charakteristika regresního modelu závislosti  $K$  na  $\lambda$  pro 1N220

Odhad regresních parametrů			
$K = b_0 + b_1 \lambda + b_2 \lambda^2 + b_3 \lambda^3 + b_4 \lambda^4 + b_5 \lambda^5 + \varepsilon$	$b_0$	$b_1$	$b_2$
	-14463	38033	-37675
	$b_3$	$b_4$	$b_5$
	18022	-4193,4	381,58
Charakteristiky regresního modelu			
Korelační koeficient $R$	0,965		
Koeficient determinace $R^2$	0,932		
Predikovaný korelační koeficient $R_p$	0,960		
Střední kvadratická chyba predikce	17,42 MPa		
Akaikeho informační kritérium	1164,48		
Charakteristika regresního modelu			
Fisher-Snedecorův test	model je významný		

Průběh závislosti Poissonova čísla na protažení je uveden v grafu na obrázku 4.9. Pro regresní model průměru naměřených dat byl využit polynom třetí řádu (tabulka 4.7). Statistické hodnoty z naměřených dat souboru hodnot jsou uvedeny v tabulce 4.8. V oblasti malých deformací je pozorován mírný nárůst hodnot Poissonova čísla, který lze přisoudit aktivaci fyzikálních a mechanických interakcí mezi polymerem a plnivem. S rostoucí deformací nastává orientace polymerních řetězců ve směru tahu, a tím i k omezení jejich schopnosti příčně expandovat. Postupně se rozvolňují strukturální vazby a dochází ke ztrátě kontaktu mezi polymerem a plnivem. Tyto jevy vedou ke zvýšení citlivosti materiálu na objemové změny, a to se přímo projevuje poklesem Poissonova čísla. Výsledek koresponduje se závislostí objemového modulu, kde také po počátečním zpevnění následuje ustálený průběh.



Obr. 4.9: Závislost Poissonova čísla  $\nu$  na protažení  $\lambda$  pro směs 1N220

Tabulka 4.7: Statistické hodnoty  $\nu$  pro směs 1N220

Protažení $\lambda$	Průměr	Směrodat. odchylka	Minimum	Maximum	Medián
1,25	0,4844	0,0034	0,4759	0,4884	0,4852
1,50	0,4838	0,0032	0,4795	0,4895	0,4833
1,75	0,4810	0,0027	0,4773	0,4854	0,4809
2,00	0,4766	0,0021	0,4734	0,4854	0,4762
2,25	0,4730	0,0026	0,4693	0,4759	0,4742
2,50	0,4668	0,0042	0,4582	0,4759	0,4672
2,75	0,4597	0,0066	0,4465	0,4689	0,4580
3,00	0,4532	0,0097	0,4332	0,4654	0,4492

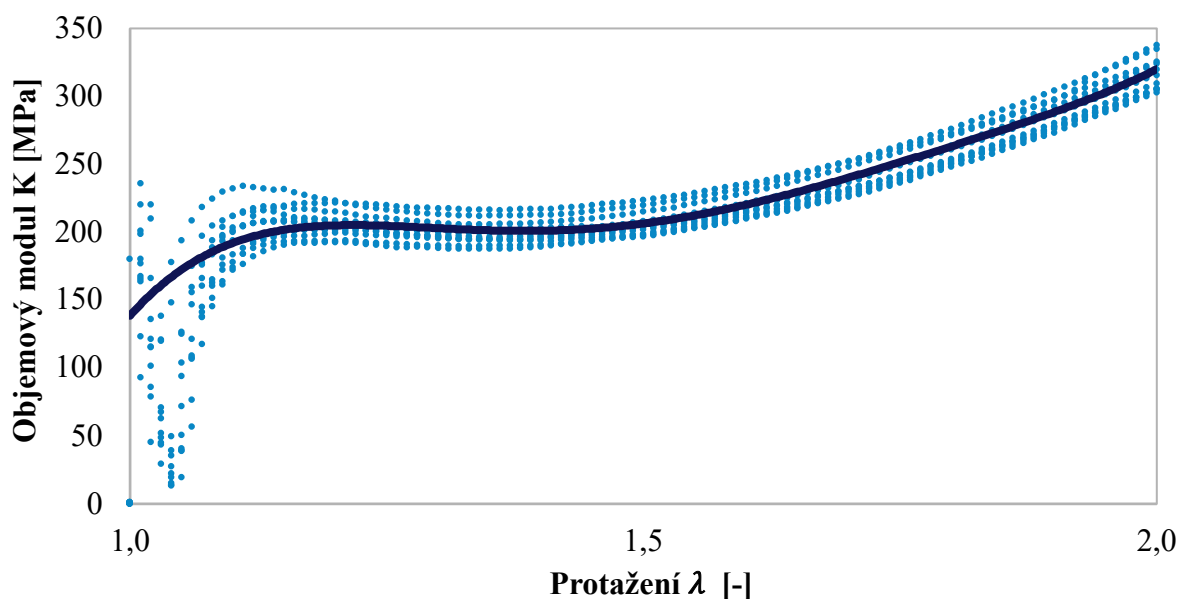
Tabulka 4.8: Charakteristika regresního modelu závislosti  $\nu$  na  $\lambda$  pro 1N220

Odhad regresních parametrů				
$\nu = b_0 + b_1 \lambda + b_2 \lambda^2 + b_3 \lambda^3 + \varepsilon$	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$
		0,4168	0,1065	-0,0511
Charakteristiky regresního modelu				
Korelační koeficient R	0,992			
Koeficient determinace $R^2$	0,984			
Predikovaný korelační koeficient $R_p$	0,988			
Střední kvadratická chyba predikce	0,0148			
Akaikeho informační kritérium	-1693,56			
Charakteristika regresního modelu				
Fisher-Snedecorův test	model je významný			

### 4.3.2 Dvouosý tah

Měření dvouosým tahem probíhalo dle postupu uvedeného v kapitole 4.2. Pro každou směs bylo testováno 10 zkušebních těles. Naměřená data byla zpracována interpolací s využitím výpočetních vztahů z kapitoly 3.1. Zkušební tělesa byla deformována pouze do protažení  $\lambda = 2$ , kvůli provozním limitům zkušebního aparátu a zvýšenému riziku poškození při vyšších deformacích. Vzhledem ke konstrukci zkušebního přípravku a charakteru zatěžování nebylo možné zaznamenat příčné zúžení v reálném čase, a tedy ani přímo určit Poissonovo číslo  $\nu$ . Z tohoto důvodu byly pro výpočet objemového modulu  $K$  zvoleny dva přístupy. Prvním bylo použití konstantní hodnoty  $\nu$ , kdy byla zvolena hodnota mediánu z měření při jednoosém zatěžování jako reprezentativní vzhledem k poklesu  $\nu$  s rostoucí deformací. Druhým bylo využití hodnoty  $\nu$  ze zkoušky jednoosým tahem ve formě závislosti  $\nu = f(\lambda)$  a zohledňuje tak nelineární vývoj  $\nu$  i chování směsi při větších deformacích. Před zpracováním byla data vizuálně zkontrolována a hodnoty odporující fyzikálním předpokladům byly vyřazeny. Následně byly v programech Minitab® 17 a QC-Expert 3.3 navrženy regresní modely a provedeno statistické vyhodnocení. Výsledky jsou znázorněny obdobným způsobem jako u jednoosého zatěžování – průměrné hodnoty světle modrou barvou, proložené polynomy tmavě modře.

Závislost objemového modulu na protažení pro směs 1N660 při dvouosém namáhání s uvažovaným konstantním Poissonovým číslem ( $\nu = 0,4735$ ) je zobrazena na obrázku 4.10. I při dvouosém namáhání je patrný rozptyl dat při nízkých deformacích, který odpovídá rozlišitelnosti měřicí metody DIC. Tento jev je pozorován ve všech dalších měřeních. Statistické hodnoty tohoto měření jsou zapsány v tabulce 4.9, charakteristiky regresního modelu prokládaného polynomu šestého řádu jsou zapsány v tabulce 4.10.



Obr. 4.10: Závislost objemového modulu  $K$ ,  $\nu = \text{konst.}$  na protažení  $\lambda$  pro směs 1N660

V grafu na obrázku 4.10 je pozorovatelný prvotní nárůst objemového modulu odpovídající základní tuhosti materiálu. Vlivem restrukturalizace polymerní sítě (orientace řetězců ve směru namáhání) dochází následně k mírnému poklesu objemového modulu. Od zhruba poloviny měřeného rozsahu deformace je patrný výrazný růst objemového modulu. Možnost reorganizace polymerních řetězců je v této fázi značně vyčerpaná, přítomnost plniv navíc podporuje odpor proti deformaci (i přesto, že se jedná o neztužující plniva). Opticky hladký průběh křivek je dán uvažovaným konstantním Poissonovým číslem.

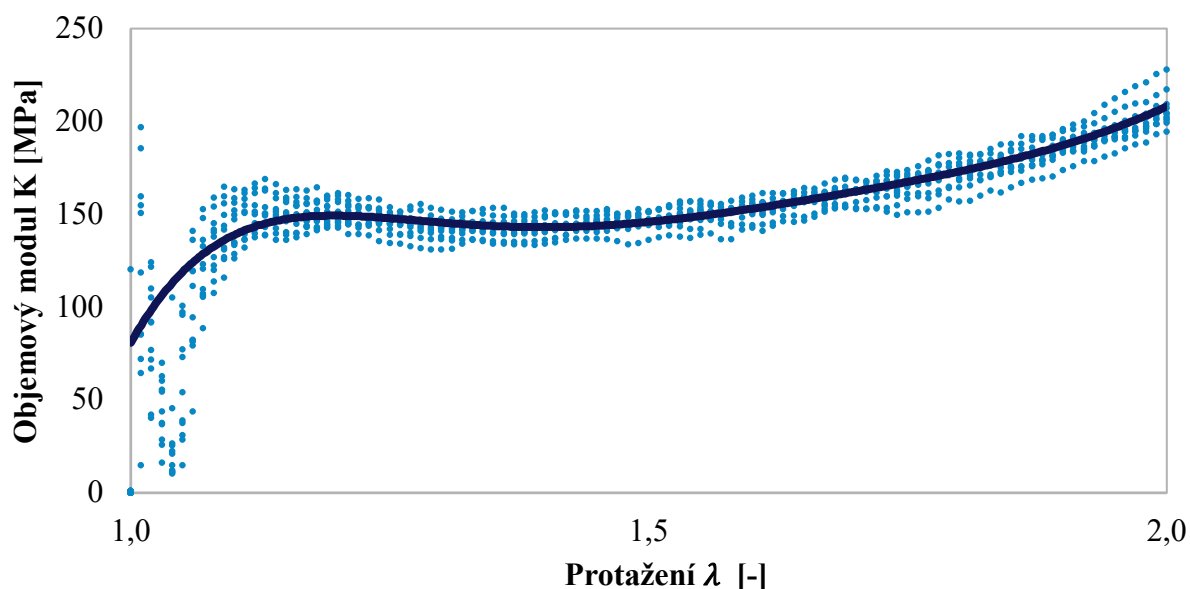
Tabulka 4.9: Statistické hodnoty  $K$ ,  $\nu = \text{konst.}$  pro směs 1N660

Protažení $\lambda$	Průměr	Směrodat. odchylka	Minimum	Maximum	Medián
1,25	202,99	9,96	189,58	219,64	199,63
1,50	206,80	9,45	196,79	223,54	203,90
1,75	248,05	10,26	236,07	263,38	245,46
2,00	316,43	13,12	302,48	337,64	312,42

Tabulka 4.10: Charakteristika regresního modelu závislosti  $K$  na  $\lambda$  pro 1N660

Odhad regresních parametrů				
$K = b_0 + b_1 \lambda + b_2 \lambda^2 + b_3 \lambda^3 + b_4 \lambda^4 + b_5 \lambda^5 + b_6 \lambda^6 + \varepsilon$	$b_0$	$b_1$	$b_2$	
	-18331	56903	-66514	
	$b_3$	$b_4$	$b_5$	$b_6$
	35250	-6756,2	-733,22	319,76
Charakteristiky regresního modelu				
Korelační koeficient $R$	0,983			
Koeficient determinace $R^2$	0,967			
Predikovaný korelační koeficient $R_p$	0,979			
Střední kvadratická chyba predikce	46,93 MPa			
Akaikeho informační kritérium	806, 82			
Charakteristika regresního modelu				
Fisher-Snedecorův test	model je významný			

Závislost objemového modulu stejné směsi (1N660 – neztužující plniva, 60 disk) na protažení při dvouosém namáhání při uvažování Poissonova čísla jako funkce protažení je zobrazena na obrázku 4.11. Pro vyhodnocení dat byla průměrná křivka proložena regresním modelem (tabulka 4.12) a statistické hodnoty naměřeného souboru dat jsou uvedeny v tabulce 4.11. Průběh závislosti (obr. 4.11) je velmi obdobný jako při uvažování Poissonova čísla jako konstanty (obr. 4.10), je však dosaženo nižších absolutních hodnot naměřeného objemového modulu.



Obr. 4.11: Závislost objemového modulu  $K$ ,  $\nu = f(\lambda)$  na protažení  $\lambda$  pro směs 1N660

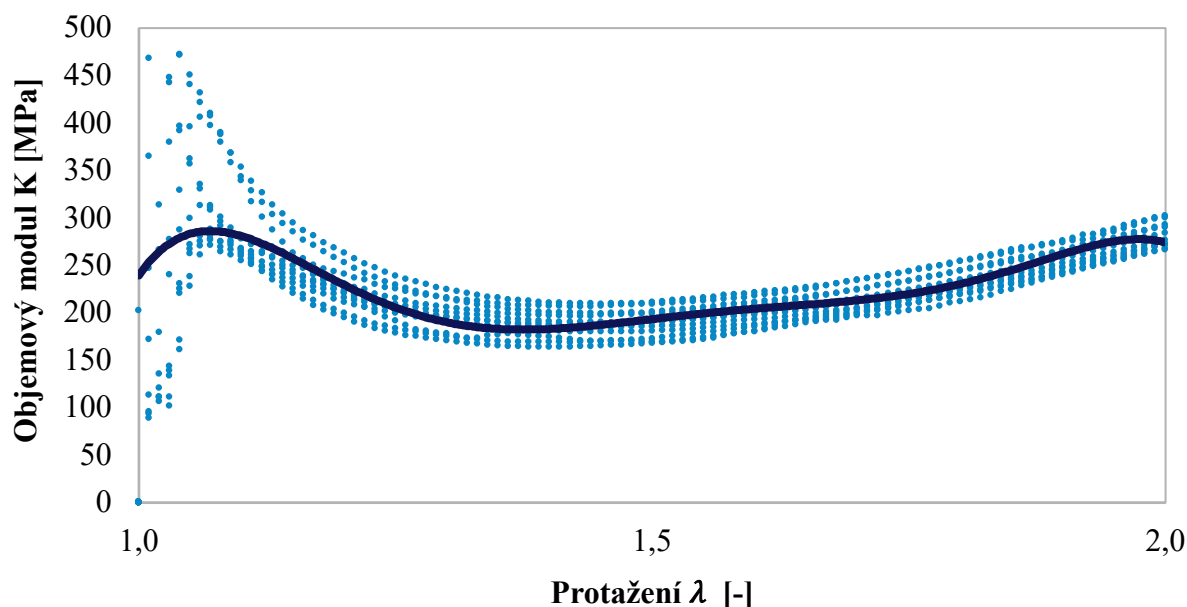
Tabulka 4.11: Statistické hodnoty  $K$ ,  $\nu = f(\lambda)$  pro směs 1N660

Protažení $\lambda$	Průměr	Směrodat. odchylka	Minimum	Maximum	Medián
1,25	145,68	5,87	134,48	153,74	146,87
1,50	146,43	4,58	136,03	151,58	146,52
1,75	164,97	6,87	150,85	173,64	165,34
2,00	206,12	9,80	194,34	227,87	203,23

Tabulka 4.12: Charakteristika regresního modelu závislosti  $K$  na  $\lambda$  pro 1N660

Odhad regresních parametrů				
$K = b_0 + b_1 \lambda + b_2 \lambda^2 + b_3 \lambda^3 + b_4 \lambda^4 + b_5 \lambda^5 + b_6 \lambda^6 + \varepsilon$	$b_0$	$b_1$	$b_2$	
	-47161	176645	-271370	
	$b_3$	$b_4$	$b_5$	$b_6$
	219650	-98854	23466	-2295
Charakteristiky regresního modelu				
Korelační koeficient $R$	0,967			
Koeficient determinace $R^2$	0,936			
Predikovaný korelační koeficient $R_p$	0,963			
Střední kvadratická chyba predikce	26,41 MPa			
Akaikeho informační kritérium	688,42			
Charakteristika regresního modelu				
Fisher-Snedecorův test	model je významný			

Závislost objemového modulu gumárenské směsi 1N220 se ztužujícími plnivy o koncentraci 60 dsk na protažení při měření dvouosého tahu je uvedena na obrázku 4.12. Pro určení objemového modulu byla použita konstantní hodnota Poissonova čísla ( $\nu = 0,4698$ ), určená ze závislostí při testování stejné směsi při jednoosém namáhání. Statistické hodnoty souboru dat pro měření dvouosé napjatosti směsi 1N220 jsou uvedeny v tabulce 4.13. Charakteristika regresního modelu je uvedena v tabulce 4.14.



Obr. 4.12: Závislost objemového modulu  $K$ ,  $\nu = \text{konst.}$  na protažení  $\lambda$  pro směs 1N220

Celková počáteční tuhost materiálu je při deformování zpočátku snižována reorganizací polymerní sítě a porušováním některých vazeb matrice-pojivo. Možnosti orientace řetězců se vyčerpávají, navíc vůbec jejich počáteční počet je snížen přítomností a vlastnostmi plniva. Postupně začíná převažovat ztužující účinek sazí, který dále omezuje možnosti pohybu řetězců. Dochází k ustálení a postupně i růstu objemového modulu.

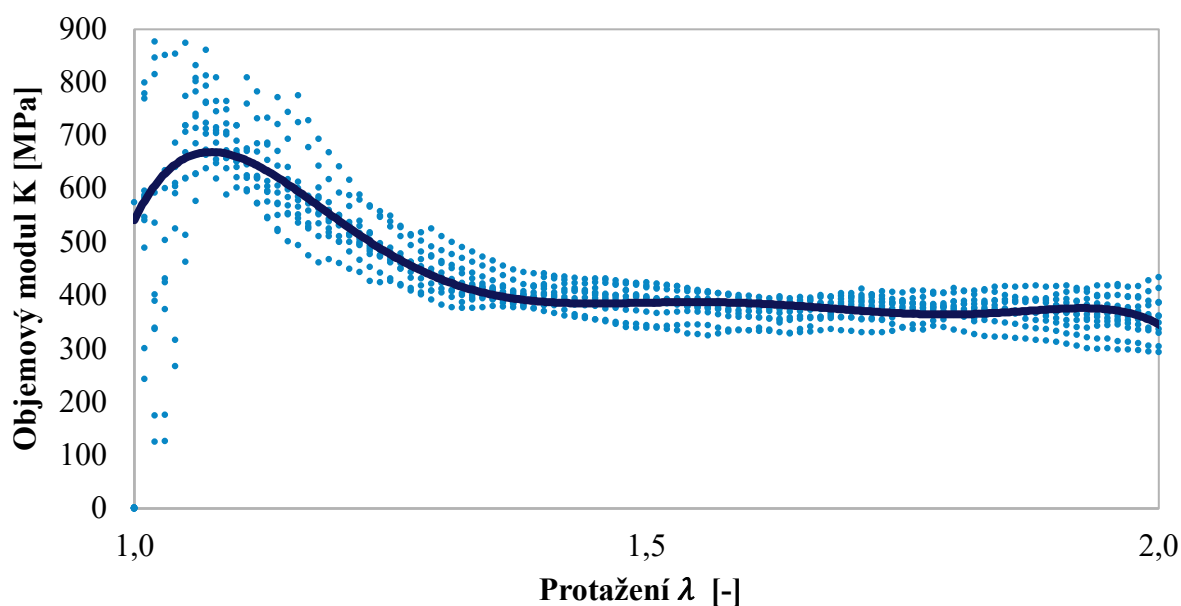
Tabulka 4.13: Statistické hodnoty  $K$ ,  $\nu = \text{konst.}$  pro směs 1N220

Protažení $\lambda$	Průměr	Směrodat. odchylka	Minimum	Maximum	Medián
1,25	207,75	19,85	178,89	239,28	207,11
1,50	188,97	15,99	168,16	211,03	188,44
1,75	222,52	15,06	202,74	243,90	217,08
2,00	281,40	13,73	266,48	302,73	274,82

Tabulka 4.14: Charakteristika regresního modelu závislosti  $K$  na  $\lambda$  pro 1N220

Odhad regresních parametrů				
$K = b_0 + b_1 \lambda + b_2 \lambda^2 + b_3 \lambda^3 + b_4 \lambda^4 + b_5 \lambda^5 + b_6 \lambda^6 + \varepsilon$	$b_0$	$b_1$	$b_2$	
	-273509	$1 \cdot 10^6$	$-2 \cdot 10^6$	
	$b_3$	$b_4$	$b_5$	$b_6$
	$2 \cdot 10^6$	-833470	217822	-23501
Charakteristiky regresního modelu				
Korelační koeficient $R$	0,975			
Koeficient determinace $R^2$	0,950			
Predikovaný korelační koeficient $R_p$	0,971			
Střední kvadratická chyba predikce	62,20 MPa			
Akaikeho informační kritérium	864,85			
Charakteristika regresního modelu				
Fisher-Snedecorův test	model je významný			

Podobný průběh vykazují i křivky a jimi proložený polynom pro závislost objemového modulu na protažení pro Poissonově číslu zadávaném jako funkce protažení (obr. 4.13). Maximální tuhost materiálu před zkouškou je snížena prvotním nárůstem napětí, který vede k natahování a pohybu polymerní sítě. Snižování objemového modulu postupně ustává. V této sledované závislosti však nedochází k nárůstu objemového modulu, který zůstává dále ustálen. To odpovídá průběhu výchozí funkční závislosti Poissonova čísla určené při jednoosém namáhání (kap 4.3.1). Statistické hodnoty souboru dat pro tyto měření jsou uvedeny v tabulce 4.15. Charakteristika použitého regresního modelu (polynom šestého řádu) je uvedena v tabulce 4.16.



Obr. 4.13: Závislost objemového modulu  $K$ ,  $v = f(\lambda)$  na protažení  $\lambda$  pro směs 1N220

Tabulka 4.15: Statistické hodnoty  $K$ ,  $\nu = f(\lambda)$  pro směs 1N220

Protažení $\lambda$	Průměr	Směrodat. odchylka	Minimum	Maximum	Medián
1,25	484,92	42,57	426,66	549,43	479,00
1,50	388,40	29,46	338,67	424,09	394,94
1,75	374,41	22,03	338,54	405,44	381,99
2,00	360,51	45,78	292,64	433,72	361,21

Tabulka 4.16: Charakteristika regresního modelu závislosti  $K$  na  $\lambda$  pro 1N220

Odhad regresních parametrů				
$K = b_0 + b_1 \lambda + b_2 \lambda^2 + b_3 \lambda^3 + b_4 \lambda^4 + b_5 \lambda^5 + b_6 \lambda^6 + \varepsilon$	$b_0$	$b_1$	$b_2$	
	-602387	$2 \cdot 10^6$	$-4 \cdot 10^6$	
	$b_3$	$b_4$	$b_5$	$b_6$
	$4 \cdot 10^6$	$-2 \cdot 10^6$	458642	-49061
Charakteristiky regresního modelu				
Korelační koeficient R	0,983			
Koeficient determinace $R^2$	0,967			
Predikovaný korelační koeficient $R_p$	0,979			
Střední kvadratická chyba predikce	24,23 MPa			
Akaikeho informační kritérium	597,91			
Charakteristika regresního modelu				
Fisher-Snedecorův test	model je významný			

## 5. DISKUZE VÝSLEDKŮ

V rámci praktické části byla připravena pryžová zkušební tělesa z kaučukové směsi obsahující dva druhy plniv (neztužující N660, ztužující N220) ve třech různých koncentracích (60, 80, 100 disk). Jako základ směsi byl použit přírodní kaučuk NR NAT 10. Celkem tedy bylo připraveno 6 sad zkušebních těles pro testování jednoosým tahem (pomocí univerzálního trhačního stroje) a 6 sad zkušebních těles pro testování dvouosým tahem (metodou nafukování stlačeným vzduchem). Při obou měřeních byla využita metoda digitální korelace obrazu (DIC) jako nástroj pro záznam a vyhodnocení provedených zkoušek.

Obecně kvalita zkušebních těles je jedním ze zásadních faktorů pro opakovatelná měření s vypovídajícími daty. Tělesa byla vyráběna dle postupu v kapitole 6.1 a jejich kvalita mohla být ovlivněna v každém z výrobních kroků. Míchání směsi pomocí hnětiče a dvouválce ovlivňuje dispergaci jednotlivých složek ve směsi, což může mít vliv na hustotu polymerní sítě a lokální obsah plniva. Při lisování za zvýšeného tlaku a teploty jsou oba faktory důležité. Rozložení teplotního pole na ploše lisu může ovlivňovat míru vulkanizace v objemu lisované desky. Stejněměrný lisovací tlak je pak zásadní pro rovnoměrnou tloušťku desky a kvalitu jejího povrchu, která je také obrazem použité lisovací formy. Při následném vysekávání zkušebních těles dochází k porušení okrajů tělesa střížným nástrojem. Podstata střížné technologie také přináší variaci ve tvaru a geometrii zkušebních těles.

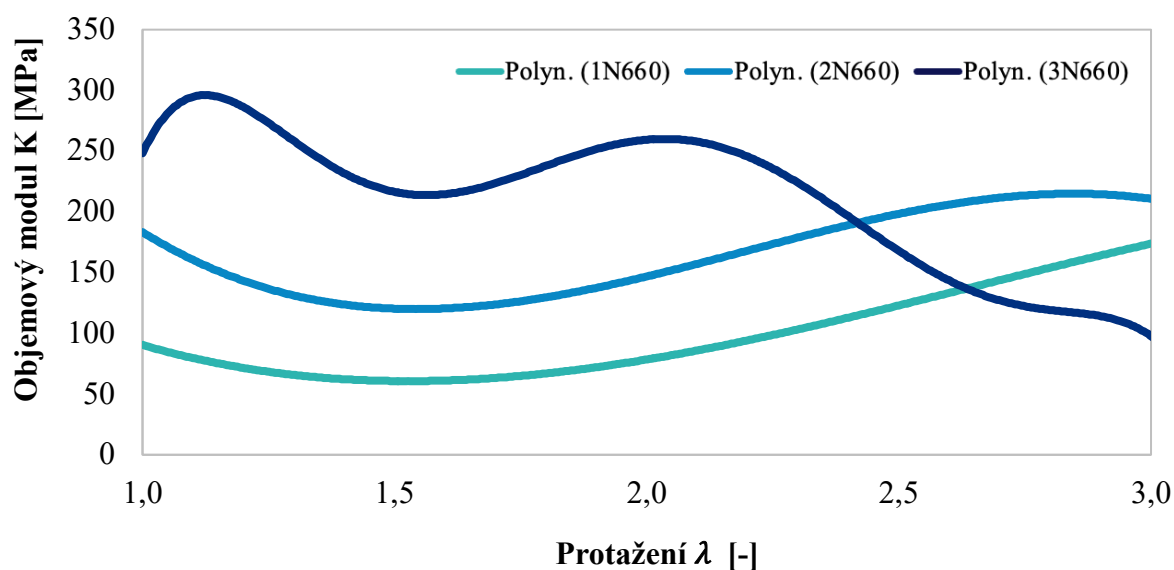
Výsledky měření jsou také ovlivněny limity metody DIC. Při malých deformacích byla naměřena a pozorována rozptýlená data, která jsou nejvíce patrná u jednoosého namáhání (kapitola 4.3.1). V těchto měřeních má vliv na přesnost zaznamenaných dat tvar zkušebního tělesa (obr. 4.1). Malá šířka v oblasti měření (6 mm) výrazně omezuje dostupnou plochu pro sledování příčného zúžení, což může negativně ovlivnit kvalitu korelace a tím i výsledná data. Kromě toho je metoda DIC citlivá na kvalitu a stabilitu skvrnitého vzoru (speckle pattern), který může být při vyšších deformacích narušen (např. roztažením vzoru mimo podoblast nebo jeho ztrátou).

Další okrajové podmínky a praktické omezení experimentu vyvstalo při měření dvouosé napjatosti. Zkušební tělesa směsí 2N220 (80 disk) a 3N220 (100 disk) bylo obtížné dostupným tlakovým vzduchem dostatečně nafouknout a dosáhnout vyšší hodnoty protažení než  $\lambda = 2$ , a to kvůli vyšší tuhosti těchto materiálů. Tlakový vzduch je navíc ovládán ručním regulačním – uzavíracím ventilem, kdy plynulost otvírání závisí zcela na obsluze aparatury. U některých směsí docházelo při vyšších deformacích k poškození těles, což by mohlo negativně ovlivnit korelační výpočty. Pro zachování srovnatelnosti výsledků mezi jednotlivými zkouškami byly data z dvouosého namáhání vyhodnocována právě do protažení  $\lambda = 2$ . Pro jednoosé namáhání bylo měření prováděno do prodloužení  $\lambda = 3$ .

## 5.1 Jednoosý tah

Data z jednoosého tahu jsou pro jednotlivé směsi přehledně zaznamenána v kapitole 4.3.1 včetně příslušných statistických hodnot a popisu graficky zobrazovaného chování.

Závislosti objemového modulu na protažení pro jednoosý tah směsí s plnivem N660 jsou zobrazeny na obrázku 5.1. Jedná se o polynomy regresních modelů naměřených dat. Pro směsi 1N660 (60 dsk) a 2N660 (80 dsk) bylo použito proložení polynomem třetího řádu poskytujícího dostatečnou významnost modelu, pro směs 3N660 (100 dsk) pak polynom šestého řádu s ohledem na složitější průběh. Hodnoty byly stanoveny jako průměrné z 15 interpolovaných křivek, výsledný průběh tedy do určité míry odráží variabilitu měření.



Obr. 5.1: Závislost objemového modulu  $K$  na protažení  $\lambda$  pro plnivo N660

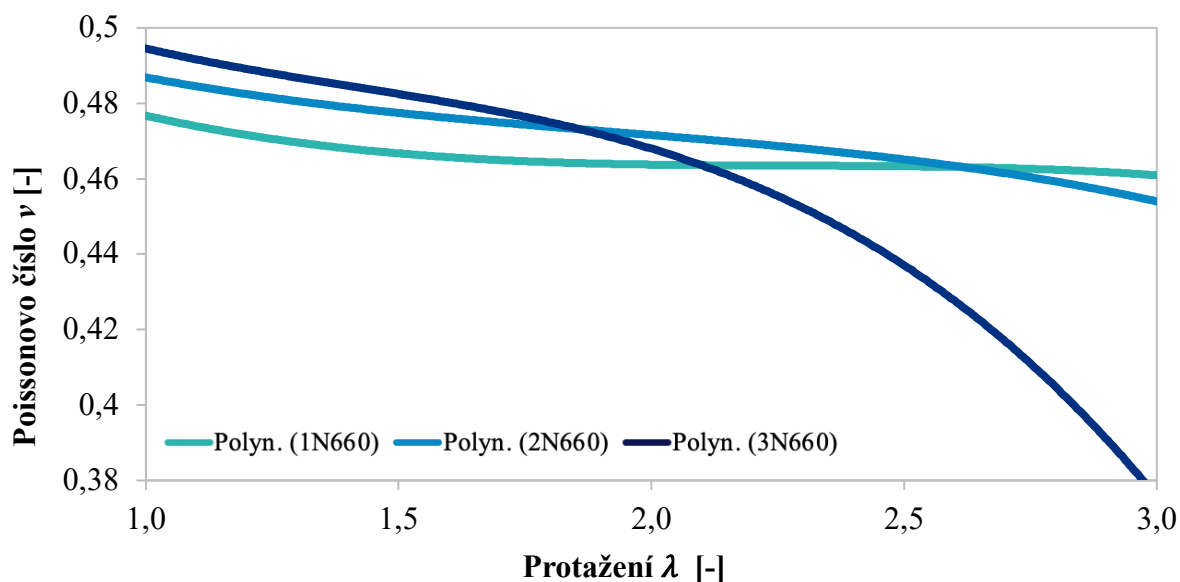
Dle grafů vycházejících z prováděných měření u směsí 1N660 (60 dsk) a 2N660 (80 dsk) je patrný stejný počáteční charakter závislosti jako u směsi 3N660 (100 dsk), tedy nárůst objemového modulu. Hodnota objemového modulu na počátku zatěžování tedy odpovídá hodnotě objemového modulu materiálu ve výchozím stavu. Počáteční tuhost je vyšší s rostoucí koncentrací plniv. Neztužující saze tedy při vyšších koncentracích přispívají k nárůstu počáteční objemové tuhosti materiálu vlivem svého fyzikálního plnicího účinku.

Vlivem reorganizace řetězců ve směru zatěžování nastává pokles objemové tuhosti. S rostoucí koncentrací neztužujících plniv je intenzita poklesu výraznější (křivka je strmější) a lokální minimum modulu je zároveň u vyšší koncentrace plniva dosaženo při vyšší deformaci. Lze předpokládat, že mechanismus restrukturalizace řetězců je s rostoucí koncentrací neztužujících plniv rychlejší vlivem narušení kontinuity polymerní sítě a vznikem lokálních oblastí, které podporují směrovou deformaci.

Po vyčerpání možnosti reorganizace polymerní sítě následuje oblast dočasného nárůstu objemového modulu, která může souviset s orientací řetězců ve směru

zatěžování a omezením pohybu segmentů. U směsi 1N660 není konec tohoto růstu v měřeném rozsahu deformace pozorován. Směs 2N660 vykazuje konec růstu a začátek poklesu objemového modulu v okolí hodnoty  $\lambda \approx 2,8$ . Při největší koncentraci plniv (3N660) je tato oblast pozorovatelná již při hodnotě protažení okolo  $\lambda \approx 2$ . U této směsi je navíc patrný velmi prudký pokles objemového modulu, který naznačuje narušení vnitřní struktury materiálu, zejména rozpad interakcí mezi polymerní matricí a plnivem i kolaps samotných aglomerátů plniva). Na základě tohoto chování lze konstatovat, že při rostoucím zatížení se neztužující saze stávají slabým mechanickým článkem, které nepřispívají k přenosu mechanického zatížení mezi řetězci polymerní sítě. Ztráta odolnosti vůči objemovým změnám nastává, dle závislosti na obrázku 8.1, se zvyšující se koncentrací neztužujících sazí N660 při nižší hodnotě protažení.

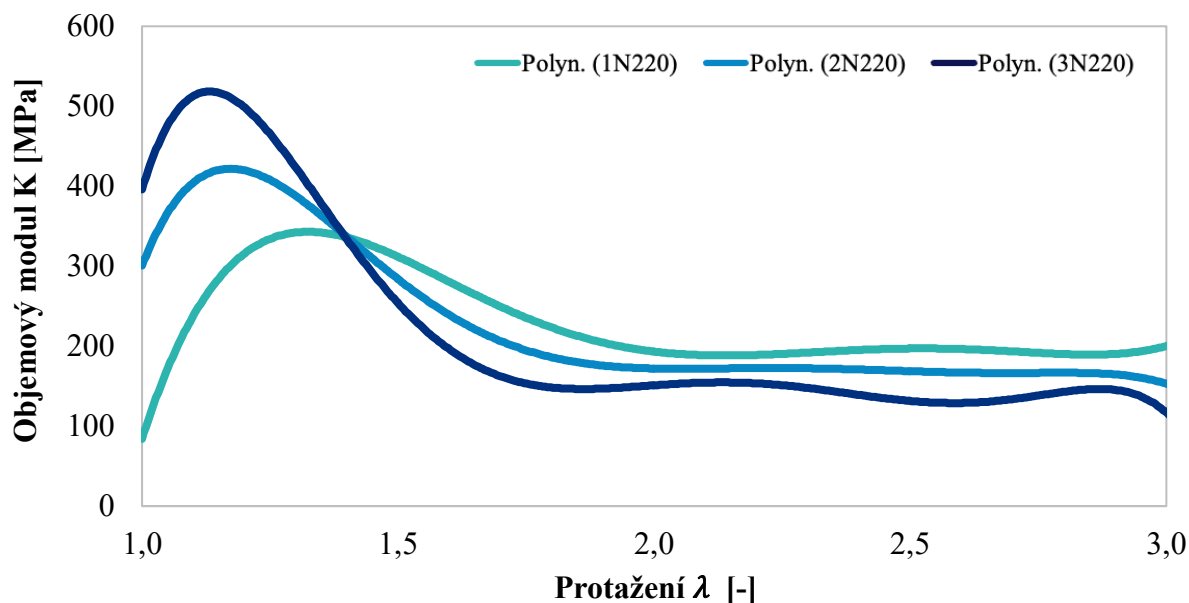
Pro směsi obsahující saze N660 je dále zobrazena závislost Poissonova čísla na protažení při jednoosém namáhání na obrázku 5.2. Průběh těchto závislostí odpovídá chování závislostí objemového modulu na protažení (obr. 5.1). Nejvyšší hodnoty Poissonova čísla, a tedy i nejvyšší míru nestlačitelnosti, vykazuje na počátku zatěžování směs s nejvyšší koncentrací sazí. Poissonovo číslo při zatížení postupně klesá, přičemž u směsi s neztužujícími plnivy je patrná tendence prudšího poklesu po překročení určité úrovně deformace. Tento jev je výrazně pozorovatelný u směsi 3N660 s koncentrací plniva 100 dsk při protažení okolo  $\lambda \approx 2$ , což koresponduje s výsledky objemového modulu (obr. 5.1) a zároveň naznačuje ztrátu integrity polymerní sítě v důsledku příliš vysoké koncentrace neztužujícího plniva.



Obr. 5.2: Závislost Poissonova čísla  $\nu$  na protažení  $\lambda$  pro plnivo N660

Závislosti objemového modulu na protažení pro směsi se ztužujícími plnivy jsou na obrázku 5.3 znázorněny ve formě regresních modelů s využitím polynomu šestého řádu. Ve všech případech byl pro popis průběhu zvolen stejný stupeň polynomu, který umožňuje vzájemné porovnání jednotlivých směsí. Počáteční

nárůst objemového modulu je výraznější než u směsí s neztužujícími plnivými, což odpovídá očekávanému zpevňujícímu účinku sazí N220. Hodnota objemového modulu u těchto směsí roste s rostoucí koncentrací plniva, kdy již nejnižší koncentrace (60 dsk, 1N220) vykazuje vyšší počáteční tuhost než nejvíce plněná směs s plnivem N660 (100 dsk, 3N660).



Obr. 5.3: Závislost objemového modulu  $K$  na protažení  $\lambda$  pro plnivo N220

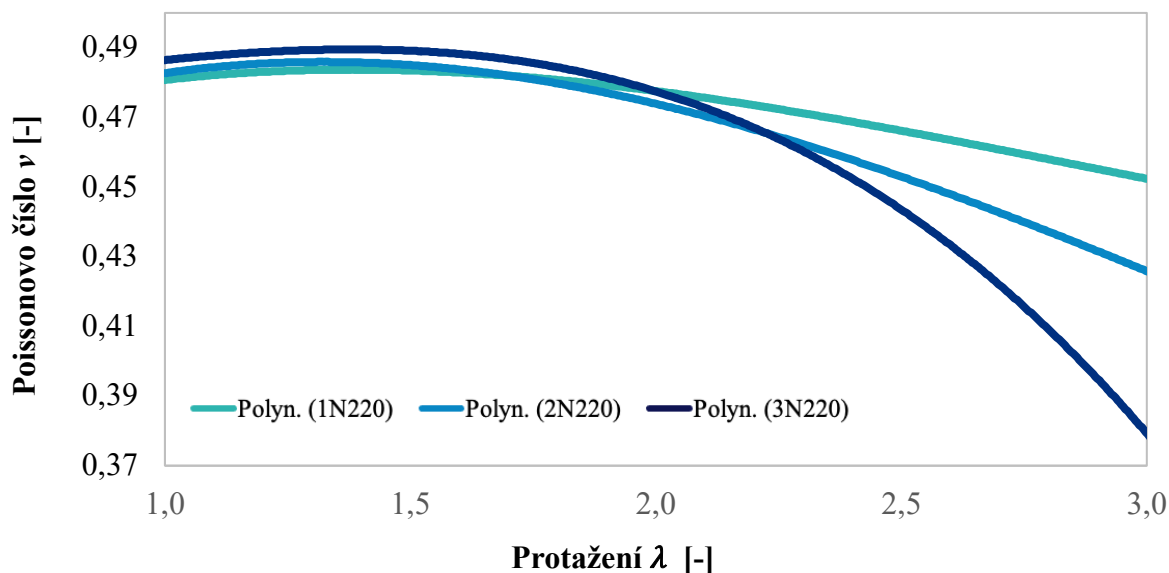
S rostoucí deformací dochází k dosažení maxima a následnému poklesu objemového modulu. Tento propad nastává dříve a je výraznější u směsí s vyšším obsahem ztužujících sazí. Při hodnotě protažení přibližně  $\lambda \approx 1,4$  dochází k protnutí polynomických závislostí objemového modulu těchto konkrétních měřených směsí. Do toho bodu platí, že směs s vyšší koncentrací plniv N220 má také vyšší hodnotu objemového modulu. Od tohoto bodu však směs 3N220 (100 dsk) dosahuje nejnižších hodnot objemového modulu, směs 1N220 (60 dsk) dosahuje nejvyšších hodnot objemového modulu a směs 2N220 (80 dsk) před i po tomto zlomu dosahuje středně vysokých hodnot modulu v porovnání se zbylými dvěma směsí. V další části se závislost vyznačuje výrazně ustáleným průběhem s dosažením plató. Drobné oscilace křivek pravděpodobně souvisejí s vlastnostmi polynomického proložení šestého řádu.

Vyšší koncentrace plniv přináší do směsi vyšší stupeň rigidity ale vzhledem k vysokému počtu interakcí matrice-plnivo je také zvýšená náchylnost k porušení těchto interakcí při zatížení a restrukturalizaci sítě. To se projevuje právě zmíněnou vyšší intenzitou poklesu modulu. U směsí s nižší koncentrací plniv je pozorovatelná větší stabilita a vyšší odolnost vůči objemovým změnám, která se projevuje mírnějším nárůstem i poklesem objemového modulu.

Stabilní oblast objemového modulu je zajímavá z hlediska aplikací při velkých deformacích. V této oblasti dochází k určité rovnováze mezi faktory, které mají za následek snižování odolnosti objemovým změnám a faktory, které naopak tuto

odolnost zvyšují. Možnost reorganizace sítě a řetězců ve směru namáhání je limitována přítomností ztužujících plniv a interakcemi plnivo-matrice. Při vyšších deformacích může docházet k rozpadu části těchto interakcí, síť se deformuje volněji, ale nedochází k jejímu kolapsu. U přírodního kaučuku je dosahováno také napětím indukované částečné krystalizace, která sice přímo nezvyšuje odolnost objemovým změnám, nicméně přispívá ke zvýšení strukturální integrity sítě. Po dosažení určité deformace se tedy systém stabilizuje a další zvětšování deformace nezvyšuje ani výrazně nesnižuje odpor k objemovým změnám.

Závislost Poissonova čísla na protažení pro směsi se ztužujícími plnivy N220 je uvedena na obrázku 5.4. Charakter chování koresponduje se závislostí objemového modulu na protažení pro tyto směsi (obr. 5.3). V počáteční fázi zatěžování dosahuje směs s nejvyšší koncentrací sazí (3N220, 100 disk) nejvyšší hodnoty Poissonova čísla, tedy i nejvyšší odolnosti vůči objemové změně. U všech křivek je na začátku závislosti patrný nárůst Poissonova čísla. S rostoucí deformací pak dochází postupně ke snižování Poissonova čísla až do stádia, kdy se původně nejtužší směs 3N220 stává směsí s největším propadem hodnoty Poissonova čísla. Počáteční rozdíl v hodnotách Poissonova čísla se sice zdá malý, nicméně limitní přiblížení k hodnotě 0,5 je velmi důležité z hlediska charakterizace nestlačitelnosti materiálu, hodnota 0,5 představuje teoretickou mez ideálně nestlačitelného chování. V oblasti vysokých deformací však již lze pozorovat podstatné rozdíly v dosažených hodnotách Poissonova čísla. Nižší koncentrace plniv se jeví jako lepší možnost z hlediska vyšší stability materiálu při módech jednoosého tahového zatížení při vyšších hodnotách deformace.

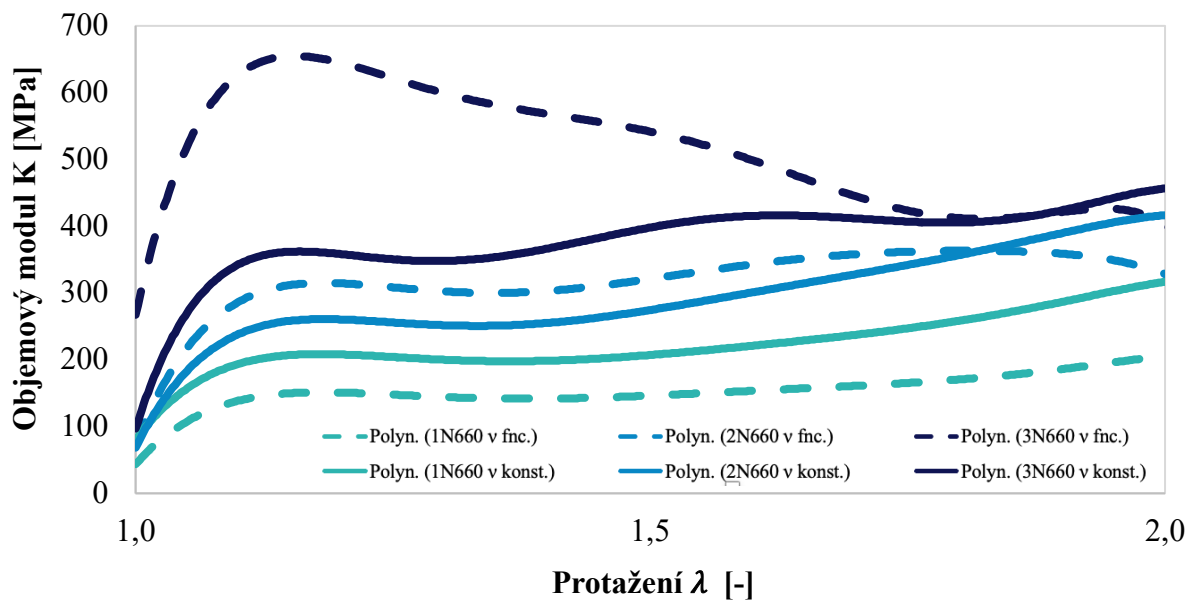


Obr. 5.4: Závislost Poissonova čísla  $\nu$  na protažení  $\lambda$  pro plnivo N220

## 5.2 Dvouosý tah

Výsledky měření dvouosého namáhání jsou uvedeny v kapitole 4.3.2 včetně grafických závislostí jednotlivých měřených směsí, statistických vyhodnocení sledovaných veličin a charakterizace použitých regresních modelů.

Výsledná závislost objemového modulu na protažení pro neztužující plniva N660 v podobě polynomů regresních modelů je zobrazena na obrázku 5.5. V grafu jsou zobrazeny křivky všech tří měřených směsí pro oba přístupy vyhodnocování, tedy celkem šest křivek. Plnou čarou jsou zobrazeny křivky, kdy bylo k vyhodnocení dat z dvouosého namáhání použito Poissonovo číslo získané při jednoosém tahu a bylo zadáno v podobě konstantní hodnoty. Čárkovaně jsou znázorněny křivky popisující závislost objemového modulu, kdy bylo Poissonovo číslo dosazováno jako funkce protažení.



Obr. 5.5: Závislost objemového modulu  $K$  na protažení  $\lambda$  pro plnivo N660

Při zadávání konstantní hodnoty Poissonova čísla byla použita mediánová hodnota z naměřených dat jednoosého namáhání. Z výsledků proložení průměrných křivek (obr. 5.2) by se mohlo jevit, že nejvyšší Poissonovo číslo má směs s nejvyšší koncentrací (3N660, 100 disk). To však platí pouze v počáteční fázi měření. Po vyhodnocení byla jako konstantní hodnota Poissonova čísla zadána mediánová hodnota, na jejímž základě nejvyšší Poissonovo číslo připadlo směsi 1N660 s nejnižším plněním (kap. 4.3.1). Průběh křivek vyhodnocených s konstantním Poissonovým číslem (plná čára) je charakteristický počátečním navýšením objemového modulu, následovaným mírným propadem, po němž křivky opět rostou. Délka propadu objemového modulu ve srovnání s dosaženou deformací se zkracuje s rostoucí koncentrací plniva N660. U směsi s nejvyšším obsahem plniva je pozorována nestabilita v chování, která koresponduje s výsledky měření při jednoosém tahu.

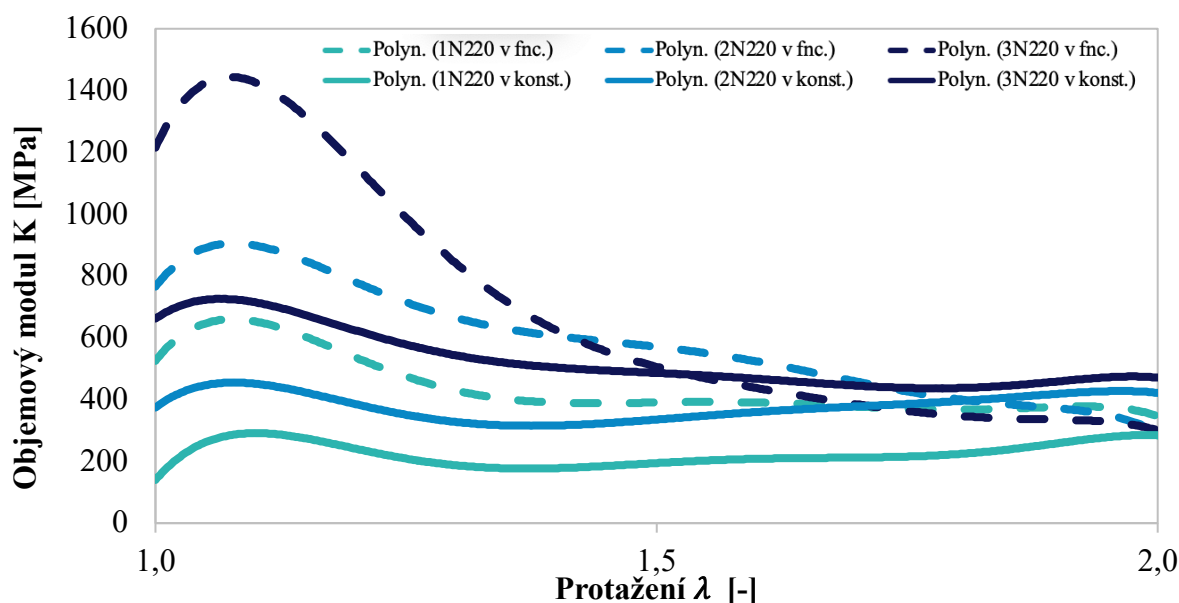
Při vyhodnocení výsledků způsobem s využitím Poissonova čísla závislého na hodnotě deformace lze pozorovat podobný trend křivek (čárkovaná čára) z hlediska jejich vzájemného pořadí, což je logickým důsledkem využití dat z jednoosého namáhání. V tomto případě dochází k dřívější ztrátě odolnosti vůči objemovým změnám se zvyšující se koncentrací plniva. Křivky směsí 1N660 a 2N660 mají velmi podobný průběh. U směsi s vyšší koncentrací plniva lze pozorovat nástup poklesu objemového modulu již kolem  $\lambda \approx 1,75$ . Naproti tomu při jednoosém namáhání směsi 2N660 (obr. 5.1) tento pokles nastává až při hodnotě protažení okolo  $\lambda \approx 2,8$ . U směsi 1N660 se předpokládá, že by podobný propad také nastal při vyšší míře deformace. U směsi 3N660 (100 disk) je při použití Poissonova čísla jako funkce protažení pozorován výrazný počáteční nárůst objemového modulu v počáteční fázi zatížení, následovaný prudkým a intenzivním propadem. Toto chování bylo možné pozorovat i fyzicky přímo během experimentu. Zkušební tělesa ze směsi 3N660 kladla při nafukování velký odpor vůči deformování. Po překonání tohoto odporu stlačeným vzduchem došlo k velmi rychlému až nekontrolovatelnému nafouknutí, což odpovídá i grafickému průběhu závislosti objemového modulu, kdy dochází k prudké ztrátě objemové tuhosti.

V porovnání s jednoosým namáháním je při dvouosém zatěžování dosaženo vyšších hodnot objemového modulu (v porovnatelné pozorované oblasti deformace  $\lambda < 2$ ) u obou přístupů vyhodnocování. K poklesu modulu však u dvouosé napjatosti dochází při nižších hodnotách protažení než u jednoosého tahu. Významným faktorem je orientace polymerních řetězců ve směru zatěžování. V případě dvouosého namáhání není orientace řetězců tak efektivní jako při jednoosém zatěžování, a tím je snížena schopnost sítě vzdorovat objemovým změnám. Stejně tak vazby mezi plnivem a matricí jsou více zablokovány, pokud se síť deformuje ve více směrech. Chování naznačující celkovou ztrátu integrity při jednoosém namáhání podporuje předpoklad, že obdobná degradace může nastat i při dvouosém zatěžování.

Závislost objemového modulu na protažení pro směsi obsahující ztužující plnivo N220 je zobrazena na obrázku 8.6. Jedná se o polynomické závislosti regresních modelů použitých při vyhodnocování naměřených dat. Plnou čarou jsou zobrazeny křivky získané při použití Poissonova čísla jako konstanty, čárkovanou čarou jsou zobrazeny křivky získané při použití Poissonova čísla závislého na konkrétní hodnotě protažení.

Pořadí křivek z hlediska dosažených hodnot objemového modulu odpovídá hodnotám použitých konstantních Poissonových čísel (kap. 4.3.1), kdy nejvyšší modul je dosažen směsí s nejvyšším zastoupením plniva. Všechny křivky mají obdobný charakteristický náběh modulu v počáteční fázi zatěžování. Následuje pokles objemového modulu, přičemž v případě dvouosého namáhání není jednoznačně patrné, zda vyšší koncentrace plniva přímo ovlivňuje intenzitu tohoto poklesu, neboť souběžná deformace ve dvou směrech může překrývat

či modifikovat vliv interakcí plnivo–matrice. Závislosti dále vykazují ustálený až rostoucí průběh, který je ovlivněn dosazováním konstantního Poissonova čísla.



Obr. 5.6: Závislost objemového modulu  $K$  na protažení  $\lambda$  pro plnivo N220

Při dosazování Poissonova čísla závislého na konkrétní hodnotě protažení (čárkované křivky) lze pozorovat nárůst hodnot objemového modulu do výrazně vyšších oblastí, kdy lze u všech křivek zjednodušeně mluvit o prakticky dvojnásobném dosaženém objemovém modulu. U nejvyšší koncentrace (směs 3N220, 100 dsk) je pozorovatelný výraznější pokles objemového modulu než u prvních dvou směsí. Směs 1N220 (60 dsk) vykazuje v pozorovaném rozsahu deformace již ustálený průběh. V oblasti okolo protažení  $\lambda \approx 2$  lze na obrázku 5.6 pozorovat přiblížení hodnot jednotlivých směsí a náznak překmitu mezi dosaženými hodnotami objemového modulu (obdobně jako u jednoosého namáhání dle obr. 5.3).

V porovnání s jednoosým namáháním je dosaženo vyšších hodnot objemového modulu vzhledem k odlišnosti zatěžovacích módů. U dvouosého namáhání je možnost reorganizace řetězců z podstaty mechanismu namáhání nižší. Více směrné namáhání znamená, že je polymerní síť deformovaná současně ve více směrech a více řetězců je aktivně zatížených. Možnost volného přeuspořádání řetězců je omezenější, což zvyšuje odpor proti objemové deformaci.

## 6. PŘÍNOS PRÁCE PRO VĚDU A PRAXI

Elastomery, které se vyznačující významnou změnou tvaru a minoritní změnou objemu, jsou v mnoha aplikacích obecně považovány za objemově nestlačitelné nebo téměř nestlačitelné materiály vzhledem k jejich vysoké tuhosti a Poissonovu číslu blížícímu se hodnotě 0,5. Jejich vlastnosti jsou především ovlivněny složením směsí a technologií výroby, proto je literatura často omezena na konkrétní materiály a přesné hodnoty je třeba pro každou směs ověřit experimentálně. Objemové změny v elastomerech mohou nastat v důsledku různých jevů – složení směsi, typu namáhání nebo provozní teploty. Teplotní změny způsobují roztažení či smrštění, přítomnost plniv ovlivňuje tuhost a odezvu, chemikálie mohou měnit chemickou strukturu. Na základě poznatků rešerše je zřejmé, že objemové změny během deformace elastomerů jsou důsledkem jejich specifické molekulární struktury a procesů, které jim umožňují měnit svůj objem a následně se vrátit do původního stavu po skončení deformace. Elastomery mají vzájemně propojené náhodně uspořádané polymerní řetězce, které se při deformaci posouvají a rotují. Tento proces umožňuje elastomeru se protáhnout či smrstit bez trvalého poškození. Současně dochází během deformace k redistribuci materiálu, což může vést k dočasnému zvětšení nebo zmenšení objemu v důsledku změny molekulární konformace a uspořádání řetězců odpovídající aplikovanému zatížení. Elastomery také mohou obsahovat mikroskopické vzduchové dutiny, které mohou být komprimovány během deformace, a tím přispět k celkové objemové změně materiálu.

Přínosem této práce je vytvoření experimentální metodiky, která umožňuje sledovat vývoj objemového modulu a Poissonova čísla při jednoosém a dvouosém zatěžování elastomerů. Měření byla realizována za použití optické metody DIC, která umožňuje detailní a přesné vyhodnocení deformací i v oblasti velkých přetvoření. Metoda DIC se zde ukázala jako vhodný nástroj nejen pro sledování změn tvaru, ale i objemu v závislosti na míře zatížení. Byly navrženy dva přístupy k výpočtu objemového modulu během dvouosého tahu, s uvažováním konstantního a proměnného Poissonova čísla, které zohledňují nelineární chování sledovaných směsí. Dalším přínosem této práce je experimentální popis závislosti objemové stlačitelnosti na míře deformace a složení směsi, který poskytuje datový základ pro vývoj směsí s optimalizovanými vlastnostmi a přispívá k pochopení jejich mechanického chování. Na základě provedených experimentů byly popsány rozdíly v chování směsí s různým typem a množstvím plniva při různých módech zatížení. Výsledky lze využít při návrhu a validaci výpočtových modelů v oblastech, kde je nutné uvažovat objemovou stlačitelnost materiálu. Získané poznatky nacházejí uplatnění nejen ve výzkumu a vývoji materiálů, ale i při navrhování a optimalizaci výrobků z elastomerů, zejména tam, kde je důležitá přesnost deformace a predikce mechanické odezvy. Práce tak rozšiřuje současné možnosti charakterizace elastomerů a přispívá ke zvyšování přesnosti experimentálních i numerických analýz těchto specifických materiálů.

## 7. ZÁVĚR

Disertační práce byla zaměřena na experimentální studium objemových změn elastomerů při jednoosém a dvouosém zatěžování s využitím bezkontaktní metody digitální korelace obrazu (DIC). Cílem bylo navrhnout a ověřit metodiku, která umožní spolehlivé měření objemového modulu a Poissonova čísla v závislosti na míře deformace a zároveň analyzovat, jakým způsobem se tyto veličiny mění v závislosti na typu zatěžování i materiálovém složení.

V teoretické části byly shrnuty základní poznatky o elastomerech, jejich specifickém mechanickém chování a vlivu struktury na deformaci, se zaměřením na objemovou tuhost vyjadřující stlačitelnost materiálu. Popsány byly základní mechanické parametry popisující tento jev a vztahy využívané k výpočtu. Samostatná část byla věnována metodě DIC, jejímu principu a možnostem využití pro sledování deformace během zatěžování. Experimentální část práce pak navazovala návrhem a realizací měření šesti elastomerních směsí s různým typem a obsahem plniva. Zkušební tělesa byla zatěžována jednoosým i dvouosým tahem a průběh deformace byl snímán pomocí stereo DIC systému. Naměřená data byla dále zpracována dvěma výpočetními přístupy k určení objemového modulu – při uvažování konstantní i proměnné hodnoty Poissonova čísla.

Provedená analýza potvrdila, že metoda DIC v kombinaci s navrženým způsobem zpracování poskytuje vhodný přístup pro popis objemových změn elastomerů v průběhu zatěžování. Ověřený postup umožňuje nejen vyhodnocení objemového modulu a Poissonova čísla v závislosti na deformaci, ale i porovnání směsí z hlediska jejich citlivosti na typ zatížení a obsah plniva. Směsi se ztužujícími sazemi vykazovaly výraznější nárůst objemového modulu v oblasti malých deformací, následovaný poměrně stabilním průběhem. Naproti tomu u směsí s neztužujícími sazemi byl zaznamenán proměnlivější charakter závislosti – počáteční hodnoty objemového modulu byly nižší a průběh v některých případech zahrnoval pokles, následný nárůst nebo strmější pokles v závislosti na obsahu plniva. Rozdíly mezi režimy zatěžování se projeví především v posunu absolutních hodnot, nikoliv ve změně celkového charakteru průběhu. U většiny směsí bylo při dvouosém zatěžování zaznamenáno zvýšení objemového modulu, které může souviset s omezenou mobilitou polymerních řetězců při současném působení zatížení ve více směrech. Shodný průběh závislosti při jednoosém i dvouosém zatěžování ukazuje, že tvar křivek je určován převážně složením směsi, zatímco typ zatěžování se promítá zejména do velikosti dosažených hodnot objemového modulu.

Výsledky mohou sloužit jako základ pro úpravu materiálových modelů, které dosud často uvažují elastomery jako ideálně nestlačitelné. S ohledem na pozorované rozdíly mezi jednotlivými směsmi i zatěžovacími módy se ukazuje, že u přesnějších výpočtů je třeba s reálnými objemovými změnami počítat. Představená metodika tak nabízí využití jak v laboratorním výzkumu, tak při vývoji výrobků a aplikací, kde se s těmito jevy reálně pracuje.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] AKIN EVINGÜR, G. a PEKCAN, Ö. (ed.). *Application and Characterization of Rubber Materials*. Online. IntechOpen, 2023. ISBN 978-1-80355-606-2. Dostupné z: <https://doi.org/10.5772/intechopen.102183>. [cit. 2024-04-22].
- [2] POPA, G. A. *Rubber: types, properties, and uses*. Nova Science Pub, 2011. ISBN 9781617614644.
- [3] GENT, A.N. Rubber Elasticity. Online. In: *Science and Technology of Rubber*. Elsevier, 2005, s. 1-27. ISBN 9780124647862. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-012464786-2/50004-3>. [cit. 2024-04-22].
- [4] CANDAU, N.; PRADILLE, Ch.; BOUVARD, J.-L. a BILLON, N. On the use of a four-cameras stereovision system to characterize large 3D deformation in elastomers. Online. *Polymer Testing*. 2016, roč. 56, s. 314-320. ISSN 01429418. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2016.10.017>. [cit. 2024-04-08].
- [5] FARFÁN-CABRERA, L. I.; PASCUAL-FRANCISCO, J. B.; BARRAGÁN-PÉREZ, O.; GALLARDO-HERNÁNDEZ, E. A. a SUSARREY-HUERTA, O. Determination of creep compliance, recovery and Poisson's ratio of elastomers by means of digital image correlation (DIC). Online. *Polymer Testing*. 2017, roč. 59, s. 245-252. ISSN 01429418. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2017.02.010>. [cit. 2024-04-08].
- [6] LE CAM, J.-B. a TOUSSAINT, E. Volume Variation in Stretched Natural Rubber: Competition between Cavitation and Stress-Induced Crystallization. Online. *Macromolecules*. 2008, roč. 41, č. 20, s. 7579-7583. ISSN 0024-9297. Dostupné z: <https://doi.org/10.1021/ma801290w>. [cit. 2024-04-08].
- [7] LE CAM, J.-B. A REVIEW OF VOLUME CHANGES IN RUBBERS: THE EFFECT OF STRETCHING. Online. *Rubber Chemistry and Technology*. 2010, roč. 83, č. 3, s. 247-269. ISSN 1943-4804. Dostupné z: <https://doi.org/10.5254/1.3525684>. [cit. 2024-04-08].
- [8] LE CAM, J.-B. A Review of the Challenges and Limitations of Full-Field Measurements Applied to Large Heterogeneous Deformations of Rubbers. Online. *Strain*. 2012, roč. 48, č. 2, s. 174-188. ISSN 0039-2103. Dostupné z: <https://doi.org/10.1111/j.1475-1305.2011.00830.x>. [cit. 2024-04-08].
- [9] SOTOMAYOR-DEL-MORAL, J. et al. Characterization of Viscoelastic Poisson's Ratio of Engineering Elastomers via DIC-Based Creep Testing. Online. *Polymers*. 2022, roč. 14, č. 9. ISSN 2073-4360. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/polym14091837>. [cit. 2024-04-08].

- [10] FARFAN-CABRERA, L. I. a PASCUAL-FRANCISCO, J. B. An Experimental Methodological Approach for Obtaining Viscoelastic Poisson's Ratio of Elastomers from Creep Strain DIC-Based Measurements. Online. *Experimental Mechanics*. 2022, roč. 62, č. 2, s. 287-297. ISSN 0014-4851. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11340-021-00792-9>. [cit. 2024-04-08].
- [11] LE CAM, J.-B. a TOUSSAINT, E. Cyclic volume changes in rubber. Online. *Mechanics of Materials*. 2009, roč. 41, č. 7, s. 898-901. ISSN 01676636. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2009.02.004>. [cit. 2024-04-08].
- [12] HUYNH, N. U.; KOOHBOR, B. a YOUSSEF, G. Localized creep analysis of polyurea elastomer from full-field measurements. Online. *Mechanics of Time-Dependent Materials*. 2023, roč. 27, č. 3, s. 727-741. ISSN 1385-2000. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11043-022-09572-x>. [cit. 2024-04-22].
- [13] DE CREVOISIER, J.; et al. Volume changes in a filled elastomer studied via digital image correlation. Online. *Polymer Testing*. 2012, roč. 31, č. 5, s. 663-670. ISSN 01429418. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2012.04.003>. [cit. 2024-04-08].
- [14] GOH, C. P.; RATNAM, M. M. a ISMAIL, H. Large In-plane Deformation Mapping and Determination of Young's Modulus of Rubber Using Scanner-Based Digital Image Correlation. Online. *Experimental Techniques*. 2016, roč. 40, č. 3, s. 1117-1127. ISSN 0732-8818. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s40799-016-0113-x>. [cit. 2024-04-08].
- [15] GOH, C.P.; ISMAIL, H.; YEN, K.S. a RATNAM, M.M. Single-step scanner-based digital image correlation (SB-DIC) method for large deformation mapping in rubber. Online. *Optics and Lasers in Engineering*. 2017, roč. 88, s. 167-177. ISSN 01438166. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2016.08.011>. [cit. 2024-04-08].
- [16] FAZZINI, M.; MISTOU, S.; KARAMA, M. a DESMARS, B. Digital Image Stereo-Correlation Applied to the Identification of Elastomers. Online. *Advanced Materials Research*. 2010, roč. 112, s. 103-112. ISSN 1662-8985. Dostupné z: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.112.103>. [cit. 2024-04-08].
- [17] KANZENBACH, L.; LEHMANN, T. a IHLEMANN, J.. Digital image correlation based characterization of rubber material at large shear deformations in an extended temperature range. Online. *GAMM-Mitteilungen*. 2022, roč. 45, č. 3-4. ISSN 0936-7195. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/gamm.202200009>. [cit. 2024-04-08].

- [18] HU, X.; XIE, Z. a LIU, F. Assessment of speckle pattern quality in digital image correlation from the perspective of mean bias error. Online. *Measurement*. 2021, roč. 173. ISSN 02632241. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108618>. [cit. 2024-04-08].
- [19] HANSEN, L.E.; FITZGERALD, K.M.; HUERTAS, N.A.; JONES, E.M.C.; RUGGLES, T.J. et al. A flexible polymer-based luminescent ink for combined thermographic phosphors and digital image correlation (TP+DIC). Online. *Optical Materials*. 2023, roč. 141. ISSN 09253467. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2023.113906>. [cit. 2024-04-08].
- [20] LALO, D. F. a GRECO, M. A new approach for rubber numerical modeling under biaxial testing conditions thorough finite element simulation. Online. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*. 2022, roč. 17, č. 4, s. 319-342. ISSN 1559-3959. Dostupné z: <https://doi.org/10.2140/jomms.2022.17.319>. [cit. 2024-04-08].
- [21] ILSENG, A.; SKALLERUD, B. H. a CLAUSEN, A. H. An experimental and numerical study on the volume change of particle-filled elastomers in various loading modes. Online. *Mechanics of Materials*. 2017, roč. 106, s. 44-57. ISSN 01676636. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2017.01.007>. [cit. 2024-04-08].
- [22] DAVIS, F.; L'HOMMEL, J.; LE CAM, J.-B. a PIERRON, F. Quantification of the Compressibility of Elastomers Using DIC. Online. In: SUTTON, Michael a REU, Phillip L. (ed.). *International Digital Imaging Correlation Society*. Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series. Cham: Springer International Publishing, 2017, s. 199-201. ISBN 978-3-319-51438-3. Dostupné z: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-51439-0\\_47](https://doi.org/10.1007/978-3-319-51439-0_47). [cit. 2024-04-08].
- [23] CANDAU, N.; PRADILLE, Ch.; BOUVARD, J.-L. a BILLON, N. On the use of a four-cameras stereovision system to characterize large 3D deformation in elastomers. Online. *Polymer Testing*. 2016, roč. 56, s. 314-320. ISSN 01429418. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2016.10.017>. [cit. 2024-04-08].
- [24] DICK, John S. a ANNICELLI, R. A. *Rubber technology: compounding and testing for performance*. Online. 2nd. Munich: Hanser Publishers, 2009. ISBN 9781628703153. Dostupné z: <https://app.knovel.com/kn/resources/kpRTCTPE02/toc>. [cit. 2024-04-22].
- [25] HARRIS, C.I M.; PIERSOL, A. G. a SCHAEFER, R. J. In: *Harris' Shock and Vibration Handbook: Chapter 33: Mechanical Properties of Rubber*. 5th. McGraw Hill Book Co, 2009, s. 1168. ISBN 9780071508193.

- [26] GRADY, B. P.; COOPER, S. L. a ROBERTSON, C. G. Thermoplastic Elastomers. Online. In: *The Science and Technology of Rubber*. Elsevier, 2013, s. 591-652. ISBN 9780123945846. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394584-6.00013-3>. [cit. 2024-04-26].
- [27] BAUMAN, J. T. *Fatigue, Stress, and Strain of Rubber Components: A Guide for Design Engineers*. Hanser Publications, 2008. ISBN 9781569904312.
- [28] MELLY, S. K.; LIU, L.; LIU, Y. a LENG, J. A review on material models for isotropic hyperelasticity. Online. *International Journal of Mechanical System Dynamics*. 2021, roč. 1, č. 1, s. 71-88. ISSN 2767-1399. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/msd2.12013>. [cit. 2024-04-26].
- [29] FU, X.; WANG, Z.; MA, L.; ZOU, Z.; ZHANG, Q. et al. Temperature-Dependence of Rubber Hyperelasticity Based on the Eight-Chain Model. Online. *Polymers*. 2020, roč. 12, č. 4. ISSN 2073-4360. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/polym12040932>. [cit. 2024-04-26].
- [30] *Elasticity in Biological Materials: S-shaped curves*. Online. In: Dissemination of IT for the Promotion of Materials Science. 2006, 2008. Dostupné z: <https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/bioelasticity/s-shaped-curves.php>. [cit. 2024-04-26].
- [31] STARKOVA, O. a ANISKEVICH, A. Poisson's ratio and the incompressibility relation for various strain measures with the example of a silica-filled SBR rubber in uniaxial tension tests. Online. *Polymer Testing*. 2010, roč. 29, č. 3, s. 310-318. ISSN 01429418. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2009.12.005>. [cit. 2024-04-26].
- [32] TSCHOEGL, N.W.; KNAUSS, W. G. a EMRI, I. Poisson's Ratio in Linear Viscoelasticity – A Critical Review. Online. *Mechanics of Time-Dependent Materials*. 2002, roč. 6, č. 1, s. 3-51. ISSN 13852000. Dostupné z: <https://doi.org/10.1023/A:1014411503170>. [cit. 2024-04-26].
- [33] MIHAI, L. A. a GORIELY, A. How to characterize a nonlinear elastic material? A review on nonlinear constitutive parameters in isotropic finite elasticity. Online. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2017, roč. 473, č. 2207. ISSN 1364-5021. Dostupné z: <https://doi.org/10.1098/rspa.2017.0607>. [cit. 2024-04-26].
- [34] GOODNO, B. J. a GERE, J. M. *Mechanics of materials*. Enhanced ninth edition, SI edition. Boston: Cengage, [2021]. ISBN 978-0-357-37785-7.
- [35] DVOŘÁK, Z. a JAVOŘÍK, J. *Elastomerní konstrukční materiály*. Zlín: Česká společnost průmyslové chemie, místní pobočka Gumárneská skupina Zlín, 2009. ISBN 9788002021551.

- [36] KUGLER, H. P., R. G. STACER a C. STEIMLE, 1990. *Direct measurement of Poisson's ration in elastomers*. In: Meeting of the Rubber Division, American Chemical Society, Detroit, Michigan, October 17-20, 1989, s. 473-487. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.5254/1.3538267>. [cit. 2025-05-25].
- [37] ROBERTSON, C. G. a HARDMAN, N. J., 2021. Nature of Carbon Black Reinforcement of Rubber: Perspective on the Original Polymer Nanocomposite. Online. *Polymers*. Roč. 13, č. 538, s. 1-28. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/polym13040538>. [cit. 2025-05-25].
- [38] ROBERTSON, C. G.; STOČEK, R. a MARS, W. V., 2020. The Fatigue Threshold of Rubber and Its Characterization Using the Cutting Method. Online. *Adv Polym Sci*. Č. 286, s. 57-84. Dostupné z: [https://doi.org/https://doi.org/10.1007/12\\_2020\\_71](https://doi.org/https://doi.org/10.1007/12_2020_71). [cit. 2025-05-25].
- [39] HOSSEINI, S. M. a RAZZAGHI-KASHANI, M., 2018. Cytalytic and networking effects of carbon black on kinetics and conversion of sulfur vulcanization in styrene butadiene rubber. Online. *Soft Matter*. Č. 14, s. 9194-9208. Dostupné z: <https://doi.org/10.1039/c8sm01953c>. [cit. 2025-05-25].
- [40] JAVOŘÍK, J.; KEERTHIWANSA, R.; PATA, V.; RUSNÁKOVÁ, S.; KOTLÁNOVÁ, B.; GRUNT, M. a SEDLAČÍK, M., 2024. Prediction of Biaxial Properties of Elastomers and Appropriate Data Processing. *Polymers*. Č. 16, 2190. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/polym16152190> [cit. 2025-05-27]

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 4.1: Rozměry zkušebních těles – pro jednoosý tah vlevo, pro dvouosý tah vpravo .....</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 4.2: Experimentální zařízení pro měření jednoosým tahem .....</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 4.3: Zkušební těleso – a) příprava před měřením, b) vstupní parametry, c) protažení <math>\lambda</math> 200 % a d) protažení <math>\lambda</math> 300 % .....</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 4.4 Experimentální zařízení pro měření dvouosým tahem .....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 4.5: Zkušební těleso – a) příprava před měřením, b) vstupní parametry, c) protažení <math>\lambda</math> 150 %, d) protažení <math>\lambda</math> 200 % .....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 4.6: Závislost objemového modulu <math>K</math> na protažení <math>\lambda</math> pro směs IN660 .....</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 4.7: Závislost Poissonova čísla <math>\nu</math> na protažení <math>\lambda</math> pro směs IN660 .....</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 4.8: Závislost objemového modulu <math>K</math> na protažení <math>\lambda</math> pro směs IN220 .....</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 4.9: Závislost Poissonova čísla <math>\nu</math> na protažení <math>\lambda</math> pro směs IN220 .....</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 4.10: Závislost objemového modulu <math>K</math>, <math>\nu = \text{konst.}</math> na protažení <math>\lambda</math> pro směs IN660 .....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 4.11: Závislost objemového modulu <math>K</math>, <math>\nu = f(\lambda)</math> na protažení <math>\lambda</math> pro směs IN660 .....</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 4.12: Závislost objemového modulu <math>K</math>, <math>\nu = \text{konst.}</math> na protažení <math>\lambda</math> pro směs IN220 .....</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 4.13: Závislost objemového modulu <math>K</math>, <math>\nu = f(\lambda)</math> na protažení <math>\lambda</math> pro směs IN220 .....</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 5.1: Závislost objemového modulu <math>K</math> na protažení <math>\lambda</math> pro plnivo N660 .....</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 5.2: Závislost Poissonova čísla <math>\nu</math> na protažení <math>\lambda</math> pro plnivo N660 .....</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 5.3: Závislost objemového modulu <math>K</math> na protažení <math>\lambda</math> pro plnivo N220 .....</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 5.4: Závislost Poissonova čísla <math>\nu</math> na protažení <math>\lambda</math> pro plnivo N220 .....</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 5.5: Závislost objemového modulu <math>K</math> na protažení <math>\lambda</math> pro plnivo N660 .....</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 5.6: Závislost objemového modulu <math>K</math> na protažení <math>\lambda</math> pro plnivo N220 .....</i>	<i>39</i>

## SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 4.1: Statistické hodnoty <math>K</math> pro směs 1N660 .....</i>	<i>21</i>
<i>Tabulka 4.2: Charakteristika regresního modelu závislosti <math>K</math> na <math>\lambda</math> pro 1N660 .....</i>	<i>21</i>
<i>Tabulka 4.3 Statistické hodnoty <math>v</math> pro směs 1N660 .....</i>	<i>22</i>
<i>Tabulka 4.4: Charakteristika regresního modelu závislosti <math>v</math> na <math>\lambda</math> pro 1N660 .....</i>	<i>22</i>
<i>Tabulka 4.5: Statistické hodnoty <math>K</math> pro směs 1N220 .....</i>	<i>24</i>
<i>Tabulka 4.6: Charakteristika regresního modelu závislosti <math>K</math> na <math>\lambda</math> pro 1N220 .....</i>	<i>24</i>
<i>Tabulka 4.7: Statistické hodnoty <math>v</math> pro směs 1N220 .....</i>	<i>25</i>
<i>Tabulka 4.8: Charakteristika regresního modelu závislosti <math>v</math> na <math>\lambda</math> pro 1N220 .....</i>	<i>25</i>
<i>Tabulka 4.9: Statistické hodnoty <math>K</math>, <math>v = \text{konst.}</math> pro směs 1N660 .....</i>	<i>27</i>
<i>Tabulka 4.10: Charakteristika regresního modelu závislosti <math>K</math> na <math>\lambda</math> pro 1N660 .....</i>	<i>27</i>
<i>Tabulka 4.11: Statistické hodnoty <math>K</math>, <math>v = f(\lambda)</math> pro směs 1N660 .....</i>	<i>28</i>
<i>Tabulka 4.12: Charakteristika regresního modelu závislosti <math>K</math> na <math>\lambda</math> pro 1N660 .....</i>	<i>28</i>
<i>Tabulka 4.13: Statistické hodnoty <math>K</math>, <math>v = \text{konst.}</math> pro směs 1N220 .....</i>	<i>29</i>
<i>Tabulka 4.14: Charakteristika regresního modelu závislosti <math>K</math> na <math>\lambda</math> pro 1N220 .....</i>	<i>30</i>
<i>Tabulka 4.15: Statistické hodnoty <math>K</math>, <math>v = f(\lambda)</math> pro směs 1N220 .....</i>	<i>31</i>
<i>Tabulka 4.16: Charakteristika regresního modelu závislosti <math>K</math> na <math>\lambda</math> pro 1N220 .....</i>	<i>31</i>

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

°C	stupeň Celsia
6PPD	antioxidant
b	deformovaná šířka
b <sub>0</sub>	původní šířka
CR	chloroprenový kaučuk
DCBS	sulfenamidový urychlovač
DIC	digitální korelace obrazu
dsk	díly na sto dílů kaučuku
EPDM	ethylen-propylen-dienový kaučuk
F	síla
FEM	finite element method
FKM	fluoroelastomer
HNBR	hydrogenovaný nitrilbutadienový kaučuk
K	objemový modul pružnosti
l	deformovaná délka
l <sub>0</sub>	původní délka
MKP	metoda konečných prvků
mm	milimetr
mm/min	milimetr za minutu
mm <sup>2</sup>	milimetr čtvereční
MPa	megapascal
Mpx	megapixel
N	newton
N220	ztužující plnivo

N660	neztužující plnivo
NBR	butadien-akrylonitrilový kaučuk
ot/min	otáčka za minutu
p	tlak
px	pixel
R	korelační koeficient
r	poloměr
R <sup>2</sup>	koeficient determinace
R <sub>p</sub>	predikovaný korelační koeficient
S	průřez
S <sub>0</sub>	původní průřez
t <sub>0</sub>	původní tloušťka
V	deformovaný objem
V <sub>0</sub>	původní objem tělesa
ε	náhodná chyba regresního modelu
ε <sub>e</sub>	smluvní deformace
ε <sub>t</sub>	skutečná podélná poměrná deformace
ε <sub>Tt</sub>	skutečná příčná poměrná deformace
θ	poměrná změna objemu
λ	podélné protažení
λ <sub>T</sub>	příčné zúžení
μm	mikrometr
ν	Poissonovo číslo
σ	napětí
σ <sub>t</sub>	skutečné napětí

# PUBLIKAČNÍ AKTIVITY

## Kvalifikační práce

1. KOTLÁNOVÁ, Barbora. *Stanovení mechanických vlastností vybraných elastomerů*. Bakalářská práce, vedoucí Jakub Javořík. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství, 2019. Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10563/45402>.
2. KOTLÁNOVÁ, Barbora. *Metodika pro měření objemových změn stereo DIC systémem*. Diplomová práce, vedoucí Jakub Javořík. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství, 2021. Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10563/47233>.

## Publikace Web of Science

1. OGUNLEYE, R. O.; RUSNAKOVA, S.; JAVORIK, J.; ZALUDEK, M.; a KOTLANOVA, B.. (2024), Advanced Sensors and Sensing Systems for Structural Health Monitoring in Aerospace Composites. Online. *Advanced Engineering Materials*. 2024, roč. 26, č. 2401745. ISSN 1527-2648. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/adem.202401745> [cit. 2025-05-27]
2. JAVORIK, J.; KEERTHIWANSA, R.; PATA, V., RUNASKOVA, S.; KOTLANOVA, B.; GRUNT, M., SEDLACIK M. Prediction of Biaxial Properties of Elastomers and Appropriate Data Processing. Online. *Polymers*. 2024, roč. 16, č. 15. ISSN 2073-4360. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/polym16152190>. [cit. 2025-05-27]
3. RUSNAKOVA, S.; GRUNT, M.; ZALUDEK, M.; JAVORIK, J. a KOTLANOVA, B.. Experimental Study on the Optimization of the Autoclave Curing Cycle for the Enhancement of the Mechanical Properties of Prepreg Carbon–Epoxy Laminates. Online. *Polymers*. 2024, roč. 16, č. 1. ISSN 2073-4360. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/polym16010047>. [cit. 2024-03-31].
4. HANZLIK, J.; VANEK, J.; KOTLANOVA, B.; KOCAK, M.; OVSÍK, M. et al. AFM-BASED MACHINE DESIGN FOR FINISHING INJECTION MOLDING TOOLS. Online. *MM Science Journal*. 2024, roč. 2024, č. 3, s. 1-8. ISSN 1805-0476. Dostupné z: [https://doi.org/10.17973/MMSJ.2024\\_06\\_2024015](https://doi.org/10.17973/MMSJ.2024_06_2024015). [cit. 2024-05-07].

## Ostatní publikace:

1. KOTLANOVA, B.; JAVORIK, J.; ZALUDEK, M. a OGUNLEYE, R. O. Volume Change Measurements Using 2D DIC System. Online. *Manufacturing Technology*. 2023, roč. 23, č. 3, s. 307-312. ISSN 12132489. Dostupné z: <https://doi.org/10.21062/mft.2023.044>. [cit. 2024-04-08].
2. KOTLANOVA, B.; RUSNAKOVA, S.; OGUNLEYE, R. O.; a JAVOŘÍK, J. Volume changes measurement of elastomers using 3D DIC. Online. *Acta Polytechnica CTU Proceedings*. 2023, roč. 42, s. 46-50. ISSN 2336-5382. Dostupné z: <https://doi.org/10.14311/APP.2023.42.0046>. [cit. 2024-04-08].

# ODBORNÝ ŽIVOTOPIS



europass



## Barbora Kotlánová

**Datum narození:** 19.7. 1994 | **Státní příslušnost:** Česká republika | **Telefonní číslo:** (+420) 7746361154 (Mobilní telefon) | **E-mailová adresa:** [b\\_kotlanova@utb.cz](mailto:b_kotlanova@utb.cz) |  
**Adresa:** Lazy III 3867/12, 76001, Zlín, Česko (Domů)

### • VZDĚLÁNÍ A ODBORNÁ PŘÍPRAVA

1.9. 2021 – AKTUÁLNÍ Zlín, Česko

**NÁSTROJE A PROCESY - PHD** Fakulta technologická, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Hlavní řešitelka projektů IGA/FT/2023/004 a IGA/FT/2024/002.

Členka řešitelského týmu projektů IGA/FT/2022/007 a IGA/FT/2025/004.

Vyučující předmětů Úvodu do procesního inženýrství a Basics of Elasticity and Strength.

Členka Akademického senátu UTB ve Zlíně a Legislativní komise AS UTB 03.2022 - 03.2025.

Erasmus+ Traineeship - Faculty of Mechanical Engineering, University of Ljubljana 20.9.2024 - 20.12.2024

**Adresa** Vavrečkova 5669, 76001, Zlín, Česko | **Internetové stránky** <https://ft.utb.cz/> |

**Obor studia** Strojírenství, kovovýroba a metalurgie, Chemické inženýrství a výroby |

**Úroveň podle evropského rámce kvalifikací (EQF)** Úroveň EQF 8 |

**Disertační/diplomová/doktorská práce** Studium objemových změn elastomerů s využitím DIC metod

1.9. 2019 – 1.6. 2021 Zlín, Česko

**VÝROBNÍ INŽENÝRSTVÍ - ING.** Fakulta technologická, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

**Adresa** Vavrečkova 5669, 76001, Zlín, Česko | **Internetové stránky** <https://ft.utb.cz/> |

**Obor studia** Strojírenství, kovovýroba a metalurgie, Chemické inženýrství a výroby |

**Konečná známka** Absolvovala s vyznamenáním. |

**Úroveň podle evropského rámce kvalifikací (EQF)** Úroveň EQF 7 |

**Disertační/diplomová/doktorská práce** Metodika pro měření objemových změn stereo DIC systémem

1.9. 2016 – 12.6. 2019 Zlín, Česko

**PROCESNÍ INŽENÝRSTVÍ, TECHNOLOGICKÁ ZAŘÍZENÍ - BC.** Fakulta technologická, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

**Adresa** Vavrečkova 5669, 76001, Zlín, Česko | **Internetové stránky** <https://ft.utb.cz/> |

**Obor studia** Strojírenství, kovovýroba a metalurgie, Chemické inženýrství a výroby |

**Úroveň podle evropského rámce kvalifikací (EQF)** Úroveň EQF 6 |

**Disertační/diplomová/doktorská práce** Stanovení mechanických vlastností vybraných elastomerů

Ing. Barbora Kotlánová, Ph.D.

## **Studium objemových změn elastomerů s využitím DIC metod**

Study of Volume Changes in Elastomers Using DIC Methods

Teze disertační práce

Vydala Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně,  
nám. T. G. Masaryka 5555, 760 01 Zlín.

Náklad: vyšlo elektronicky

Sazba: Ing. Barbora Kotlánová, Ph.D.

Publikace neprošla jazykovou ani redakční úpravou.

Rok vydání 2025

Pořadí vydání: první

ISBN 978-80-7678-366-9