



# Střihová konstrukce kompresního prádla pro tlakovou léčbu

## Diplomová práce

*Studijní program:* N3106 – Textilní inženýrství

*Studijní obor:* 3106T017 – Oděvní a textilní technologie

*Autor práce:* **Mgr. Nadiia Kholiavko**

*Vedoucí práce:* Ing. Blažena Musilová, Ph.D.





# Lingerie pattern construction for medical treatment by compression

## Master thesis

*Study programme:* N3106 – Textile Engineering

*Study branch:* 3106T017 – Clothing and Textile Engineering

*Author:* **Mgr. Nadiia Kholiavko**

*Supervisor:* Ing. Blažena Musilová, Ph.D.



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Nadiia Kholiavko**  
Osobní číslo: **T15000497**  
Studijní program: **N3106 Textilní inženýrství**  
Studijní obor: **Oděvní a textilní technologie**  
Název tématu: **Střihová konstrukce kompresního prádla pro tlakovou léčbu**  
Zadávací katedra: **Katedra oděvnictví**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Proveďte literární rešerši zaměřenou na způsob stanovení konstrukčních parametrů střihu dámského prádla nohavicového typu. Studujte specifika tvarového řešení seamless oděvních výrobků.
2. Na základě poznatků získaných v rešerši vytvořte konstrukční síť pro střih kompresních kalhot, které budou vyrobeny z hadicové pleteniny. Vymezte hranice bloků pro změnu struktury pleteniny.
3. Navrhněte provedení zkoušky pro určení požadovaných mechanických parametrů vybraného druhu pleteniny pro realizaci kompresních kalhot, a to zejména míry deformace ve více směrech.
4. Vytvořte vhodný materiálový model a ověřte jej.
5. Zrealizujte experiment popisující svěrné účinky na geometrii komolého kužele a pokuste se vytvořit konečně prvkový model.
6. Experimentální výsledky zhodnoťte a diskutujte z hlediska praktického využití v parametrické konstrukci dámských kompresních kalhot vyrobených bezešvou technologií.

Rozsah grafických prací: **dle rozsahu dokumentace**

Rozsah pracovní zprávy: **cca 50 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

- Yu W & Fan, J., Innovation and Technology of Women's Intimate Apparel. Woodhead Publishing: Cambridge 1 edition 2006, ISBN-13: 978-0849391057.
- Vrba, V., Střihy prádla- konstrukce a stupňování. 2. vydání. Praha 1990, SNTL. ISBN: 80-03-00355-5.
- Müller & Sohn, Schnittkonstruktionen nach Müller & Sohn", Rundschau, München 1997, ISBN:3-29305-12.
- Stříž, B., Mechanika textilií. Část 1: Základy mechaniky kontinua. TUL Liberec 2001.
- Stříž, B., Mechanika textilií. Část 2: Aplikace mechaniky kontinua. TUL Liberec 2001.
- Kolář, V. Kratochvíl, J. Leitner, F. Ženíšek, A., Výpočet plošných a prostorových konstrukcí metodou konečných prvků, SNTL Praha 1979.
- Volino, P et al: Virtual Clothing: Theory and Practice, Springer-Verlag Heidelberg New York, ISBN 3-540-67600-7.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Blažena Musilová, Ph.D.**

Katedra oděvnictví

Konzultant diplomové práce: **Ing. Josef Vosáhlo**


Katedra netkaných textilií a nanovláknenných materiálů

Datum zadání diplomové práce: **14. listopadu 2016**

Termín odevzdání diplomové práce: **5. května 2017**



Ing. Jana Drašarová, Ph.D.  
děkanka



doc. Ing. Antonín Havelka, CSc.  
vedoucí katedry

V Liberci dne 14. listopadu 2016

## Žádost o změnu termínu odevzdání závěrečné práce

Jméno a příjmení: Nadiia Kholiavko

Osobní číslo: T15000497

Studijní program: N3106 – Textýlní inženýrství

Studijní obor: 3106T017 – Oděvní a textylní technologie

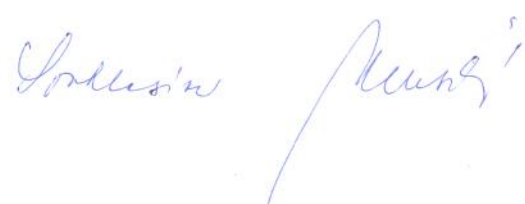
Zadávací katedra: Katedra oděvnictví

Žádám o změnu termínu odevzdání diplomové práce z 5.05.2017 na termín stanovený Harmonogramem výuky FT pro akademický rok 2017/2018.

Odůvodnění žádosti:

V Liberci dne 28 04. 2017

Podpis: 

Vyjádření vedoucího práce: 

Vyjádření vedoucího katedry:   15 MAR. 2017

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
FAKULTA TEXTILNÍ  
Katedra oděvnictví 



## Prohlášení

Byla jsem seznámena s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědoma povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

## Abstrakt

Tato práce je zaměřena na výrobu konstrukce stříhu bokovky se zvýšenou pasovou linií bezešvou technologií pro tlakovou léčbu. Návrh konstrukce je založen na základě existujících konstrukčních metodik, mechanických vlastností testovaného textilního materiálu a Laplaceově zákoně. Teoreticky spočítaná konstrukce stříhu bokovky se zvýšenou pasovou linií a tlak, který působí, jsou experimentálně ověřeny. Součástí práce je vytvoření modelu bokovky s pomocí metody konečných prvků pro účely simulace tlakových účinků bokovky na tělo člověka.

**Klíčová slova:** *Ansys, bezešvé pleteniny, keloidy, kompresní oděv, Laplaceův zákon*

## Abstract

This thesis is concerned with the manufacturing of the pattern of seamless high waist girdle intended for compression treatment. The pattern design is based on existing clothing constructions, mechanical properties of the tested textile material and the Laplace law. The theoretically calculated pattern design of the high waist girdle along with the exerted pressure are experimentally verified. Further in the work, a Finite Elements Method model of the high waist girdle is created and used for simulating the compression effect on the human body.

**Key words:** *Ansys, compression garment, keloids, Laplace law, seamless knitted fabric*



## Poděkování

Za pomoc s touto závěrečnou prací bych chtěla poděkovat své vedoucí, paní Ing. Blaženě Musilové, za kouzelné připomínky, pomoc s odbornou terminologií a vyjádřením mých názorů v českém jazyce. Také chci poděkovat konzultantu této práce, panu Ing. Josefu Vosáhlovi z Katedry netkaných textilií Technické univerzity v Liberci, za cenný čas a pomoc s prostředím Ansys.

Ovšem můj největší vděk patří mým rodičům a mému partneru Oldovi – jejich obrovská podpora umožnila této práci spatřit světlo světa.

# Obsah

<b>Abstrakt</b>	<b>7</b>
<b>Obsah</b>	<b>10</b>
<b>Seznam obrázků</b>	<b>13</b>
<b>Seznam tabulek</b>	<b>15</b>
<b>Seznam zkratk</b>	<b>17</b>
<b>Seznam symbolů</b>	<b>18</b>
<b>Úvod</b>	<b>20</b>
<b>1 Tlaková léčba</b>	<b>23</b>
1.1 Hypertrofické jizvy a keloidy . . . . .	23
1.2 Bokovka se zvýšenou pasovou linií . . . . .	24
1.3 Stanovení kompresních tříd . . . . .	25
1.4 Měření a výpočet tlaku u kompresního prádla . . . . .	26
<b>2 Pleteniny</b>	<b>28</b>
2.1 Mechanické vlastnosti pletenin . . . . .	28
2.1.1 Pevnost a tažnost . . . . .	28
2.1.2 Pružnost . . . . .	29
2.2 Bezešvé pleteniny . . . . .	32

<b>3</b>	<b>Metoda konečných prvků</b>	<b>35</b>
3.1	Princip metody . . . . .	35
3.2	Ansys Workbench . . . . .	36
3.3	Tvorba materiálového modelu . . . . .	36
3.3.1	Materiálové modely pro hyperelastické materiály . . . . .	38
<b>4</b>	<b>Konstrukční metodiky</b>	<b>39</b>
<b>5</b>	<b>Praktická část</b>	<b>46</b>
5.1	Experimentální testování použitého textilního materiálu . . . . .	46
5.1.1	Materiálové složení . . . . .	46
5.1.2	Statická zkouška tahem . . . . .	47
5.1.3	Měření plošné hmotnosti . . . . .	51
5.1.4	Měření tloušťky textilního materiálu . . . . .	51
5.2	Určení vlastností použitého textilního materiálu . . . . .	51
5.2.1	Stanovení meze pružnosti . . . . .	51
5.3	Metoda stanovení konstrukčních algoritmů pro tvorbu bezešvého stříhu kompresního prádla pro tlakovou léčbu . . . . .	52
5.3.1	Stanovení přídavků k tělesným rozměrům probanda pro dosažení tlaku nutného pro druhou kompresní třídu . . . . .	52
5.3.2	Úpravy vybrané konstrukční metodiky . . . . .	57
5.3.3	Výroba prototypu . . . . .	60
5.3.4	Měření kompresních účinků . . . . .	61
5.4	Simulace . . . . .	61
5.4.1	Definování materiálu . . . . .	62
5.4.2	Simulace statické zkoušky tahem . . . . .	62
5.4.3	Simulace kompresních účinků na kruhový válec . . . . .	63
5.4.4	Simulace kompresních účinků kompresního prádla . . . . .	64
<b>6</b>	<b>Srovnání a diskuze výsledků</b>	<b>67</b>
	<b>Závěr</b>	<b>70</b>

Literatura	72
A Měření plošné hmotnosti a tloušťky pleteniny	77
B Mez pružnosti – grafické znázornění	78
C Konstrukce bokovky se zvýšeným pasovým krajem	83
D Výpočet tělesných přídavků	88
E Úprava stříhu bokovky pro bezešvou metodu	91
F Měření tlaku s pomocí senzoru PicoPress	92

## Seznam obrázků

1.1	Porovnání hypertrofické jizvy a keloidy . . . . .	24
1.2	Bokovka se zvýšenou linií pasu . . . . .	25
1.3	Laplaceův zákon: válcové těleso a koule . . . . .	26
2.1	Pracovní diagram pleteniny . . . . .	30
2.2	Určení meze pružnosti pomocí Rambergovy-Osgoodovy rovnice . . . . .	31
2.3	Stanovení meze pružnosti . . . . .	32
2.4	Uplatnění elastické a nepružné příže pro vytvoření tvarovaného oděvu . . . . .	34
3.1	Jedno- a dvouosé napětí . . . . .	37
4.1	Znázornění kuželovitých základů ženské postavy . . . . .	40
4.2	Výkres stříhu bokovky . . . . .	41
4.3	Výkres stříhu body – W. Aldrich . . . . .	41
4.4	Výkres stříhu body – K. Shin . . . . .	42
4.5	Výkres stříhu historického korzetu . . . . .	44
4.6	Znázornění tělesných rozměrů . . . . .	45
5.1	Vzorek pleteniny . . . . .	47
5.2	Graf deformační křivky v tahu v různých směrech . . . . .	49
5.3	Znázornění měření rozměrů na figuríně AlvaForm . . . . .	53
5.4	Vztah mezi a) tahovou zkouškou a b) Laplaceovým zákonem . . . . .	54
5.5	Graf závislosti relativního prodloužení na napětí – měřená data a model . . . . .	55
5.6	Upravená konstrukce bokovky se zvýšenou pasovou linií . . . . .	58
5.7	Mooney-Rivlinův model . . . . .	63

5.8	Znázornění tlaku působícího na válec . . . . .	64
5.9	Zobrazení sítě aplikované na model . . . . .	65
5.10	Zobrazení tlaku působícího na figurínu . . . . .	66
B.1	Znázornění meze pružnosti ve směru sloupku . . . . .	78
B.2	Znázornění meze pružnosti ve směru řádku . . . . .	80
B.3	Znázornění meze pružnosti v diagonálním směru . . . . .	81
C.1	Konstrukce bokovky se zvýšeným pasovým krajem . . . . .	83
E.1	Znázornění upravené konstrukce bokovky se zvýšenou pasovou linií pro výrobu bezešvou metodikou . . . . .	91
F.1	Měření kompresních účinků vyrobených modelů . . . . .	92

## Seznam tabulek

1.1	Tlakové třídy kompresního prádla . . . . .	26
3.1	Podmínky uplatnění materiálových modelů . . . . .	38
4.1	Vstupní parametry pro konstrukční metodiky . . . . .	45
5.1	Parametry pro statickou zkoušku tahem . . . . .	48
5.2	Statistické zpracování měření deformační křivky v různých směrech .	50
5.3	Srovnání mezí pružnosti . . . . .	52
5.4	Tělesné rozměry figuríny Alva Form . . . . .	53
5.5	Hodnoty koeficientů modelů závislosti prodloužení na napětí . . . . .	56
5.6	Rozdíl mezi konstrukcí stříhu pro upravenou a neupravenou bokovku	59
5.7	Kompresní účinky modelu bokovky . . . . .	61
5.8	Srovnání výsledku simulace a experimentálních dat . . . . .	63
A.1	Měření plošné hmotnosti pleteniny . . . . .	77
A.2	Měření tloušťky pleteniny . . . . .	77
C.1	Algoritmus pro tvorbu modelové úpravy bokovky se zvýšeným pasovým krajem . . . . .	84
D.1	Výpočet tělesných přídavků pro dosažení druhé kompresní třídy (3 066–4 266 Pa) s pomocí Laplaceova zákona ve směru sloupku . . . .	88
D.2	Výpočet tělesných přídavků pro dosažení druhé kompresní třídy (3 066–4 266 Pa) s pomocí Laplaceova zákona ve směru řádku . . . . .	89

D.3 Výpočet tělesných přídavků pro dosažení druhé kompresní třídy (3 066–4 266 Pa) s pomocí Laplaceova zákona v diagonálním směru . . .	90
--	----



## Seznam zkratk

- FT** Fakulta textilní Technické univerzity v Liberci  
**MKP** Metoda konečných prvků  
**TUL** Technická univerzita v Liberci

## Seznam symbolů

Symbol	Jednotka	Význam
$A$	m	průřez vzorku
$a_i, i = 1-4$	—	koeficienty modelu
$b$	m	šířka vzorku
$bd$	cm	boční délka
$bhb$	cm	hloubka boku
$bhs$	cm	hloubka sedu
$\Delta C$	cm	změna obvodu
$C_1$	cm	obvod výrobku v neroztaženém stavu
$C_2$	cm	obvod těla člověka
$C_{01}$	—	materiálová konstanta
$C_{10}$	—	materiálová konstanta
$D_1$	—	materiálová konstanta
$d$	mm	tloušťka materiálu
$dz$	cm	délka zad
$E$	Pa	Youngův modul
$F$	N	síla
$F_E$	N	síla úměrnosti
$F_0$	N	síla pružnosti
$G$	Pa	modul pružnosti ve smyku
$h$	cm	vzdálenost mezi jednotlivými obvody
$i$	—	obecný index

Symbol	Jednotka	Význam
$K$	Pa	objemový modul
$L$	m	délka vzorku
$L_0$	m	původní délka vzorku
$\Delta L$	m	změna délky
$M$	g/m <sup>2</sup>	plošná hmotnost
$m$	g	hmotnost
$n$	—	materiálová konstanta
$ob$	cm	obvod boků
$oh$	cm	obvod hrudníku
$op$	cm	obvod pasu
$opp$	cm	obvod pod prsy
$os$	cm	obvod dolního kraje výrobku
$P$	Pa	tlak
$p_k$	cm	přídavek na kompresi
$r$	m	poloměr
$S$	m <sup>2</sup>	plocha
$šz$	cm	šířka zad
$T$	N/m	tah stěn
$V$	m <sup>3</sup>	objem
$vph$	cm	výška od pasu k hrudníku
$W$	m	šířka textilie
$\alpha$	—	materiálová konstanta
$\varepsilon$	mm/mm	poměrné délkové protažení
$\nu$	—	Poissonovo číslo
$\pi$	—	poměr obvodu a průměru kruhu, $\pi = 3,141\,592\,6$
$\rho$	g/m <sup>3</sup>	objemová plošná hmotnost
$\sigma$	Pa	mechanické napětí
$\sigma_0$	Pa	napětí pružnosti

Symbol	Jednotka	Význam
$\sigma_E$	Pa	mechanické napětí
$\varnothing 1$	cm	poloměr jednotlivého obvodu
$\varnothing 2$	cm	poloměr jednotlivého obvodu

## Úvod

Prevence a léčba hypertrofických jizev je jedním z největších úkolů v oblasti rehabilitace popálenin. Jizvy jsou výsledkem přírodního procesu hojení ran a přeměny poškozené části pokožky. Hypertrofické jizvy a keloidy jsou výsledkem abnormálního hojení jizvy. Často se vyskytují u popálenin, které nebyly včas léčeny. Ve většině případů jsou doprovázeny zdravotními problémy – bolesti, pálení, svědění, ztuhlost – které omezují aktivní život, včetně pracovních a rekreačních činností. Provedený výzkum ukazuje, že jenom v Evropě a USA 4 miliony pacientů mají jizvy po popáleninách. V zemích se středním příjmem jsou tato čísla mnohem větší [36].

Jednou z nejužívanějších možností léčby jizev je tlaková terapie. Během této terapie pacient nosí na poškozené části těla oděv z elastického materiálu, který působí na poškozenou pokožku tlak v rozmezí od cca 6 do 50 mmHg. Daný způsob umožňuje léčbu, kontrolu nebo zabránění tvorby a rozvoje hypertrofických jizev nebo keloid [23].

Tato práce je zaměřena na vývoj bokovky se zvýšenou pasovou linií bezešvou technologií pletení. Bokovka se zvýšenou pasovou linií je často užívána při léčbě nebo prevenci hypertrofických jizev či keloid po plastických operacích, jako je např. abdominoplastika, liposukce břicha, brachioplastika apod. Může také být použita po císařském řezu nebo popáleninách. Kromě toho může použití bezešvé technologie při výrobě bokovky značně zvýšit komfort pacienta kvůli odstranění nadměrného tlaku působeného v oblasti švu.

V rešeršní části této práce jsou uvedeny teoretické údaje ohledně norem, které předepisují úroveň tlaku působeného kompresním prádlem, Laplaceova zákona a mechanických vlastností pletenin. Velká pozornost je věnována mezi pružnosti pleteniny

– jsou uvedeny tři způsoby jejího hodnocení. Tato část práce také popisuje základy metody konečných prvků (MKP).

Praktická část popisuje experimenty i teoretické výpočty provedené s výrobkem a testovaným textilním materiálem (zkouška tahem, určení meze pružnosti, výpočet obvodů jednotlivých tělesných rozměrů pro dosažení druhé kompresní třídy apod.), a jejich ověření na hotovém výrobku a při simulaci s pomocí specializovaného software.

# 1 Tlaková léčba

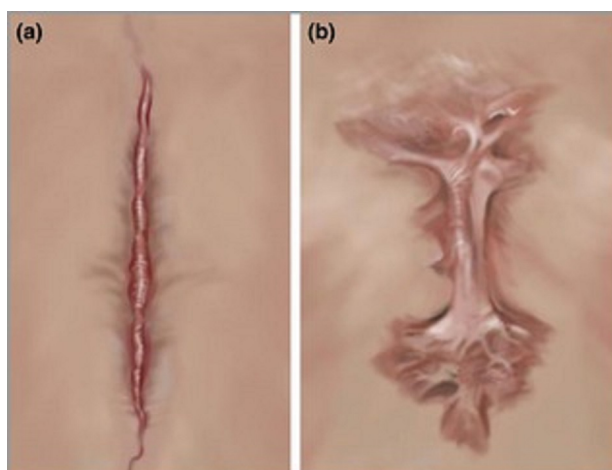
Léčba hypertrofických jizev s pomocí komprese je známa již ze 16. století, ale k prevenci či k léčbě jizev po popáleninách je tato metoda používána teprve od 70. let 20. stol. V lékařských kruzích je rozšířena domněnka, že komprese může způsobit zrání jizev i kontrolu syntézy kolagenu pomocí zmenšení průtoku krve, kyslíku a živin. Ve výsledku zmenšuje červenost a otok jizvy. Tlak také působí snížení tvorby kolagenu v jizvě na úroveň normálně hojené jizvy. Mechanická zátěž ovlivňuje změny v kolagenových vláknech a redukuje vývoj kolagenových uzlíků. Následkem toho se jizva ztenčuje a změkčuje [9].

## 1.1 Hypertrofické jizvy a keloidy

Při poranění pokožky, například popálení, se nad místem zranění formuje z vláknenné tkáně jizva, která je určená pro klidný proces hojení rány a její ochranu od vnějšího okolí. Občas se tkáň jizvy rozrůstá nadměrně a formuje hladký a tvrdý útvar, který se nazývá keloida. Keloidy mohou mít mnohem větší velikost, než samotné zranění. Častými oblastmi lokace keloid jsou prsa, ramena a tváře. I když keloidy nejsou bolestivé, jejich přítomnost může nést nežádoucí kosmetický diskomfort.

Hypertrofické jizvy jsou také zvláštním útvarem na pokožce, které se tvoří kvůli nadměrnému množství kolagenu, který působí rozrůstání jizvy. Hypertrofické jizvy ale nedorůstají do velikosti keloid. Často jimi prochází cévy a nervy. Hypertrofické jizvy jsou červené a tenké, často bolestivé nebo svědivé. Pokud se nachází na kloubech, mohou vadit běžnému pohybu končetin.

Důvody estetiky, komfortu a volnosti pohybu dělají léčbu keloid a hypertro-



Obrázek 1.1: Porovnání hypertrofické jizvy (a) a keloidy (b) [37]

fických jizev důležitým úkolem. Jednou z nejpoužívanějších metod léčby je léčba kompresním prádlem.

## 1.2 Bokovka se zvýšenou pasovou linií

Kompresní prádlo je důležitou součástí pooperační péče. Tato diplomová práce se z celého sortimentu pooperačního kompresního prádla soustředí na výrobu stříhu bokovky se zvýšenou pasovou linií pro ženy (obr. 1.2). Takový druh prádla zajišťuje správný proces hojení po abdominoplastice, liposukci břicha, brachioplastice, jizvách po popálení, císařském řezu a dalších operačních zásazích.





Obrázek 1.2: Bokovka se zvýšenou linií pasu [1]

### 1.3 Stanovení kompresních tříd

Výroba kompresního prádla s určitým tlakem je důležitá. Je experimentálně dokázáno, že tlak má přímý vliv na tvorbu jizev. Tlak způsobený prádlem je určený napětím pleteniny, počtem vrstev konstrukce, anizotropním chováním a směrem tažnosti [22].

V současné době ve světě neexistuje žádná jednotná oficiální klasifikace kompresního prádla podle kompresního účinku, který daný druh oděvu působí na tělo. Avšak většina výrobců a vědců souhlasí s roztríděním kompresního prádla podle skupin uvedených v tabulce 1.1. Mimoto s hodnotami v níže uvedené tabulce souhlasí i dokument, vydaný RAL Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung [27].

Výrobci kompresního prádla doporučují pro léčbu jizev po popáleninách oděv s tlakem 25 mmHg, časem a užíváním ale materiál ztrácí svoji tažnost, a tak se míra komprese snižuje. Výzkum ukazuje, že u většiny kompresního prádla klesne míra komprese během prvního měsíce používání na polovinu [21].

Tabulka 1.1: Tlakové třídy kompresního prádla [4]

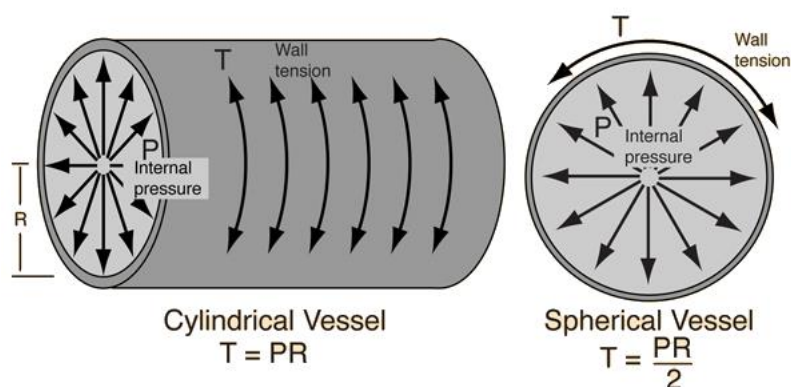
Třída	Tlak (mmHg)	Tlak (kPa)	Účel použití
1	18–21	2,4–2,8	profylaktický
2	23–32	3,1–4,3	léčebný kompenzační
3	34–46	4,5–6,1	léčebný kompresní
4	48–60	6,5	speciální a léčebně pomocný

## 1.4 Měření a výpočet tlaku u kompresního prádla

Nejběžnější postupy pro správný návrh kompresního oděvu se zadaným tlakem jsou dva: metoda koeficientu redukce a Laplaceův zákon.

První – metoda koeficientu redukce – je nejpoužívanější v masové výrobě. Tato metoda umožňuje snížit počet sledovaných rozměrů těla jako vstupních parametru, díky vlastnosti tažné textilie, která má schopnost se rozměrově přizpůsobit rozměru a tvaru lidského těla [13].

Druhá metoda je výrazně přesnější. Jejím základem je Laplaceův zákon – čím větší je poloměr nádoby, tím větší musí být tah stěn, aby udržely vnitřní tlak tekutiny (obr. 1.3) [5].



Obrázek 1.3: Laplaceův zákon: válcové těleso a koule [5]

Za předpokladu, že lidské tělo má tvar válce, platí klasické znění Laplaceova zákona:

$$P = \frac{T}{r}, \quad (1.1)$$

kde  $T$  je tah stěn válce s poloměrem  $r = \frac{C}{2\pi}$ , který je nutný, aby válec vydržel vnitřní tlak  $P$ .

Laplaceův zákon umožňuje vyrábět prádlo s vybraným tlakem na určité části těla. Přitom je možné měnit data v souvislosti s vybraným druhem plošné textilie a jejími charakteristikami tažnosti a prodloužení.

Kromě dimenzování tlaku při konstrukci prádla lze tlak působený konečným výrobkem na pokožku určit pomocí figuríny vybavené tlakovými senzory, nebo s pomocí měřicích přístrojů.

## 2 Pleteniny

Tato kapitola se zabývá popisem pletenin jako nejčastěji používaného materiálu při výrobě zboží pro tlakovou léčbu, jejich mechanickými vlastnostmi i tím, jak tyto vlastnosti vhodně využít při projektování kompresních výrobku. Kromě toho jsou zde krátce popsány bežešvé pleteniny, způsoby jejich výroby a tvarování.

### 2.1 Mechanické vlastnosti pletenin

Mechanické vlastnosti mají největší vliv na vlastnosti textilie. Textilní materiály jsou během použití mechanicky namáhány různým způsobem. U kompresních výrobku se jde běžně o schopnosti pleteniny vrátit do původního tvaru po opakovaném zatížení. Pro hodnocení kvality kompresních výrobku mají význam tyto veličiny: pevnost v tahu, deformace v tahu (tažnost) a pružnost pleteniny.

#### 2.1.1 Pevnost a tažnost

Pevnost a tažnost pletenin jsou nejčastěji užívané hodnoty charakterizující mechanické vlastnosti vláken. Sílu, která je potřebná k přetržení vzorku, charakterizuje pevnost. Sama o sobě nemá pevnost žádný význam pro popis oděvních pletenin, protože na textilie určené pro oděv nepůsobí při běžném použití síla nutná k jejich přetrhu.

U mechanicky zatížených materiálů dochází vlivem napětí ke změně původního tvaru vzorku. Tento efekt se nazývá tažnost. Tažnost pletenin je způsobena vazbou pleteniny [20].

Pevnost a tažnost jsou dvě veličiny, výsledkem jejich měření (pomocí tahové

zkoušky, viz kapitola 5.1.2) je deformační křivka. Tato křivka (např. na obr. 2.1) vyjadřuje závislost napětí  $\sigma$  na relativní deformaci  $\varepsilon$ , kde napětí vzniká silou  $F$  působící na vzorek o průřezu  $A = dW$ :

$$\sigma = \frac{F}{A}, \quad (2.1)$$

( $d$  je tloušťka materiálu a  $W$  šířka vzorku).

Při jednoosém zatížení je deformace  $\varepsilon$  funkcí prodloužení vzorku  $\Delta L = L - L_0$  a jeho počáteční délky  $L_0$  [17]:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0}. \quad (2.2)$$

### 2.1.2 Pružnost

Pleteniny, stejně jako jakékoliv jiné materiály, mají v určité míře schopnost vracet se do původního rozměru a tvaru. Tato vlastnost se nazývá pružnost. Po dlouhodobém užívání výrobku z pleteniny dochází k určité deformaci textilního materiálu. Po cyklickém zatěžování a odlehčování, což odpovídá procesu běžného nošení, dochází k trvalé deformaci pleteniny, a spolu s tím i ke ztrátě schopnosti udržovat pevný tlak, což je pro kompresní výrobky prioritním faktorem. Proto je zkoumání pružnosti pleteniny důležité [20].

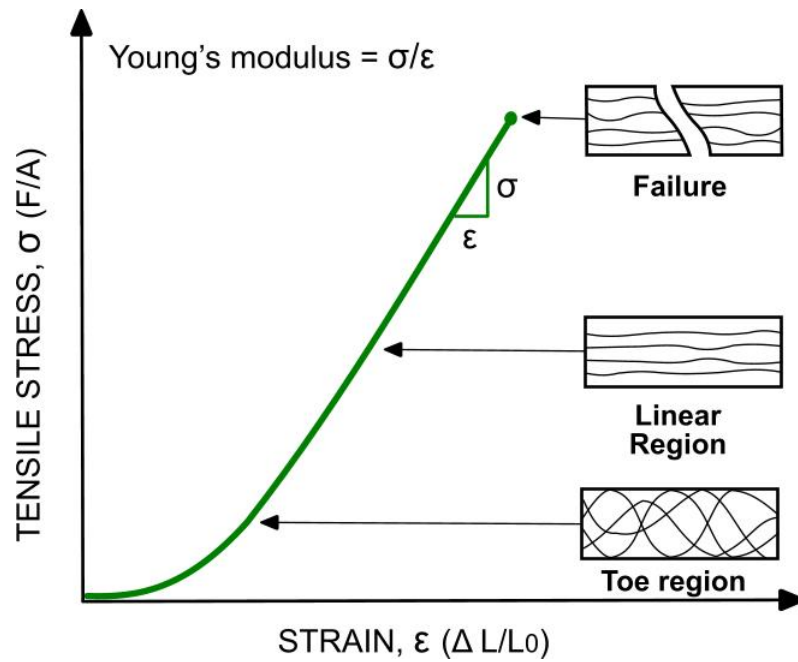
Pracovní diagram pleteniny a méně pružných textilních materiálu se liší. Pleteniny lze popsat jako hyperelastický anizotropní materiál s nelineárním chováním. Méně pružné textilie vykazují lineární chování.

Křivka závislosti protažení na napětí pleteniny se skládá ze tří oblastí (obr. 2.1):

**Nelineární** (toe region) popisuje jev, kdy se všechna oka v pletenině tvarově deformují pod vlivem působících sil a začíná posuv vazných bodů po nitích;

**Lineární** je oblastí uplatnění Hookova zákona, kdy se uplatňují především elastické vlastnosti pleteniny, oka jsou výrazně zdeformovaná. Hookův zákon lze zapsat ve tvaru [17]:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}, \quad (2.3)$$



Obrázek 2.1: Pracovní diagram pleteniny [24]

kde  $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$  je relativní délkové protažení,  $E$  je modul pružnosti v tahu (Youngův modul),  $\sigma$  je mechanické napětí;

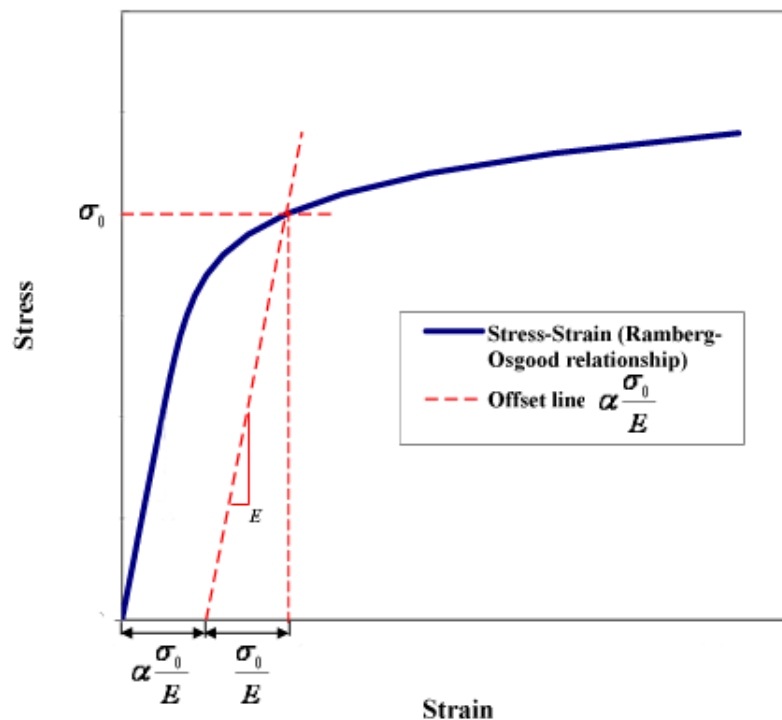
**Oblast meze pružnosti a přetrhu** (failure) kde končí oblast lineárního chování, se označuje jako mez úměrnosti, a je vyjádřena odpovídajícím napětím  $\sigma_E$  [17]:

$$\sigma_E = \frac{F_E}{A}. \quad (2.4)$$

Pletenina, která je roztažena v mezích lineární oblasti může vrátit do svého původního tvaru po odstranění působícího napětí. Oblast meze pružnosti a přetrhu u pletenin může, ale nemusí, být ve stejném místě. V této oblasti dochází k porušení celistvosti materiálu a tak k jeho přetrhu [29].

### Mez pružnosti

U většiny materiálů nastává vratná elastická deformace nejen v lineární oblasti deformační křivky, a konec platnosti Hookova zákona není bodem změny deformace s elastické na plastickou. S rostoucím zatížením u nich dochází k zakřivení deformační křivky, které odpovídá časově závislé elastické a plastické deformaci. Bod,



Obrázek 2.2: Určení meze pružnosti pomocí Rambergovy-Osgoodovy rovnice [2]

za kterým deformace přestává být vratná, se označuje jako mez pružnosti. Mez pružnosti je vyjádřena odpovídajícím napětím  $\sigma_0$  [17]:

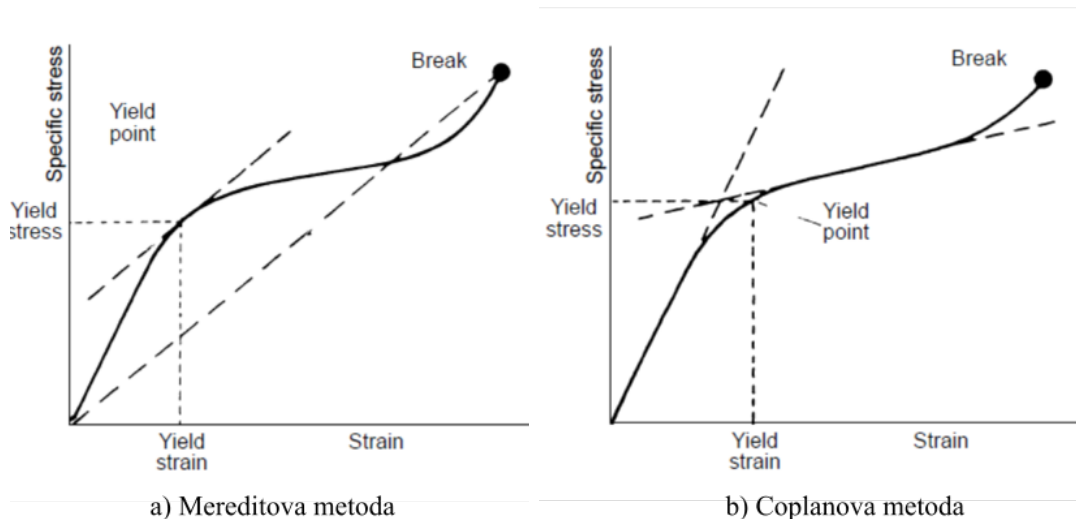
$$\sigma_0 = \frac{F_0}{A}. \quad (2.5)$$

Mez pružnosti je významnějším ukazatelem, než Youngův modul. U hyperelastických materiálů a u materiálů s nelineárním chováním, na rozdíl od neelastických, není možné mez pružnosti snadno určit. Mezi metody pro zjištění meze pružnosti u pletenin patří tři nejpoužívanější: užití Rambergovy-Osgoodovy rovnice (tzv. offset metoda), Kaplanova metoda, a Meredithova metoda.

První způsob je založen na klasickém způsobu vyhledávání meze pružnosti. Mez pružnosti je v daném případě nalezena posunutím lineární oblasti, kde platí Hookův zákon (obr. 2.2).

Tento způsob vyplývá z použití Rambergovy-Osgoodovy rovnice, kde první část rovnice popisuje elastickou deformaci a druhá plastickou [28]:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \alpha \frac{\sigma}{E} \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{n+1}. \quad (2.6)$$



Obrázek 2.3: Stanovení meze pružnosti [32]

$\sigma$  je napětí,  $\varepsilon$  je prodloužení,  $E$  je Youngův modul,  $\sigma_0$  je hledaná mez pružnosti,  $\alpha$  a  $n$  jsou materiálové konstanty. Většinou se pro  $n$  užívají hodnoty 5 a více, v souvislosti s experimentálními daty. Velikost  $\alpha$  je také určena z experimentálních dat. V praxi ale se často pro elastické a hyperelastické materiály, jako např. pletenina, užívá hodnota  $\alpha \frac{\sigma_0}{E} = 2\%$ .

Podle Bowera se však uvažuje, že u křivek, které popisují chování pletenin, není možné najít danou metodou mez pružnosti, proto je lepší uvažovat jenom mez platnosti lineární deformace [10], čili Youngova modulu. Youngův modul může být spočítán jako koeficient tečny ke křivce v oblasti lineárního chování [30].

V druhém způsobu, nabízeném Meredithem, se nejdříve spojuje přímkou začátek křivky a bod přetrhu. Mez pružnosti je v daném případě charakterizována jako bod dotyku tečny, rovnoběžné se spojnicí počátku a bodu přetrhu (obr. 2.3) [32].

Třetí metoda – Coplanova metoda – charakterizuje mez pružnosti jako průsečík dvou tečen vedených od počátku a konce deformační křivky (obr. 2.3) [16].

## 2.2 Bezešvé pleteniny

Výroba bezešvých oděvů nabývá čím dál větší popularity díky zvýšenému senzornickému, ergonomickému a termofyziologickému komfortu. Je užitečná i pro oděvy



používané pro léčebné účely. Pro dosažení žádaného účinku a zlepšení stavu pacienta s hypertrofickými jizvami a keloidami musí pacient nosit kompresní prádlo cca 21–23 hodin denně po dobu několika měsíců, což může být diskomfortní. Mezi častými problémy, na které si pacienti stěžují, je i působení nevhodným materiálem a tlakem. Díky bezešvým metodám je pacient ušetřen nadměrného tlaku působeného švy na poškozené části těla. To zvyšuje komfort pacienta, a tak i efektivitu terapie kompresním prádlem.

Bezešvé pleteniny se vyrábí buď na okrouhlém pletacím stroji, nebo na plochém pletacím stroji [12]. Moderní okrouhlé pletací stroje mohou vyrábět oděv beze švu s předem naprogramovaným tvarem. U bezešvého oděvu, vyrobeného na okrouhlých pletacích stojích, je těžké navrhnout design sofistikovaných výrobků kvůli problémům se změnou poloměru pleteného válce. Použití kruhového jehelního lůžka však dává možnost měnit tvar válce [19].

Potřeba zvyšování produktivity a zmenšování odpadu přivedla k vývoji technologie hotového oděvu (complete garment technology), která umožňuje výrobu objemných výrobků. Tato technologie je uplatněna na plochém pletacím stroje.

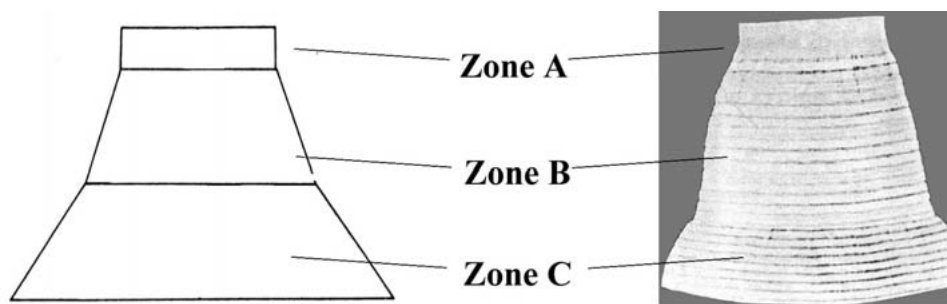
Výroba bezešvého oděvu jak na okrouhlém pletacím stroji, tak na plochém, není možná bez tvarování. Nejčastější způsoby, které umožňují tvarování při pletení jsou: použití elastických a neelastických vláken, užití vějířovitého paprsku, manipulace s počtem oček, apod.

### **Užívání elastických a neelastických vláken**

Metoda byla poprvé použita A. P. S. Sawhneym. Sawhney použil pletené hadice s různou tažností. Výrobek, v Sawhneyho případě to byla sukně, byl rozdělen na zóny. Rozdílu objemu v těchto zónách bylo dosaženo pomocí včlenění elastických vláken (obr. 2.4) [7].

### **Užití vějířovitého paprsku**

Paprsky ve tvaru vějířů jsou nejčastěji používané v dekorativních účelech, ale mohou se také používat při výrobě hadicových pletenin se žádaným tvarem. Vějířovitý



Obrázek 2.4: Uplatnění elastické a nepružné příze pro vytvoření tvarovaného oděvu [7]

paprsek instalovaný na člunkový pletací stroj může být spouštěn a zvednut pomocí páky [7]. Takový postup umožňuje malou regulaci šířky nitě sloupce.

### **Manipulace s počtem oček**

Tvarování také může být dosaženo s pomocí snížení nebo zvýšení počtu oček – takzvané ujímání. Pro zvětšení šířky jsou oka přenášena na jehlu mimo hranu okraje pleteniny, a naopak při zúžení. Nejmenší míra, která může být přidána nebo odebrána, se musí rovnat rozměru oka, proto občas není možné dosáhnout přesné velikosti hotového výrobku, která by byla dosažena při tvarování pomocí stříhu [19].

### **Trojrozměrné formy, tkané přímo na tkalcovském stavu**

Tento způsob, popsáný Alexandrem Busgenem, umožňuje tvorbu trojrozměrných forem přímo na tkalcovském stavu. Tento způsob může být použit pro tkaní jakékoliv 3D formy ve formě mušle. Pro použití této metody tkaní je potřeba počítač pro řízení tkalcovského stavu, a sám stav musí být vybaven tvarovacím zařízením, které kontroluje délku osnovy a útku. Pro tvorbu formy mají osnova a útek přísun plátna s předstihem [11].

## 3 Metoda konečných prvků

Metoda konečných prvků (MKP) je numerickou metodou pro výpočet parciálních diferenciálních a integrálních rovnic, které vznikají při řešení fyzikálních úloh. Metoda je široce používána pro řešení úloh deformace pevných těles, vedení tepla, hydrodynamiky a elektrodynamiky.

### 3.1 Princip metody

Oblast, ve které jsou hledána řešení diferenciálních rovnic, je rozdělena na konečný počet podoblastí (prvků). V každém z takových prvků se hledá druh aproximační funkce. V jednoduchém případě jde o polynom prvního stupně. Mimo oblast svého prvku je aproximační funkce rovna nule. Aproximační funkce na hranicích prvků (v hraničních bodech) je řešením úlohy. Koeficienty aproximační funkce jsou obvykle hledány z podmínky rovnosti sousedních funkcí na hranicích mezi prvky (v bodech).

V dalším kroku se tvoří systém lineárních algebraických rovnic. Počet rovnic je roven počtu neznámých v bodech, ve kterých se hledá řešení počáteční úlohy, a je přímo úměrný počtu prvků. Kvůli tomu, že každý z prvků je spojen s omezeným počtem sousedních prvků, má systém lineárních algebraických rovnic tvar řídkých matic, což značně zjednodušuje výpočet. Pro matice jsou zavedeny okrajové podmínky, a matice se upravují. Systém rovnic ve formě matic je řešen jedním z několika možných způsobů [14].

## 3.2 Ansys Workbench

MKP je široko používaná pro řešení různých praktických úloh a našla své použití v nespočetných komerčních a nekomerčních softwarech. Jedním z takových programů jsou softwary, které nabízí společnost Ansys. Jejich platforma Ansys Workbench [8] byla použita pro simulaci fyzikálních úloh v této diplomové práci. Daná platforma nabízí všechny prvky pro vytvoření simulace, od geometrie do kompletního vyhodnocení výsledku. Výhodou je také propojení s nejpoužívatelnějšími CAD programy pro tvorbu komplikovanějších geometrických tvarů.

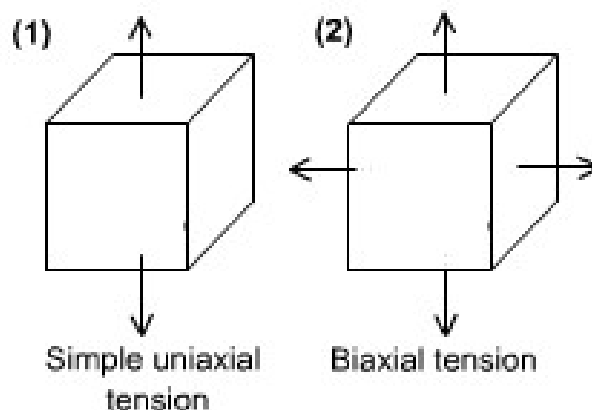
## 3.3 Tvorba materiálového modelu

Hyperelastické materiálové modely jsou nejčastěji používány pro popis chování materiálu, které mají velkou deformaci. Do oblasti jejich použití patří simulace mechanického chování elastomeru, a také pěn, biomateriálů a podobně.

Zatímco lineární elastické materiály mohou být popsány s pomocí dvou materiálových konstant (například Youngova modulu a Poissonova čísla, nebo Poissonova čísla a smykového modulu), hyperelastické modely jsou popsány pomocí hustoty deformační energie, to znamená, že existuje skalární funkce, která spojuje hustotu deformační energie materiálu s gradientem deformace [25].

Pro popis hyperelastického materiálu v softwarovém prostředí, které pracuje s MKP, je potřeba mít experimentální data. Minimálním základem jsou data jednoosého napětí a deformace. Pro lepší simulaci chování materiálu se do základních dat přidávají také data dvouosého napětí a deformace a také stlačování. Na základě testových dat se vybírá vhodný materiálový model (kap. 3.3.1). Ansys je schopný vypočítat materiálové konstanty s ohledem na implementovaná data a zvolený materiálový model. Je také možné materiálové konstanty spočítat ve speciálně určených softwarech [26].

Velkou roli v definování materiálu hraje parametr nestlačitelnosti, který může, ale nemusí být definován v souvislosti s tím, zda testovaný materiál vykazuje pevnou



Obrázek 3.1: Jednoosé (1) a dvouosé (2) napětí [33]

stlačitelnost. Pleteniny, stejně jako většina hyperelastických materiálů, jsou považovány za nestlačitelné nebo skoro nestlačitelné materiály, což odpovídá hodnotě Poissonovy konstanty  $\nu = 0,49985$  při lineárním elastickém materiálovém modelu [35].

Posledním důležitým parametrem, který popisuje materiál, je jeho hustota, nebo – pro ploché textilie – objemová měrná hmotnost. Objemová měrná hmotnost se určuje jako hmotnost  $1 \text{ m}^3$  plošné textilie:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{Sd}, \quad (3.1)$$

kde  $\rho$  je objemová měrná hmotnost,  $m$  je hmotnost textilie,  $V$  je objem textilie,  $S$  je plocha textilie a  $d$  tloušťka textilie.

Dalším důležitým krokem při provádění simulace materiálu je jeho síťování. Tvar síťových prvků při jednoduchých geometrických útvarech se má co nejvíce podobat základnímu tvaru celého objektu. Při modelování nepravidelných tvarů je pro co největší stabilitu doporučováno používat trojúhelníkový tvar síťových prvků. Co se týče velikosti prvků, není vhodné nastavovat co nejmenší rozměr, vzhledem k větší náklonnosti menších prvků k element failure při maximálních deformacích.

Tabulka 3.1: Podmínky uplatnění materiálových modelů [18]

Název modelu	Deformace	Stabilita
Neo-Hookův	$< 1 \text{ mm/mm}$	vždy stabilní
Mooney-Rivlinův	$1,5\text{--}2 \text{ mm/mm}$	nestabilní pro dvouosé zatížení
Ogdenův	od 0 do přetrhu	stabilita dle vybraných parametrů
Yeohův	na vybraném rozmezí	stabilita dle vybraných parametrů

### 3.3.1 Materiálové modely pro hyperelastické materiály

Materiálové modely pro hyperelastické materiály, které nabízí prostředí Ansys Workbench, jsou:

- Neo-Hookův model,
- Mooney-Rivlinův model,
- Ogdenův, a
- Yeohův.

Detaily těchto modelů jsou znázorněné v tabulce 3.1.

Kromě parametrů uvedených v tabulce 3.1 mají Neo-Hookovy a Mooney-Rivlinovy modely splňovat další podmínky:

$$G = 2(C_{10} + C_{01}), \quad (3.2)$$

kde  $G$  je modul pružnosti ve smyku,  $C_{10}$  a  $C_{01}$  materiálové konstanty Mooney-Rivlinova modelu, a

$$D_1 = \frac{K}{2}, \quad (3.3)$$

kde  $K$  je objemový modul a  $D_1$  materiálová konstanta Neo-Hookova modelu [18].

## 4 Konstrukční metodiky

Oděv z elastických materiálů, na rozdíl od oděvu z tkanin, nevyžaduje přídavek na volnost pohybu. Kompenzaci tohoto přídavku zajišťuje elasticita pleteniny. Pro oděvy z pletenin jsou charakteristické záporné přídavky ke konstrukčním úsečkám. Pro správné určení těchto přídavků je nutné vědět, jak se materiál chová. Kromě toho je pro kompresní prádlo důležitý výpočet dodatečných záporných přídavků pro zajištění správné kompresní třídy.

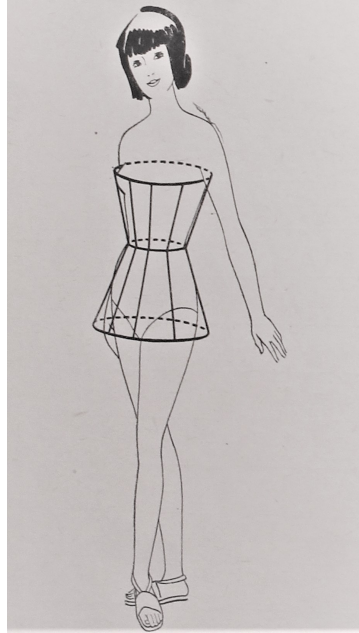
V této kapitole bude provedená analýza konstrukčních metodik vhodných pro zhotovení bokovky se zvýšenou pasovou linií, s jejich následným použitím pro formování konstrukčního postupu kompresní bokovky se zvýšenou pasovou linií.

### Konstrukce bokovky

Tato konstrukční metodika je dle Vrby [38]. Střih je symetrický. Metodika je určena pro elastické materiály. Vstupní parametry pro tuto konstrukční metodu jsou uvedené v tabulce 4.1 a na obrázku 4.6.

**Vyhodnocení konstrukční metodiky** Konstrukce je vhodná pro výrobu bokovky délkou do pasové linie. V případě nutnosti zvýšení pasové linie do obvodu pod prsy je nutné použít princip, který uvádí Vrba jako základní postup při navrhování elastického prádla – představení ženské postavy jako kuželovitých základů (obr. 4.1). Konstrukce bokovky vytvořená tímto postupem má stejný tvar, jako střih korzetu zkrácený do linie obvodu pod prsy, uvedený Vrbou ve stejné publikaci.

S ohledem na celkovou přesnost, jasnost metodiky a možnost vytvoření dalšího velikostního sortimentu je vhodné vybrat upravenou konstrukci korzetu pro sestro-



Obrázek 4.1: Znázornění kuželovitých základen ženské postavy [38]

jení konstrukce bokovky se zvýšenou pasovou linií.

### **Konstrukce body – W. Aldrich**

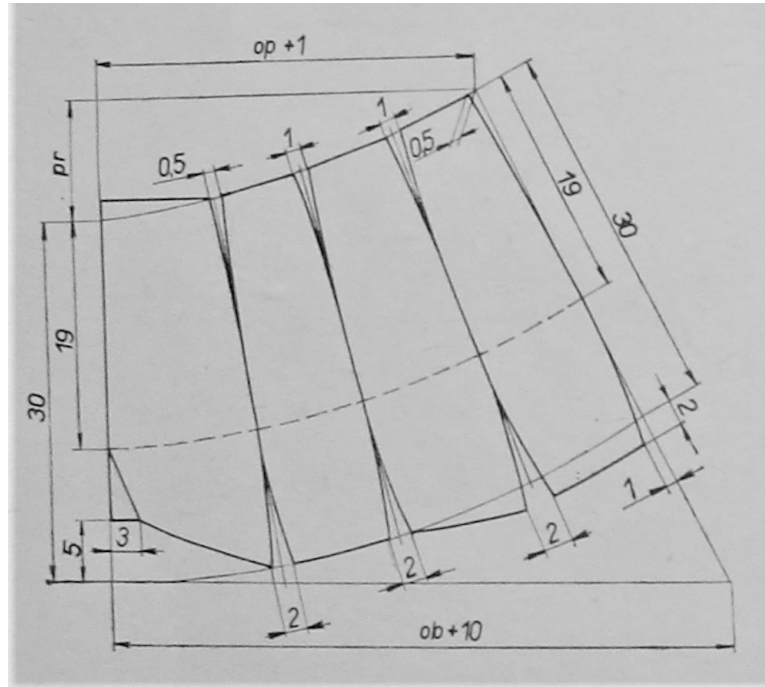
Tato konstrukční metodika je dle W. Aldricha [6]. Střih je symetrický. Přední a zadní část jsou nakreslené jedna na druhé. Metodika je určena pro elastické materiály. V publikaci jsou navržena schémata měření tělesných rozměrů. Vstupní parametry pro tuto konstrukční metodu jsou uvedeny v tabulce 4.1 a na obrázku 4.6.

**Vyhodnocení konstrukční metodiky** Tato konstrukční metodika používá málo tělesných rozměrů a většina parametrů potřebných pro kresbu konstrukční sítě a střihu je pevně stanovena konstrukční metodikou, což ji může činit nevhodnou v případě netypického druhu postavy. Střih také málo popisuje boční oblast. Z ohledu na výše zmíněné je tato metodika nevhodná pro další použití.

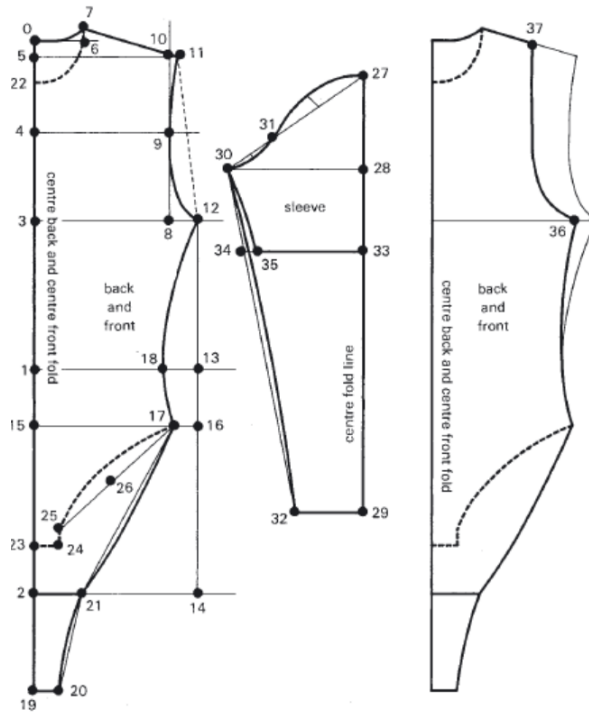
### **Konstrukce body – K. Shin**

Konstrukční metodika dle K. Shina [34]. Střih je symetrický. Metodika je určena pro elastické materiály. Střih je určen pro několik podobných výrobků najednou –

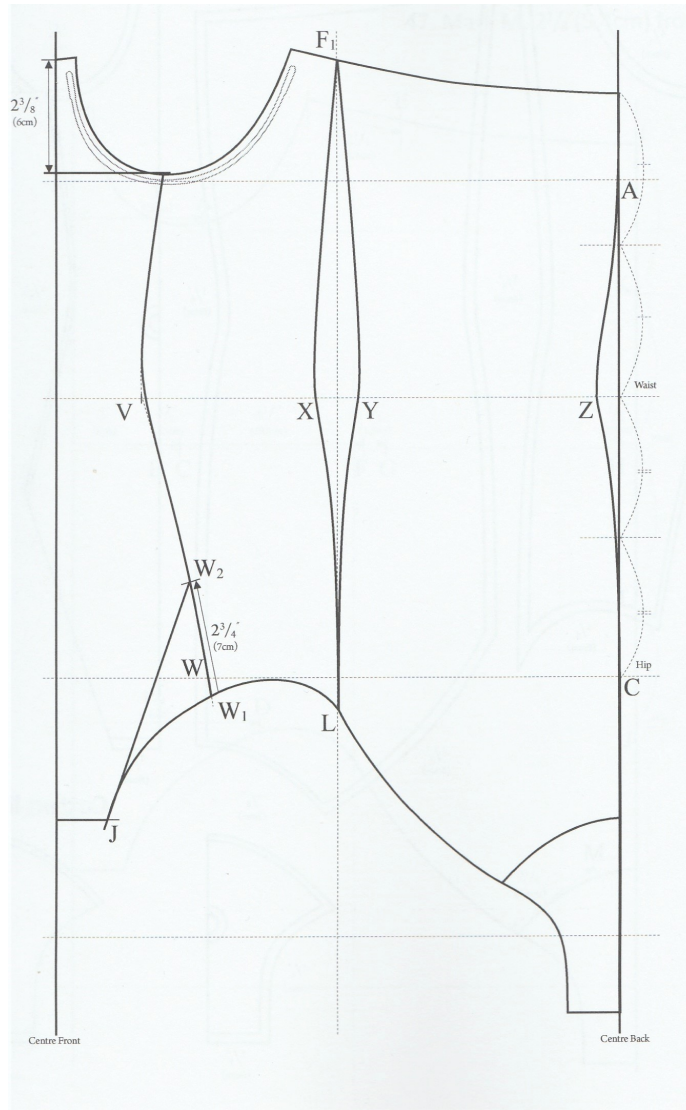




Obrázek 4.2: Výkres střihu bokovky [38]



Obrázek 4.3: Výkres střihu body – W. Aldrich [6]



Obrázek 4.4: Výkres stříhu body – K. Shin [34]

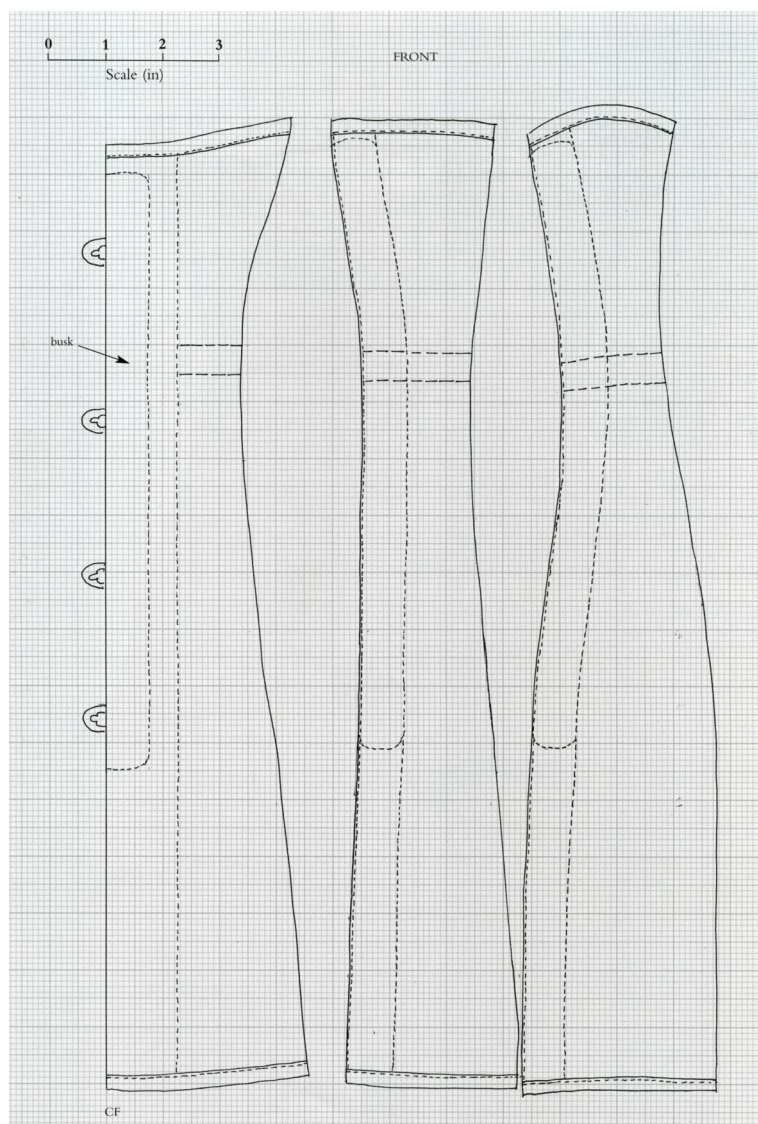
variability je dosahováno zavedením malých úprav. V publikaci jsou navržena schémata měření tělesných rozměrů. Vstupní parametry pro tuto konstrukční metodu jsou uvedeny v tabulce 4.1 a na obrázku 4.6.

**Vyhodnocení konstrukční metodiky** Tato konstrukční metodika používá málo tělesných rozměrů, a většina parametrů potřebných pro kresbu konstrukční sítě a stříhu jsou konstanty, což metodiku může činit nevhodnou v případě atypického druhu postavy. Střih dále nedostatečně popisuje boční oblast. S ohledem na výše zmíněné nedostatky je tato metodika nevhodná pro další použití.

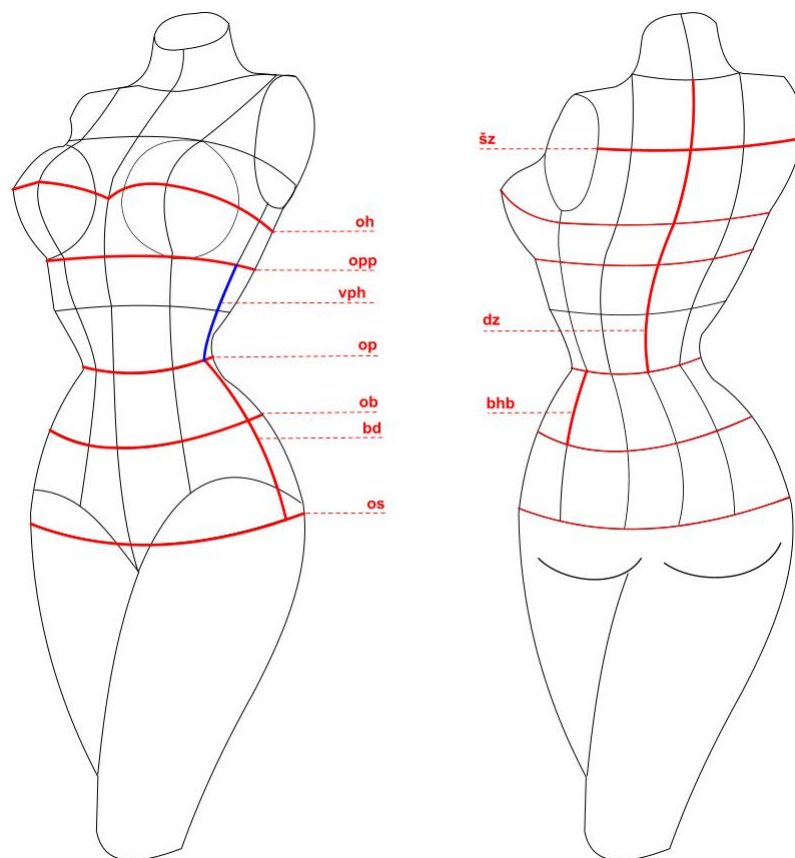
## **Konstrukce korzetu**

Konstrukce je převzata z vydání „Corsets“ [31], které je věnováno historickým korzetům. Daný korzet je datovaný rokem 1910, a byl vybrán z ohledu na jeho přiléhavost v oblasti stehů a možnost udržovat stálý tlak s pomocí šňorování. Vstupní parametry pro tuto konstrukční metodu jsou uvedené v tabulce 4.1 a na obrázku 4.6.

**Vyhodnocení konstrukční metodiky** Při přesnosti konstrukčního postupu není vhodné používat tuto metodiku, protože není určena pro elastické materiály. Tato konstrukční metodika umožňuje dosažení stálého kompresního účinku, ovšem při zvýšené tuhosti konstrukce. Výrobek nebude vhodný pro pravidelné nošení, které je jednou ze základních podmínek používání léčebného kompresního prádla.



Obrázek 4.5: Výkres stříhu historického korzetu [31]



Obrázek 4.6: Znázornění tělesných rozměrů

Tabulka 4.1: Vstupní parametry pro konstrukční metodiky

Název tělesného rozměru	Zkratka	Vrba	Aldrich	Shin
Obvod hrudníku	oh	✓	✓	✓
Obvod pasu	op	✓	–	✓
Obvod boku	ob	✓	–	✓
Obvod sedu	os	✓	–	✓
Délka zad	dz	✓	✓	✓
Šířka zad	šz	–	✓	✓
Hloubka boku	bhb	✓	–	–
Hloubka sedu	bhs	✓	–	–

## 5 Praktická část

Praktická část je zaměřena na popis testovaného materiálu, měření a vyhodnocení jeho vlastností a jejich použití při projektování výrobků. Dále je v této kapitole popsáno testování konstrukce stříhu bokovky se zvýšenou pasovou linií, vyrobené z testovaného materiálu, a měření kompresních účinků, působených výrobkem. Získaná experimentální data budou použita pro popis chování materiálu a výrobků v simulačním modelu.

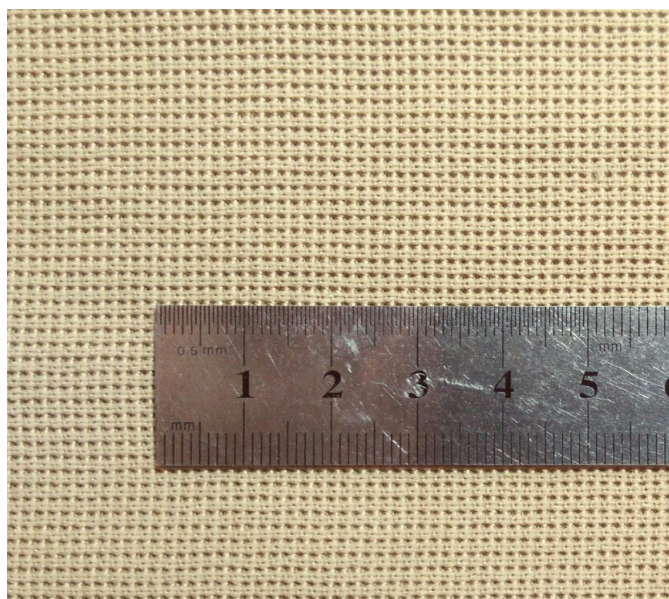
### 5.1 Experimentální testování použitého textilního materiálu

Tato kapitola je zaměřena na popis složení testovaného textilního materiálu a mechanických vlastností, zejména: pevnosti, napětí, prodloužení, plošné hmotnosti a hustoty.

#### 5.1.1 Materiálové složení

Testovaný materiál byl poskytnut firmou VARITEX, spol. s.r.o. Jedná se o plochou pleteninu FLEBOVAR (obr. 5.1). Daná pletenina patří k druhé kompresní třídě (tab. 1.1). Tlak v pletenině je rovnoměrný. Pletenina je zhotovená na pletacím stroji STOLL CMS 530. Materiálové složení vzorku: 61 % Polyamid, 31 % Latex, 8 % Lycra.





Obrázek 5.1: Vzorek pleteniny

### 5.1.2 Statická zkouška tahem

Jednou z nejběžnějších zkoušek pro zjištění mechanických vlastností pletenin je statická zkouška tahem. V této práci byla použita norma ČSN EN ISO 13934-1 – Tahové vlastnosti plošných textilií – Část 1: Zjišťování maximální síly a tažnosti při maximální síle pomocí metody Strip [40].

S pomocí této zkoušky je možné vyhodnotit maximální sílu a tažnost vzorku při plynulém zatěžování vzorku až do jeho přetržení.

Podle normy je vzorek zatěžován ve třech směrech: podélném (ve směru sloupku pleteniny), příčném (ve směru řádku pleteniny) a diagonálním směru (za diagonální směr byl uvažován úhel  $45^\circ$ ).

Dle normy ČSN EN ISO 13934-1 byl vybrán počet vzorků, jejich upínací délka, předpětí a rychlost posuvu. Upínací délka byla 100 mm, vzhledem k tomu, že předpokládaná tažnost materiálu převyšovala 75 % její původní délky. Zvolené předpětí bylo stanoveno na 5 N, jako doporučované normou pro vzorky s plošnou hmotností 200–500 g/m<sup>2</sup>. Plný výčet parametrů zvolených pro statickou zkoušku tahem je uvedený v tabulce 5.1.

Během zkoušky docházelo k přetržení vzorku v čelistech. Takové přetržení se

považuje za platné, pokud je „*hodnota přetrhu v čelistech vyšší, než nejnižší hodnota ‚normálního‘ přetrhu*“ [40]. Všechny dosažené přetrhy byly platné. Na grafech výsledky tahové zkoušky jsou uvedené od bodu s parametry 0;0, ale tahová zkouška byla provedená s respektováním 5N předpětí. Statická zkouška tahem byla provedená na trhacím přístroji M350-C5.

### **Výsledky zkoušky tahem po sloupku**

Měření bylo provedeno desetkrát. Při každém měření došlo k přetrhu vzorku. Na základě získaných dat bylo provedeno statistické vyhodnocení (tab. 5.2), a byla vytvořena průměrná křivka závislosti síly na prodloužení v sloupkovém směru (obr. 5.2a).

### **Výsledky zkoušky tahem po řádku**

Měření bylo provedeno desetkrát. Při každém měření došlo k přetrhu vzorku. Na základě získaných dat bylo provedeno statistické vyhodnocení (tab. 5.2), a byla vytvořena průměrná křivka závislosti síly na prodloužení v řádkovém směru (obr. 5.2b).

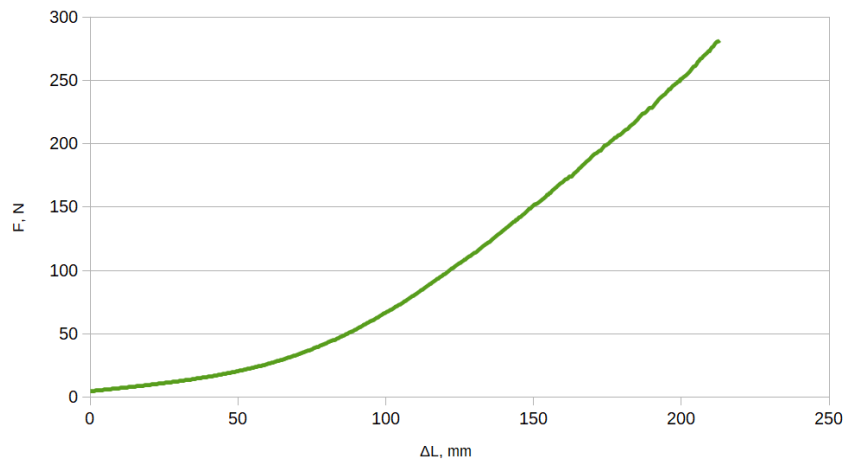
### **Výsledky zkoušky tahem v diagonálním směru**

Měření bylo provedeno desetkrát. Při každém měření došlo k přetrhu vzorku. Na základě získaných dat bylo provedeno statistické vyhodnocení (tab. 5.2), a byla vytvořena průměrná křivka závislosti síly na prodloužení v diagonálním směru (obr. 5.2c).

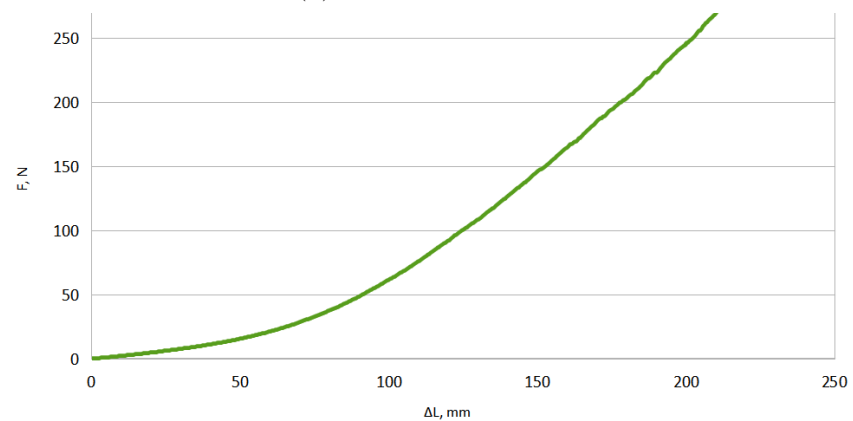
Tabulka 5.1: Parametry pro statickou zkoušku tahem

Parametr	Hodnota	
Počet vzorků v každém směru	10	
Upínací délka	100	mm
Upínací šířka	50	mm
Rychlost pohybu čelisti	100	mm/min
Předpětí	5	N

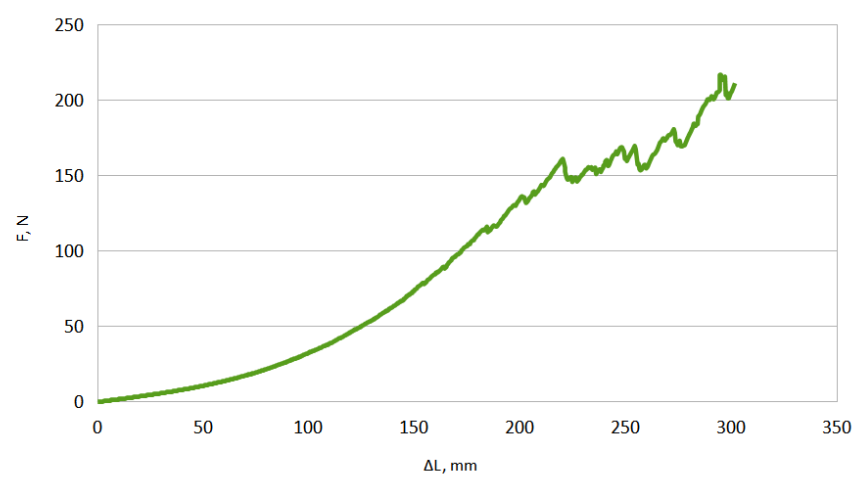




(a) v tahu po sloupku



(b) v tahu po řádku



(c) v tahu v diagonálním směru

Obrázek 5.2: Graf deformační křivky v tahu v různých směrech

Tabulka 5.2: Statistické zpracování měření deformační křivky v různých směrech

	Nejvyšší pevnost		Prodloužení při nejvyšší pevnosti		Tažnost při nejvyšší pevnosti	
<b>měření po sloupku</b>						
Aritmetický průměr	282	N	212,6	mm	183,7	%
Směrodatná odchylka	21	N	8,8	mm	6,3	%
Interval spolehlivosti (95 %)	14	N	5,8	mm	4,1	%
Minimální hodnota	247	N	197,8	mm	172,6	%
Maximální hodnota	308	N	225,9	mm	192,1	%
<b>měření po řádku</b>						
Aritmetický průměr	710	N	552	mm	515	%
Směrodatná odchylka	91	N	17	mm	20	%
Interval spolehlivosti (95 %)	60	N	11	mm	13	%
Minimální hodnota	605	N	524	mm	488	%
Maximální hodnota	854	N	583	mm	554	%
<b>měření v diagonálním směru</b>						
Aritmetický průměr	230	N	315	mm	274	%
Směrodatná odchylka	54	N	51	mm	45	%
Interval spolehlivosti (95 %)	36	N	34	mm	30	%
Minimální hodnota	164	N	257	mm	220	%
Maximální hodnota	345	N	446	mm	386	%

### 5.1.3 Měření plošné hmotnosti

Pro zjištění plošné hmotnosti byl použit vzorec:

$$M = \frac{m}{S}, \quad (5.1)$$

kde  $M$  je plošná hmotnost materiálu o hmotnosti  $m$  a ploše  $S$ .

Hmotnost materiálu byla změřena na pěti čtvercových vzorcích pleteniny o velikosti  $0,1 \text{ m} \times 0,1 \text{ m}$ . Měření bylo provedeno na vahách KERN EG 300 (přesnost 1 mg). Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce A.1 v příloze A.

Po dosažení do vzorku hmotnosti pleteniny byla vypočtená hodnota plošné hmotnosti, která je rovna  $M = 539,02 \text{ g/m}^2$ . Hustota zkušební pleteniny byla vypočtená ze vzorce 3.1 a byla stanovena  $\rho = 334,59 \text{ g/m}^3$ .

### 5.1.4 Měření tloušťky textilního materiálu

Měření tloušťky pleteniny bylo provedeno podle normy ČSN EN ISO 5084 (80 0844) [39] pomocí digitálního tloušťkoměru SDL M034A. Bylo provedeno deset měření z náhodné plochy textilního materiálu. Plocha přitlačné čelisti  $S$  byla  $0,2 \text{ m}^2$ , hodnota tlaku byla  $P = 1\,000 \text{ Pa}$ . Tloušťka pleteniny  $d$  je rovna  $1,6 \text{ mm}$ . Výsledky jednotlivých měření a jejich vyhodnocení jsou uvedené v tabulce A.2.

## 5.2 Určení vlastností použitého textilního materiálu

Tato kapitola je zaměřená na určení meze pružnosti testovaného textilního materiálu pomocí tří různých metod.

### 5.2.1 Stanovení meze pružnosti

Meze pružnosti byly spočítány pomocí tří metod popsaných v teoretické části (odd. 2.1.2). Vzhledem k tomu, že metody jsou grafické, byly pro přesné stanovení meze pružnosti pomocí všech tří metod vytvořeny skripty v prostředí GNU Octave [15]. Jako vstupní data byly použity vypočtené hodnoty napětí a prodloužení pro

sloupec, řádek a diagonální směr. Hodnoty stanovené meze pružnosti jsou uvedeny v tabulce 5.3. Grafy pro každou metodu a směr jsou uvedené v příloze B.

Tabulka 5.3: Srovnání mezi pružnosti

	Sloupec		Řádek		Diagonála	
	$\varepsilon$	$\sigma$	$\varepsilon$	$\sigma$	$\varepsilon$	$\sigma$
	mm/mm	MPa	mm/mm	MPa	mm/mm	MPa
Youngův modul	1,8	1,89	4,4	5,26	1,9	1,53
Meredithova metoda	0,95	0,75	3,1	1,84	1,02	0,48
Coplanova metoda	0,675	0,39	2,32	0,89	0,83	0,35

## 5.3 Metoda stanovení konstrukčních algoritmů pro tvorbu bežešvého stříhu kompresního prádla pro tlakovou léčbu

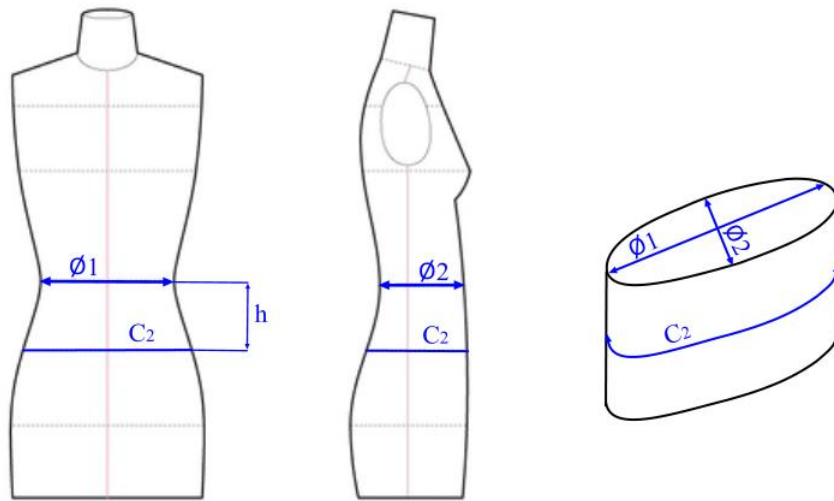
Stanovení přídavek k tělesným rozměrům člověka, jejich aplikace při konstrukci stříhu bokovky a měření tlaku byly provedeny na dámské figuríně Alva Form Women 38 2011, jež odpovídá evropským normám pro ženskou postavu. Figurína je zhotovena v měřítku 1:2, ale pro výpočet přídavek a simulaci kompresních účinků byly parametry figuríny dvakrát zvětšeny. Parametry dané figuríny jsou uvedeny v tabulce 5.4, kde  $C_2$  jsou obvody figuríny,  $h$  jsou vzdálenosti mezi jednotlivými obvody a  $\varnothing 1$  a  $\varnothing 2$  jsou poloměry jednotlivých obvodů změřené pomocí pelvimetru. Na obrázku 5.3 je naznačený způsob měření.

### 5.3.1 Stanovení přídavek k tělesným rozměrům probanda pro dosažení tlaku nutného pro druhou kompresní třídu

Pro dosažení tlaku nutného pro druhou kompresní třídu je nutné použít u konstrukce stříhu nejenom vstupní konstrukční parametry vybrané velikosti postavy, ale i sta-

Tabulka 5.4: Tělesné rozměry figuríny Alva Form

Tělesný rozměr	$C_2$ , cm	$\varnothing 1$ , cm	$\varnothing 2$ , cm	$h$ , cm
<i>opp</i>	36,0	13,3	8,84	4,5
<i>op</i>	49,0	12,25	8,88	6,0
<i>ob</i>	45,0	15,9	10,47	4,7
<i>os</i>	49,0	17,5	10,28	4,5



Obrázek 5.3: Znázornění měření rozměrů na figuríně AlvaForm

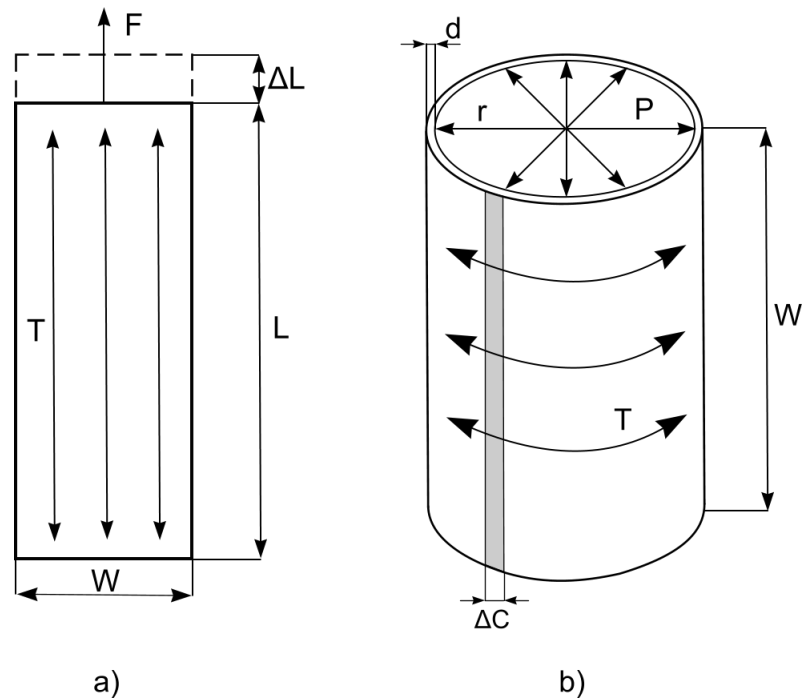
novit vhodné záporné konstrukční přídatky. V této práci je pro výpočet přídatků použit Laplaceův zákon (1.1).

Rozmezí tlaku  $P$  předepsané pro druhou kompresní třídu je 3 066–4 266 Pa. Tah stěn, který odpovídá tlaku  $P$  lze pro cylindrický tvar určit z Laplaceova zákona pomocí rovnice (1.1).

$$\sigma = \frac{PC_2}{2\pi d}. \quad (5.2)$$

Relativní prodloužení  $\varepsilon$ , které odpovídá žádanému tahu stěn  $T$ , lze určit z tahové zkoušky materiálu. Tah stěn  $T$  je v materiálu o šířce  $W$  vyvolán silou

$$F = TW. \quad (5.3)$$



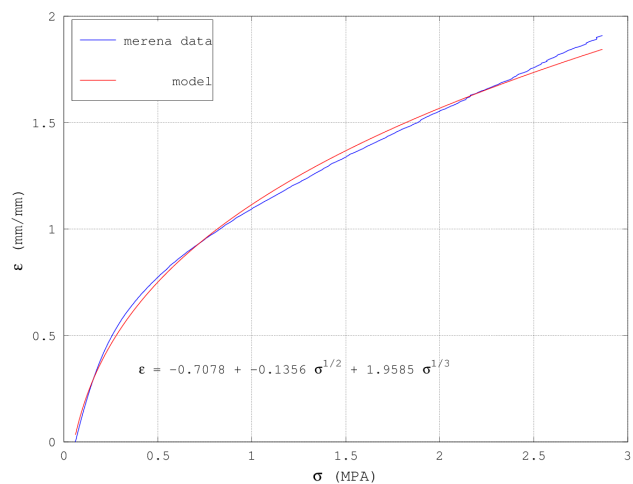
Obrázek 5.4: Vztah mezi a) tahovou zkouškou a b) Laplaceovým zákonem

V provedené tahové zkoušce byla šířka materiálu  $W = 0,05$  m.

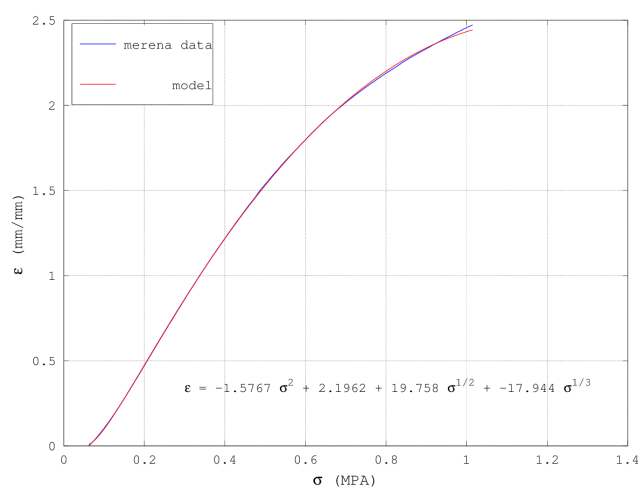
Z tahové zkoušky vyplývá, že napětím  $\sigma$  lze vyvolat relativní prodloužení  $\varepsilon$ , tedy  $\varepsilon = \varepsilon(\sigma)$ . Pro zjištění závislosti relativního prodloužení na napětí byla modelována experimentální data. Pomocí metody nejmenších čtverců bylo zjištěno, že křivku závislosti je vhodné popsat modelem

$$\varepsilon(\sigma) = a_1\sigma^2 + a_2 + a_3\sqrt{\sigma} + a_4\sqrt[3]{\sigma}, \quad (5.4)$$

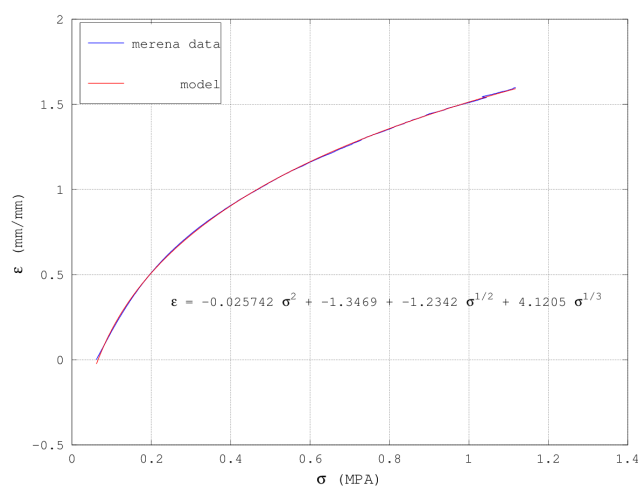
kde  $a_1, a_2, a_3$  a  $a_4$  jsou jednotlivé modelové koeficienty. Při hledání modelu pro měření směrem po sloupku stačil jednodušší model, kde  $a_1 = 0$ . Data v grafech jsou oříznuti do pracovního bodu.



(a) Ve směru sloupku



(b) Ve směru řádku



(c) V diagonálním směru

Obrázek 5.5: Graf závislosti relativního prodloužení na napětí – měřená data a model

Při návrhu stříhu je třeba určit obvod části výrobku v neroztaženém tvaru  $C_1$ . Obvod v roztaženém stavu označme  $C_2$ , odpovídá tělesným rozměrům. Změnu obvodu, vzniklou roztažením pleteniny, označme  $\Delta C = C_2 - C_1$ . Protože platí

$$\varepsilon = \frac{\Delta C}{C_1} = \frac{\Delta C}{C_2 - \Delta C}, \quad (5.5)$$

můžeme odvodit, že

$$C_1 = C_2 \left( 1 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon + 1} \right) = \frac{C_2}{\varepsilon + 1}. \quad (5.6)$$

Po dosazení (5.2) a (5.4) do rovnice (5.6) dostaneme:

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{C_2}{1 + a_1\sigma^2 + a_2 + a_3\sqrt{\sigma} + a_4\sqrt[3]{\sigma}} = \\ &= \frac{C_2}{1 + a_1(PC_2\frac{1}{2\pi d})^2 + a_2 + a_3\sqrt{(PC_2\frac{1}{2\pi d})} + a_4\sqrt[3]{(PC_2\frac{1}{2\pi d})}}. \end{aligned} \quad (5.7)$$

Hodnoty jednotlivých koeficientů získané z naměřených dat jsou uvedené v tabulce 5.5.

Tabulka 5.5: Hodnoty koeficientů modelů závislosti prodloužení na napětí

	koeficient	hodnota	$p$ -hodnota
<b>po sloupku</b>	$a_1$	0	$\text{Pa}^{-2}$ —
	$a_2$	-0,708	$< 10 \cdot 10^{-15}$
	$a_3$	-0,136	$\text{Pa}^{-1/2}$ $2,6 \cdot 10^{-4}$
	$a_4$	-1,959	$\text{Pa}^{-1/3}$ $< 10 \cdot 10^{-15}$
<b>po řádku</b>	$a_1$	-1,577	$\text{Pa}^{-2}$ $< 10 \cdot 10^{-15}$
	$a_2$	2,196	$< 10 \cdot 10^{-15}$
	$a_3$	19,758	$\text{Pa}^{-1/2}$ $< 10 \cdot 10^{-15}$
	$a_4$	-17,944	$\text{Pa}^{-1/3}$ $< 10 \cdot 10^{-15}$
<b>diagonálně</b>	$a_1$	-0,026	$\text{Pa}^{-2}$ $3,6 \cdot 10^{-5}$
	$a_2$	-1,347	$< 10 \cdot 10^{-15}$
	$a_3$	-1,234	$\text{Pa}^{-1/2}$ $< 10 \cdot 10^{-15}$
	$a_4$	4,121	$\text{Pa}^{-1/3}$ $< 10 \cdot 10^{-15}$



### 5.3.2 Úpravy vybrané konstrukční metodiky

Jako konstrukční metodika pro bokovku se zvýšenou pasovou linií byla zvolena metodika pro korzet Vrby [38].

Metodika však byla přizpůsobena k tvaru bokovky. Za prvé, stříh korzetu začíná od obvodu pod prsy, a oblast košíčků je zcela vynechána. Za druhé, vedoucím tělesným rozměrem, který určuje šířku stříhové sítě, byl vybrán obvod boku  $os$ . Do konstrukce byly také zavedeny dva nové tělesné rozměry: obvod pod prsy  $opp$  a délka od obvodu pod hrudníkem k pasu  $vhp$  (je označen na obr.4.6 modrou čarou). Místa snímání daných tělesných rozměrů jsou k vidění na obrázku 4.6. Poslední úpravou je rozdělení výběru pod prsy a v pasové části mezi předním, bočním a zadním členěním a středem zad v poměru 46:18:18:18 od velikosti pasového výběru a výběru v prsní části.

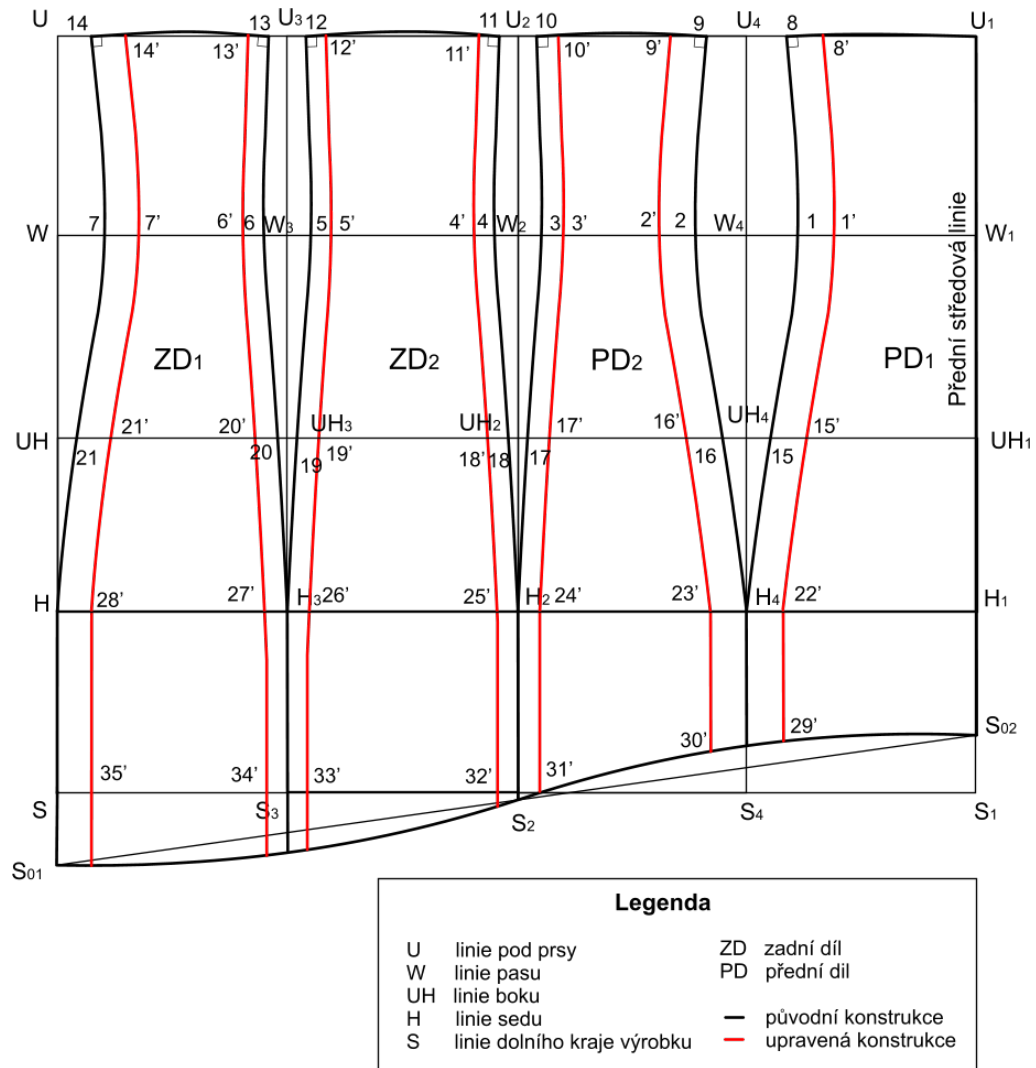
Popis jednotlivých konstrukčních kroků je uveden v tabulce C.1. Náčrtek konstrukční sítě je uveden v měřítku 1:4 (obr. C.1). Vstupní parametry jsou uvedeny pro velikost 75-B podprsenky a velikost 70 bokovky podle velikostního sortimentu, který uvádí Vrba:

$$\begin{array}{ll} opp = 76,0 \text{ cm}, & op = 68,0 \text{ cm}, \\ ob = 85,0 \text{ cm}, & os = 93,0 \text{ cm}, \\ vhp = 9,0 \text{ cm}, & bhb = 12,0 \text{ cm}, \\ bd = 19,0 \text{ cm}, & bhs = 28,0 \text{ cm}. \end{array}$$

Ovšem, daná konstrukce uvádí postup pro výrobu těsně přiléhavého výrobku, nikoli kompresního prádla. Pro dosažení určitého stupně tlaku je potřeba použít záporné přídavky spočítané s pomocí postupu uvedeného v kap. 5.3.1, a aplikovat je na konstrukci na linii pasu, boku, sedu a podprsí jako část výběru. Vzhledem k tomu, že přídavky na kompresi  $p_k$  jsou spočítány na celkový obvod a konstrukce bokovky je navržena pouze na polovinu výrobku, je zapotřebí rozdělit přídavek na poloviny:

$$p_k = \frac{C_2 - C_1}{2}. \quad (5.8)$$

Hodnotu přídatku je potřeba rozdělit mezi předním, bočním, zadním členěním a středem zad v poměru, který je stejný, jako pro výběry v základní konstrukce – 46:18:18:18. Znázornění uplatněných přídatků pro dosažení žádané kompresní třídy je ukázáno na obrázku 5.6. Rozdíl mezi původní konstrukcí bokovky a upravenou je uveden v tabulce 5.6.



Obrázek 5.6: Upravená konstrukce bokovky se zvýšenou pasovou linií

Tabulka 5.6: Rozdíl mezi konstrukcí stříhu pro upravenou a neupravenou bokovku

Bod	Vzorec	Výpočet, cm
1', 2'	$ 11'  =  22'  =$ $= (C_{2os}/8 - C_{1os}/8)/2 + (0,46(C_{1os} - C_{1op}))/4$	3,52
3', 4', 5', 6'	$ 33'  =  44'  =  55'  =  66'  =$ $= (C_{2os}/8 - C_{1os}/8)/2 + (0,18(C_{1os} - C_{1op}))/2$	3,07
7'	$ 77'  = (C_{2os}/8 - C_{1os}/8)/2 + (0,18(C_{1os} - C_{1op}))/4$	3,34
8', 9'	$ 88'  =  99'  =$ $= (C_{2os}/8 - C_{1os}/8)/2 + (0,46(C_{1os} - C_{1opp}))/4$	3,375
10', 11', 12', 13'	$ 1010'  =  1111'  =  1212'  =  1313'  =$ $= (C_{2os}/8 - C_{1os}/8)/2 + (0,18(C_{1os} - C_{1opp}))/4$	3,025
14'	$ 1414'  = (C_{2os}/8 - C_{1os}/8)/2 + (0,18(C_{1os} - C_{1opp}))/2$	3,25
15', 16'	$ 1515'  =  1616'  =$ $= (C_{2os}/8 - C_{1os}/8)/2 + (0,46(C_{1os} - C_{1ob}))/4$	3,03
17', 18', 19', 20'	$ 1717'  =  1818'  =  1919'  =  2020'  =$ $= (C_{2os}/8 - C_{1os}/8)/2 + (0,18(C_{1os} - C_{1ob}))/4$	2,89
21'	$ 2121'  = (C_{2os}/8 - C_{1os}/8)/2 + (0,18(C_{1os} - C_{1ob}))/2$	2,98
H <sub>4</sub> ', H <sub>4</sub> '', S <sub>4</sub> ', S <sub>4</sub> ''	$ H_4 H_4'  =  H_4 H_4''  =  S_4 S_4'  =  S_4 S_4''  =$ $= (C_{2os}/8 - C_{1os}/8)/2$	2,8
H <sub>2</sub> ', H <sub>2</sub> '', S <sub>2</sub> ', S <sub>2</sub> ''	$ H_2 H_2'  =  H_2 H_2''  =  S_2 S_2'  =  S_2 S_2''  =$ $= (C_{2os}/8 - C_{1os}/8)/2$	2,8
H <sub>3</sub> ', H <sub>3</sub> '', S <sub>3</sub> ', S <sub>3</sub> ''	$ H_3 H_3'  =  H_3 H_3''  =  S_3 S_3'  =  S_3 S_3''  =$ $= (C_{2os}/8 - C_{1os}/8)/2$	2,8
H', S'	$ HH'  =  SS'  = (C_{2os}/8 - C_{1os}/8)/2$	2,8

## **Přepřeracování upraveného střihu konstrukce bokovky se zvýšenou pasovou linií pro bezešvé technologie**

Upravený model bokovky se zvýšenou pasovou linií byl přepřeracován tak, aby bylo možné snadno určit počet oček, které je potřeba přidat nebo odebrat pro vytvarování hadicové pleteniny. Pletenina, použitá v této práci, má rozměr oka 1 mm × 1 mm. Konstrukce střihu bokovky byla přenesena na milimetrový papír v měřítku 1:2 (obr. E.1). Je tak velice jednoduché sledovat změnu počtu oček v každé řadě, a jejich celkový počet.

### **5.3.3 Výroba prototypu**

Na základě konstrukční metodiky, spočítaných tělesných přídavek a základních rozměrů figuríny Alva Form byl vytvořen stříh bokovky se zvýšenou pasovou linií pro druhou kompresní třídu. Jako tělesné přídávky pro dosažení druhé kompresní třídy byla vybrána data ve směru řádku.

Pro imitaci bezešvé technologie pletení byly použity jednotlivé části konstrukce spojené mezi sebou přeplátovaným švem s pomocí dvounitného řetízkového stehu. Na modelu bokovky jsou nakreslené linie pod prsy, pasu, boku a sedu (obr. F.1a).

Kromě výroby prototypu bokovky se zvýšenou pasovou linií byl pro účely měření tlaku, který bokovka působí na tělo člověka, vyroben také válcový model o průměru 51 cm, protože Laplaceův zákon platí pro útvary s konstantním poloměrem (válece) (obr. F.1b). Přestože je aproximace pánevní části lidského těla do jednotlivých kruhových válců možná, je nutné uvažovat spíše eliptický válec. Kromě toho má figurína AlvaForm měkký povrch, který lépe simuluje chování lidského těla, ale zároveň může působit protitlak proti kompresní síle. Válec je oproti tomu vyroben z pevného plastu, a takovéto účinky vykazovat nebude.

Obvod nutný pro dosažení druhé kompresní třídy byl spočítán pomocí Laplaceova zákona na základě změřených dat. Obvod pleteniny při šířce vzorku 6 cm ve směru po řádku byl 36 cm. Podobně, jako u prototypu bokovky, byly pro imitaci bezešvé technologie pletení použity jednotlivé části konstrukce spojené mezi sebou

Tabulka 5.7: Kompresní účinky modelu bokovky

Tělesný rozměr	Tlak, mmHg		Tlak, Pa	
	Zadní díl	Přední díl	Zadní díl	Přední díl
<i>opp</i>	11,0	17,0	1457	2266
<i>os</i>	15,0	20,0	2000	2666

přeplátovaným švem s pomocí dvounitého řetízkového stehu.

### 5.3.4 Měření kompresních účinků

Pro ověření teoretických výpočtů kompresních účinků a konstrukce stříhu byl zhotovený model bokovky navléknout na figurínu, a pletenina na válec. Pro ověření tlaku byl použit přístroj PicoPress. S pomocí váčku nafouknutého vzduchem a umístěného mezi výrobkem a povrchem tělesa, na které výrobek je navlečený, měří přístroj tlak, který výrobek působí na těleso.

Při navlékání modelu bokovky na figurínu došlo k neproporcionálnímu roztažení pleteniny v předním a zadním dílu, což vedlo k fyzickým obtížím při navlékání modelu na figurínu. Proto bylo měření tlaku provedeno ve čtyřech různých oblastech: přední a zadní oblasti pod prsy, a přední a zadní pánevní oblasti. Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce 5.7.

Zhotovený proužek pleteniny v délce 36 cm byl navléknut na pevné těleso ve tvaru kruhového válce. Oproti prototypu určenému na figurínu bylo navléknutí snadné. Po navléknutí došlo k rovnoměrnému roztažení vzorku textilie po celém obvodu tělesa. Změřený tlak byl  $P = 20 \text{ mmHg} = 2\,660 \text{ Pa}$ .

## 5.4 Simulace

Kromě experimentálního testování a teoretického vyhodnocení vlastností testovaného textilního materiálu a konstrukce stříhu bokovky je nezbytné na základě získaných dat vytvořit simulační model, který by popsal chování testovaných a navrže-

ných výrobků. Takový model může výrazně zmenšit objem práce při návrhu dalších výrobku podobného druhu.

V této kapitole jsou popsány simulační modely pro statickou zkoušku tahem a měření kompresních účinků, které působí pletená textilie na model těla člověka a pevné těleso. Simulace je vytvořena v programu ANSYS Workbench [8], vzhledem k častému použití tohoto software v praxi při simulacích různého druhu.

### 5.4.1 Definování materiálu

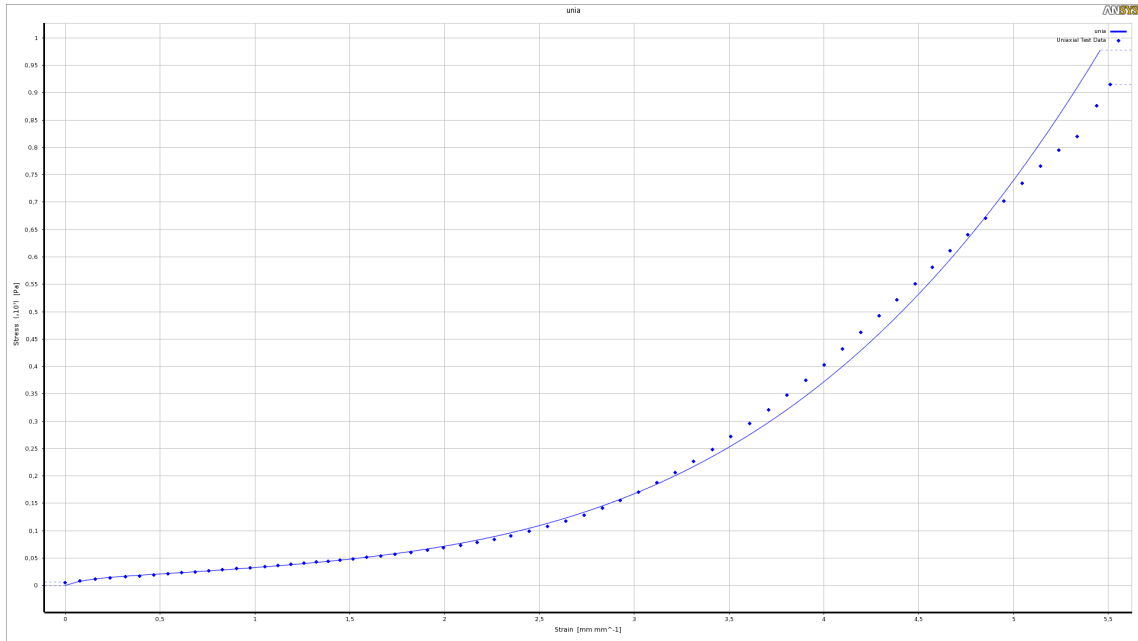
Pro definici materiálu při simulaci v prostředí Ansys byl zvolen Mooney-Rivlinův pětiparametrový materiálový model kvůli simulování relativně malého napětí a nelineárního chování materiálu. Z experimentálních dat tahové zkoušky byla spočítána relativní protažení a napětí. Do prostředí Ansys bylo ale pro zjednodušení výpočtu vloženo každé dvacáté měření. Byla také uvedena hodnota hustoty zvoleného materiálu. Koeficienty nutné pro Mooney-Rivlinův model byly spočítány softwarem na základě vložených dat.

Mooney-Rivlinův model byl zvolen kvůli dobrému popisu tahové křivky plošné textilie. Porovnání Mooney-Rivlinova modelu vůči tahové křivce je na obrázku 5.7.

### 5.4.2 Simulace statické zkoušky tahem

Byl nakreslen model testovaného vzorku materiálu o velikosti 100 mm × 50 mm. Na model byla aplikována pravidelná čtvercová síť a okrajové podmínky: pevné uložení a posuv. Směr posunu odpovídá směru namáhání vzorku materiálu při tahové zkoušce. Vzorky byly namáhány do přetrhu, aby bylo možné nejen simulovat statickou zkoušku tahem, ale rovněž s pomocí simulace ověřit mez pružnosti materiálu při namáhání v různých směrech, a porovnat výsledky s teoretickým výpočtem.

Po směru sloupku byl vzorek namáhán do prodloužení 200 mm. Výsledky simulace a její porovnání s experimentálními daty jsou uvedené v tabulce 5.8. Po směru řádku byl vzorek namáhán do prodloužení 450 mm. Výsledky simulace a její porovnání s experimentálními daty jsou uvedené v tabulce 5.8. V diagonálním směru byl



Obrázek 5.7: Mooney-Rivlinův model – porovnání experimentálních dat (tečkovaná čára) a modelu (plná čára)

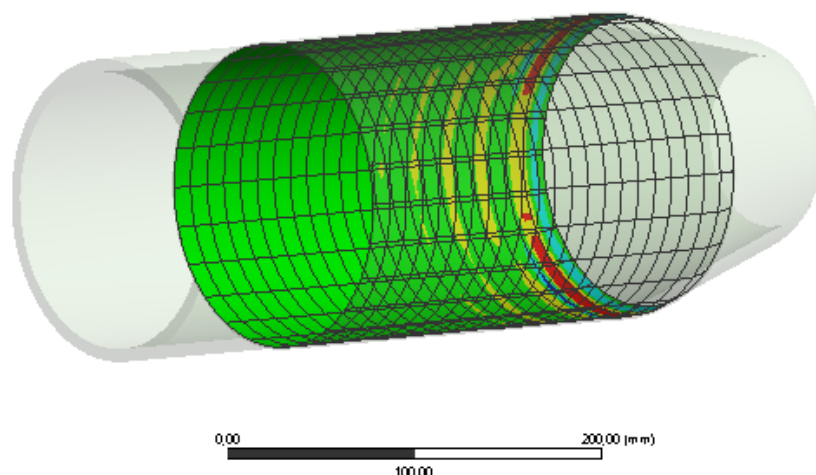
vzorek namáhán do prodloužení 200 mm. Výsledky simulace a její porovnání s experimentálními daty jsou uvedené v tabulce 5.8.

### 5.4.3 Simulace kompresních účinků na kruhový válec

Model válce s obvodem 51 cm a textilního válce s obvodem 36 cm a výškou 31 cm byly nakreslené v prostředí Ansys Workbench. Jako materiál pro válec byla zvolena ocel. Materiálová data oceli jsou dostupné v materiálové knihovně prostředí Ansys Workbench [8]. Materiál pro textilní válec je popsán v kapitole 5.4.1. Experimentální

Tabulka 5.8: Srovnání výsledku simulace a experimentálních dat

	Sloupec		Řádek		Diagonála	
	$\epsilon$	$\sigma$	$\epsilon$	$\sigma$	$\epsilon$	$\sigma$
	mm/mm	MPa	mm/mm	MPa	mm/mm	MPa
Simulace	1,4	3,0	5,1	4,4	1,4	2,1
Experiment	1,9	3,1	5,6	4,5	1,8	2



Obrázek 5.8: Znáznornění tlaku působícího na válec

data pro materiálový model jsou volena ve směru řádku.

Na kruhový válec i textilní válec byla aplikována síť s velikosti prvků 15 mm. Poté byla na kruhový válec nastavená okrajová podmínka nulového posunu, a na textilní válec posuv o 200 mm. Kontakt mezi dvěma objekty byl nastaven bez tření. Tlak, který textilní válec působí na kruhový válec je znázorněn na obrázku 5.8. Pomocí simulace byla pozorována hodnota tlaku 2 500 Pa.

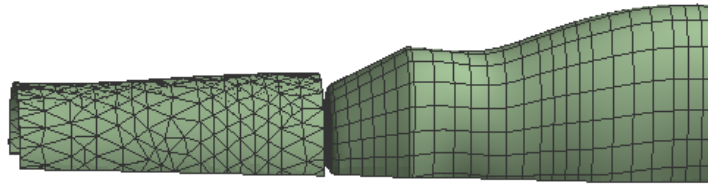
#### 5.4.4 Simulace kompresních účinků kompresního prádla

Model figuríny byl nakreslen v prostředí Ansys Workbench s pomocí dat uvedených v tabulce 5.4, odpovídajícím velikosti 38. Model figuríny sestává ze sady elipsoidů o poloměrech  $\varnothing 1$  a  $\varnothing 2$  spojených mezi sebou a posunutých vůči ose  $Y$ . Toto posunutí umožňuje přesnější tvarování ženské postavy.

V prostředí Ansys byl také vytvořen model bokovky. Bokovka byla popsána jako soustava komolých kuželů o výšce  $h$ , spojujících soustavu kružnic s obvody  $C_1$ . Jednotlivé hodnoty  $C_1$  a výška  $h$  jsou převzaty z tab. 5.4 a D.2a. Tloušťka modelu bokovky odpovídá změřené tloušťce pleteniny.

Jako materiál pro figurínu byla vybraná pěna, popsána Ogdenůvým modelem. Materiálová data pro pěnu byla převzata z materiálové knihovny Ansys. Hustota



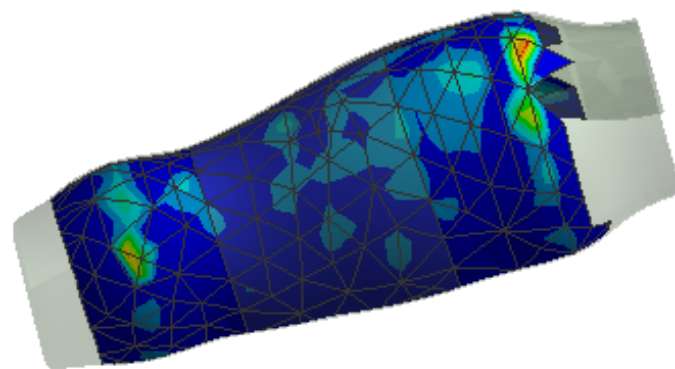
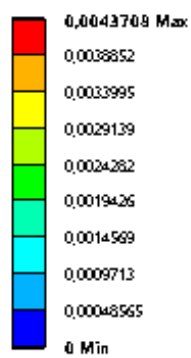


Obrázek 5.9: Zobrazení sítě aplikované na model

pěny byla zvolena na základě internetové publikace [3]. Materiál pro textilní válec je popsán v kapitole 5.4.1. Experimentální data pro materiálový model jsou volena ve směru řádku.

Na figurínu i na textilní válec byla aplikována síť s velikostí prvků 25 mm (obr. 5.9). Poté byla na figurínu nastavena okrajová podmínka nulového posunu, a na válec posuv o 350 mm. Kontakt mezi dvěma objekty byl nastaven bez tření. Tlak, který textilní válec působí na model figuríny je znázorněn na obrázku 5.10. Pomocí simulace byla pozorovaná hodnota tlaku 2 430 Pa.

B: Transient Structural  
Pressure  
Type: Pressure  
Unit: MPa  
Time: 1  
04.01.2018 22:10



Obrázek 5.10: Zobrazení tlaku působícího na figurínu

## 6 Srovnání a diskuze výsledků

Návrh konstrukce stříhu kompresní bokovky se zvýšenou pasovou linií má několik fází. Prvním krokem je výběr vhodné konstrukční metodiky a její úprava pro účely výrobku. Byla zvolena metodika pro bokovku dle Vrby [38], která byla přepracována pro bokovku se zvýšenou pasovou linií.

Dalším krokem je vyhodnocení potřebných záporných přídavek k tělesným rozměrům, které zajistí žádané kompresní účinky. Na základě provedené rešerše byl přepracován Laplaceův zákon pro vhodnější popis vybraného textilního materiálu. Deformační křivka, získaná z provedené tahové zkoušky, byla přepracována a modelována pomocí metody nejmenších čtverců tak, aby bylo možné získat hodnoty hledaných záporných přídavek automatizovaně. Na základě spočítaných záporných přídavek byla konstrukce přepracována.

Navržené změny byly uplatněny v textilním modelu bokovky. Kvůli nemožnosti výroby vzorku bokovky na okrouhlém pletacím stroji byla bezešvá technologie nahrazena použitím pružného dvounitého řetízkového švu. Vyrobený model byl navlečen na testovací figurínu AlvaForm, přičemž došlo k nerovnoměrnému roztažení pleteniny – na předním dílu pleteniny nebyla téměř napnuta, zatímco na zadním dílu došlo k velkému roztažení, především na linii pasu a sedu. Vzhledem k tomu bylo měření tlaku provedené v několika bodech. Na předním dílu byl naměřen relativně nízký tlak  $P = 11 \text{ mmHg} = 1\,467 \text{ Pa}$  na linii pod prsy a  $P = 15 \text{ mmHg} = 2\,000 \text{ Pa}$  na linii sedu. Na zadním dílu byly tyto hodnoty u stejných linií vyšší:  $P = 17 \text{ mmHg} = 2\,266 \text{ Pa}$  na linii pod prsy a  $P = 20 \text{ mmHg} = 2\,666 \text{ Pa}$  na linii sedu. Taková nerovnoměrnost tlaku po povrchu figuríny a roztažení pleteniny může být způsobena malou tažností spojovacích švů a nevhodným rozdělením přídavek k tělesným rozměrům mezi

jednotlivými úsečkami konstrukce. Zdá se vhodné uvažovat o zmenšení hodnoty záporných přídavek na zadním dílu a jejich zvětšením na předním dílu pro dosažení rovnoměrnějšího roztažení pleteniny po povrchu figuríny (nebo těla).

Přestože je tlak působící na zadní část figuríny větší než na přední části, je stále menší, než tlak požadovaný pro druhou kompresní třídu (tj.  $P = 23 \text{ mmHg} = 3066 \text{ Pa}$ ). Je to nejspíše způsobeno tím, že při aproximaci trupové části těla člověka soustavou válců je eliptický válec, zatímco Laplaceův zákon je určen pro kruhový válec. Uvažovat o zvětšení záporných přídavek není vhodné kvůli obtížnému navlékání výrobku na figurínu.

Kromě výroby modelu bokovky byl také vyroben model pro kruhový válec, který umožňuje změření tlaku na pevném tělese. Po změření tlaku, který vzorek působil na kruhový válec, byla zjištěna hodnota tlaku 20 mmHg. Přestože dané měření proběhlo na modelu s pravidelným kruhovým tvarem a měření nebylo ovlivněno protitlakem měkkého povrchu figuríny, druhá kompresní třída nebyla splněna. Provedená simulace s pomocí MKP ukázala shodné výsledky, což může znamenat nesprávnost informace dodané výrobcem pleteniny.

Kromě zjištění působených kompresních účinků je vhodné rovněž zjistit mez pružnosti použitého materiálu. V této práci byly použity tři způsoby zjištění meze pružnosti. Výsledky uvedené v tabulce 5.3 se však značně liší. To je důsledkem toho, že Meredithova a Coplanova metoda jsou sice určeny pro textilní materiály, ale nejsou vhodné pro pleteniny. První metoda lépe popisuje mez pružnosti, avšak v dalším studiu by bylo vhodné najít metodu, která lépe popisuje chování hyperelastických textilií.

Byly dále provedeny simulace tahové zkoušky pleteniny a kompresních účinků bokovky se zvýšenou pasovou linií. Výsledky těchto simulací byly zcela totožné s experimentálními daty, což ukazuje, že se uplatnění simulací metodou konečných prvků ve výrobě může stát důležitým krokem, který umožní výrobu většího sortimentu kompresního zboží s lepšími vlastnostmi. Ovšem, taková implementace MKP ve výrobě vyžaduje hlubší výzkum mechanických vlastností pletenin a nalezení jednotlivých postupů vhodných pro jejich simulaci, které dosud nebyly dostatečně popsány

ve vědecké literatuře.

## Závěr

Kompresní oděv je široce používanou metodou při léčbě hypertrofických jizev a keloid. Bokovka se zvýšenou pasovou linií je výrobek s vysokým procentem využití jak pro zdravotní účely, tak v kosmetické chirurgii.

Cílem této práce byl návrh takové bezešvé konstrukce bokovky se zvýšenou pasovou linií, která by vyhovovala medicínským účelům a zajišťovala působení tlaku, který by odpovídal druhé kompresní třídě podle výrobních a medicínských doporučení a norem. Mimoto bylo zapotřebí zjistit, zda navržený výrobek nebude vykazovat nežádoucí změnu tvaru při nošení, což by vedlo ke snížení kompresních účinků. Z tohoto důvodu byla velká pozornost věnována mechanickým vlastnostem pletenin.

Pro účely této práce byl vedoucí práce poskytnout textilní materiál, který byl testovaný pomocí tahové zkoušky. Na základě získaných dat a Laplaceova zákona byly provedeny teoretické výpočty, které byly použity pro zjištění záporných tělesných přídavek, nutných pro dosažení žádaných kompresních účinků. Data získaná ze zkoušky plošné textilie byla také použita jako vstupní parametry simulace pomocí metody konečných prvků.

Na základě teoretických výpočtů byl navržen model bokovky se zvýšenou pasovou linií. Model byl realizován z poskytnuté pleteniny. S pomocí senzoru PicoPress byl změřen tlak, který bokovka působí na testovací figurínu. Kvůli neproporcionálnímu roztažení výrobku byl tlak změřen v několika bodech. Změřený tlak neodpovídal teoretickým výpočtům, což mohlo být způsobeno elipsoidním základem obvodu figuríny, malou tažností spojovacích švů či nevhodným rozdělením přídavek k tělesným rozměrům mezi jednotlivými úsečkami konstrukce.

Mimo již zmíněné úkoly byla provedená simulace tahové zkoušky a kompresních

účinků, které působí navržená bokovka na figurínu. Výsledky simulací a provedených experimentů mají blízké hodnoty.

Tato práce skýtá velký potenciál pro vývoj bežešvého kompresního oděvu. Simulace s pomocí MKP může urychlit proces výroby nových modelu kompresního oděvu, udělat oděv pohodlnější pro dlouhodobé nošení a tak zvýšit komfort pacienta. Ovšem, výsledky této práce naznačují nutnost zaměřit se na přesnější výpočet kompresních účinků s ohledem na elipsoidní základnu trupové části lidského těla a přítomnost tukové a měkké tkáně. Mimoto je vhodné rozvíjet metody hodnocení meze pružnosti v hyperelastických textiliích, jako jsou pleteniny, pro zlepšení doby nosnosti kompresních výrobku.

Mimoto tato práce ukazuje, že aproximace komplikovaného povrchu lidského těla jednoduchými geometrickými útvary není vhodná za všech okolností a pro všechny části lidského těla. Jedna z možností, jak řešit tento problém pro účely simulace kompresních účinků, je použití 3D skeneru a implementace naskenovaných dat do prostředí Ansys Workbench.

## Literatura

- [1] *Panty-Length Compression Girdle*.  
URL: <https://marenagroup.com/lga-panty-length-girdle/>
- [2] *Ramberg–Osgood relationship*.  
URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Ramberg%E2%80%93Osgood\\_relationship](https://en.wikipedia.org/wiki/Ramberg%E2%80%93Osgood_relationship)
- [3] Information on flexible polyurethane foam. *In Touch*, ročník 1, č. 2, Květen 1991: str. 4.  
URL: [http://www.pfa.org/intouch/new\\_pdf/hr\\_IntouchV1.2.pdf](http://www.pfa.org/intouch/new_pdf/hr_IntouchV1.2.pdf)
- [4] *Jobst Elvarex Catalog*. BSN medical Inc, 2009.
- [5] *LaPlace's Law*. 2016.  
URL: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/ptens.html>
- [6] Aldrich, W.: *Metric pattern cutting for women's wear*. Oxford ; Malden, MA: Blackwell Pub, páté vydání, 2008, ISBN 978-1-4051-7567-8.
- [7] Anderson, K.: *Seamless Textiles with Inherent Shape*. PhD Thesis, North Carolina State University, Raleigh, NC, 2004.
- [8] ANSYS: *Ansys 18.2*.  
URL: [www.ansys.com](http://www.ansys.com)
- [9] Bloemen, M. C.; van der Veer, W. M.; Ulrich, M. M.; aj.: Prevention and curative management of hypertrophic scar formation. *Burns*, ročník 35, č. 4, 2009: s. 463–475, ISSN 03054179, doi:10.1016/j.burns.2008.07.016.



URL: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0305417908002568>

- [10] Bower, D. I.: *An introduction to polymer physics*. Cambridge ; New York: Cambridge University Press, 2002, ISBN 978-0-521-63137-2 978-0-521-63721-3.
- [11] Busgen, A.: Woven fabric having a bulging zone and method and apparatus of forming same.
- [12] Choi, W.; Powell, N.: *Three Dimensional Seamless Garment knitting on V bed flat bed machine*.  
URL: <http://www.fibre2fashion.com/industry-article/1815/three-dimensional-seamless-garmentknitting?page=1>
- [13] Derler, S.; Rotaru, G.-M.; Ke, W.; aj.: Microscopic contact area and friction between medical textiles and skin. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, ročník 38, 2014: s. 114–125, ISSN 17516161, doi: 10.1016/j.jmbbm.2014.06.014.  
URL: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1751616114001787>
- [14] Dolejší, V.; Knobloch, P.; Kučera, V.; aj.: *Finite element methods: theory, applications and implementation*. V Liberci: Technická univerzita, 2011, ISBN 978-80-7372-728-4.
- [15] Eaton, J. E.: GNU Octave 4.0.3.  
URL: <https://www.gnu.org/software/octave/>
- [16] Geršák, J.: Study of the yield point of the thread. *International Journal of Clothing Science and Technology*, ročník 10, č. 3/4, Srpen 1998: s. 244–251, ISSN 0955-6222, doi:10.1108/09556229810693654.  
URL: <http://www.emeraldinsight.com/doi/10.1108/09556229810693654>

- [17] Grellmann, W.; Seidler, S. (editoři): *Polymer testing*. Munich: Hanser Publishers, druhé vydání, 2013, ISBN 978-1-56990-548-7.
- [18] Harish, A.: *How to Choose a Hyperelastic Material Model for your FEA*.  
URL: <https://www.simscale.com/blog/2016/06/how-to-choose-hyperelastic-material/>
- [19] Hayes, S. G.; Venkatraman, P. (editoři): *Materials and technology for sportswear and performance apparel*. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, CRC Press is an imprint of the Taylor & Francis Group, an informa business, 2016, ISBN 978-1-4822-2050-6.
- [20] Hladík, V.: *Textilní vlákna*. Řada textilní literatury, SNTL, 1970.
- [21] Van den Kerckhove, E.; Fieuws, S.; Massagé, P.; aj.: Reproducibility of repeated measurements with the Kikuhime pressure sensor under pressure garments in burn scar treatment. *Burns*, ročník 33, č. 5, Srpen 2007: s. 572–578, ISSN 03054179, doi:10.1016/j.burns.2006.08.032.  
URL: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0305417906002774>
- [22] Li, J.; Li-Tsang, C.; Huang, Y.; aj.: Detection of changes of scar thickness under mechanical loading using ultrasonic measurement. *Burns*, ročník 39, č. 1, 2013: s. 89–97, ISSN 03054179, doi:10.1016/j.burns.2012.05.009.  
URL: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0305417912001672>
- [23] Macintyre, L.; Baird, M.: Pressure garments for use in the treatment of hypertrophic scars—a review of the problems associated with their use. *Burns*, ročník 32, č. 1, 2006: s. 10–15, ISSN 03054179, doi:10.1016/j.burns.2004.06.018.  
URL: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0305417905003463>

- [24] Nigg, B. M.; Herzog, W. (editoři): *Biomechanics of the musculo-skeletal system*. New Jersey: John Wiley & Sons, třetí vydání, 2007, ISBN 978-0-470-01767-8.
- [25] Ogden, R. W.: *Non-linear elastic deformations*. Mineola, N.Y: Dover Publications, 1997, ISBN 978-0-486-69648-5.
- [26] Petruš, M.; Novák, O.; Lepšík, P.; aj.: *Modelování textilních útvarů I: příklady pro cvičení*. 2015, ISBN 978-80-7494-181-8.
- [27] RAL Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e.v.: *RAL-GZ 387/1:2008-01 - Medical Compression Hosiery - Quality Assurance*. RAL Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e.v., Leden 2008.  
URL: [www.gzg-kompressionsstruempfe.de](http://www.gzg-kompressionsstruempfe.de)
- [28] Ramberg, W.; Osgood, W.: *Description of stress-strain curves by three parameters*. Leden 1943.
- [29] Robi, K.; Jakob, N.; Matevz, K.; aj.: The Physiology of Sports Injuries and Repair Processes. In *Current Issues in Sports and Exercise Medicine*, editace M. Hamlin, InTech, Květen 2013, ISBN 978-953-51-1031-6.  
URL: <http://www.intechopen.com/books/current-issues-in-sports-and-exercise-medicine/the-physiology-of-sports-injuries-and-repair-processes>
- [30] Roylance, D.: *Strain-stress curves*. Massachusetts Institute of Technology Cambridge, 2001.
- [31] Salen, J.: *Corsets: historic patterns and techniques*. London: Batsford, 2008, ISBN 978-1-906388-01-0 978-0-89676-261-9.
- [32] Saville, B. P.: *Physical testing of textiles*. Cambridge, England : Boca Raton, Fla: Woodhead Publishing, Ltd, in association with the Textile Institute ; in North and South America by CRC Press, 1999, ISBN 978-1-85573-367-1 978-0-8493-0568-9.

- [33] Shan, H.: *Metal Forming and Powder Metallurgy*.  
URL: <http://nptel.ac.in/courses/112107144/main.htm>
- [34] Shin, K.: *Patternmaking for underwear design*. 2015, ISBN 978-1-5150-9841-6.
- [35] Stamper, E.: *Determining Compressibility Properties for Hyperelastic FEA Models*. Prosinec 2014.  
URL: <https://caeai.com/blog/determining-compressibility-properties-hyperelastic-fea-models>
- [36] Stella, M.; Castagnoli, C.; Gangemi, E. N.: Postburn Scars: An Update. *The International Journal of Lower Extremity Wounds*, ročník 7, č. 3, Září 2008: s. 176–181, ISSN 1534-7346, 1552-6941, doi:10.1177/1534734608323057.  
URL: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1534734608323057>
- [37] Ud-Din, S.; Bayat, A.: Strategic management of keloid disease in ethnic skin: a structured approach supported by the emerging literature. *British Journal of Dermatology*, ročník 169, 2013: s. 71–81, ISSN 00070963, doi:10.1111/bjd.12588.  
URL: <http://doi.wiley.com/10.1111/bjd.12588>
- [38] Vrba, V.: *Konstrukce střihů prádlo*. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, třetí vydání, 1978.
- [39] Český normalizační institut: ČSN EN ISO 5084 (80 0844) - Textilie - Zjišťování tloušťky textilií a textilních výrobků. 1997.
- [40] Český normalizační institut: ČSN EN ISO 13934-1. Tahové vlastnosti plošných textilií - Část 1: zjišťování maximální síly a tažnosti při maximální síle pomocí metody Strip. 2013.

## A Měření plošné hmotnosti a tloušťky pleteniny

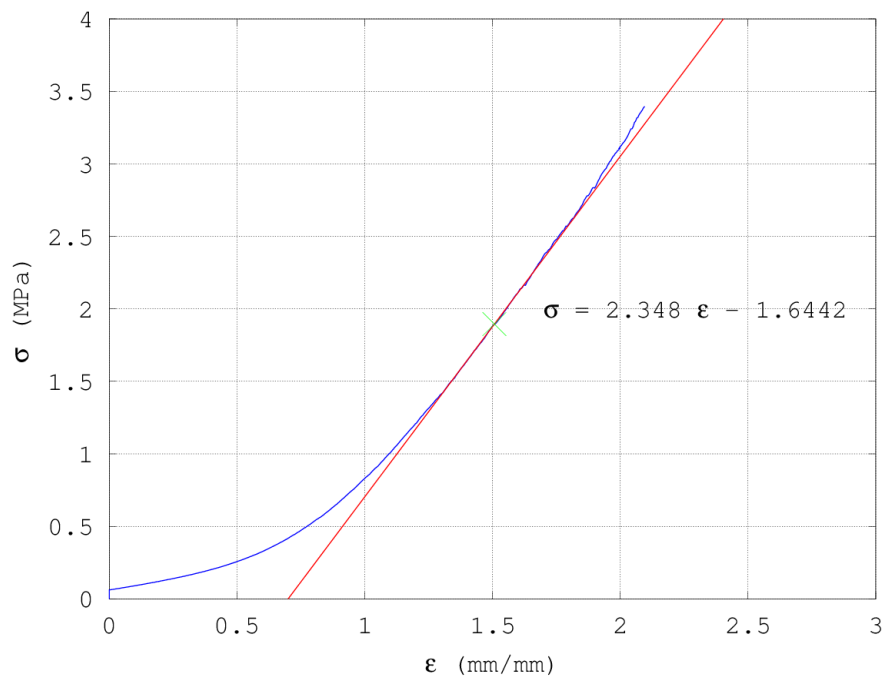
Tabulka A.1: Měření plošné hmotnosti pleteniny

	hodnota	jedn.
Aritmetický průměr	5,39	kg/m <sup>2</sup>
Rozptyl	0,06	kg <sup>2</sup> /m <sup>4</sup>
Směrodatná odchylka	0,24	kg/m <sup>2</sup>
Variační koeficient	4,39	—
Interval spolehlivosti (95 %)	0,24	kg/m <sup>2</sup>

Tabulka A.2: Měření tloušťky pleteniny

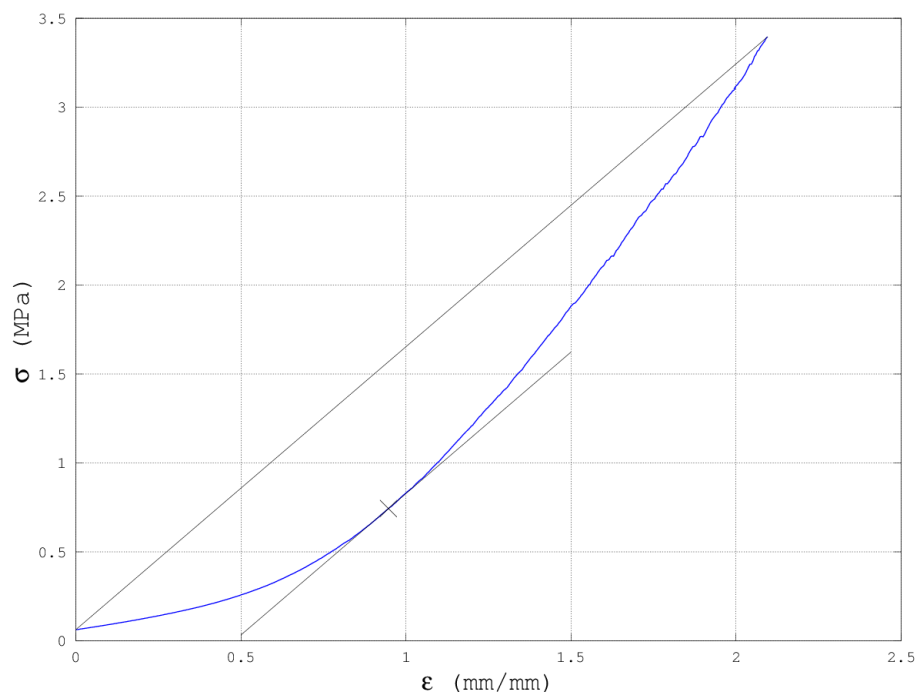
	hodnota	jedn.
Aritmetický průměr	1,61	mm
Rozptyl	0,01	mm <sup>2</sup>
Směrodatná odchylka	0,07	mm
Variační koeficient	4,32	—
Interval spolehlivosti (95 %)	0,05	mm

## B Mez pružnosti – grafické znázornění

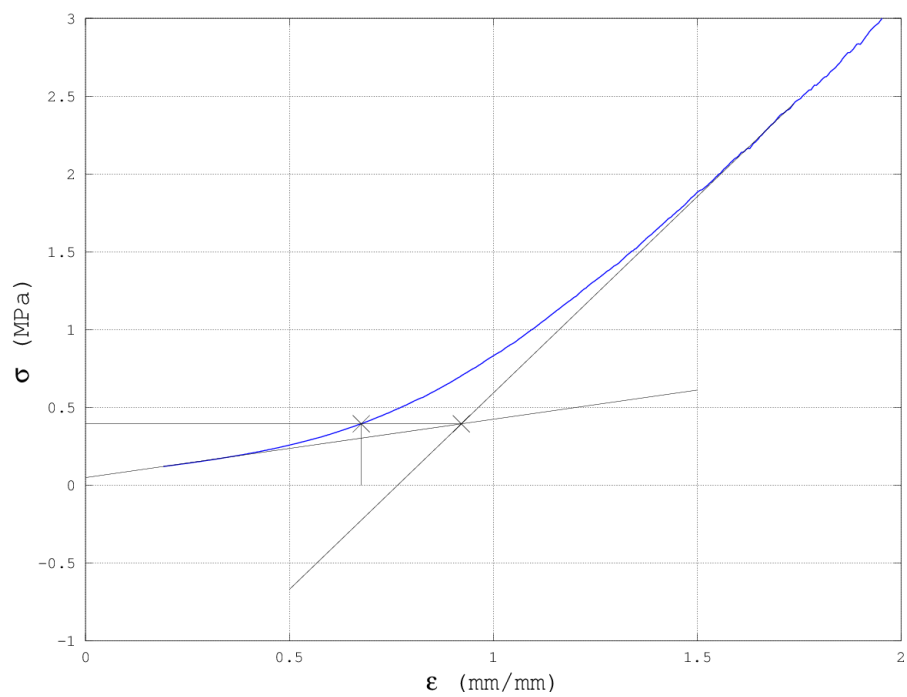


(a) Youngův modul

Obrázek B.1: Znázornění meze pružnosti ve směru sloupku

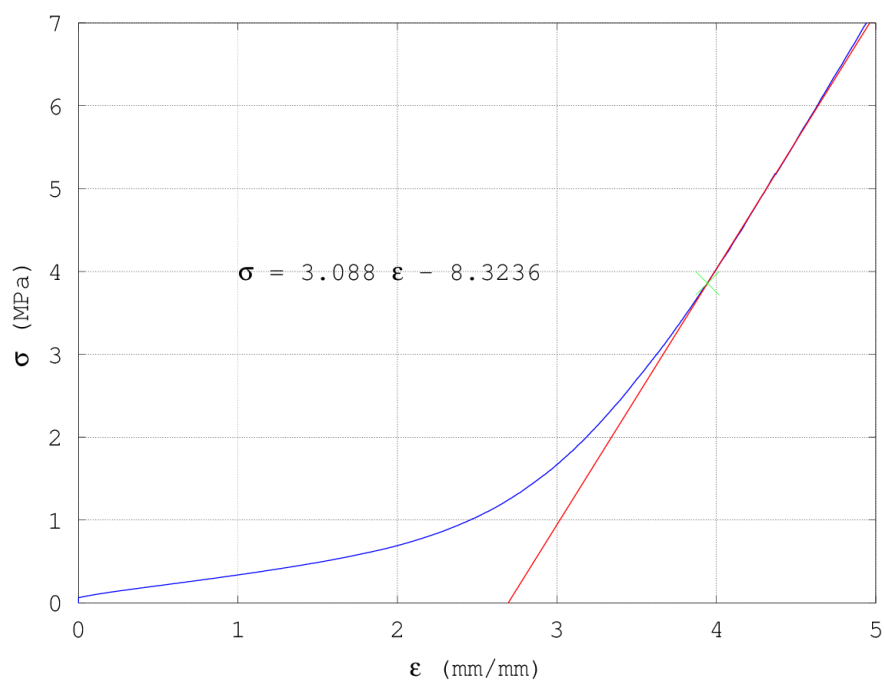


(b) Mereditova metoda

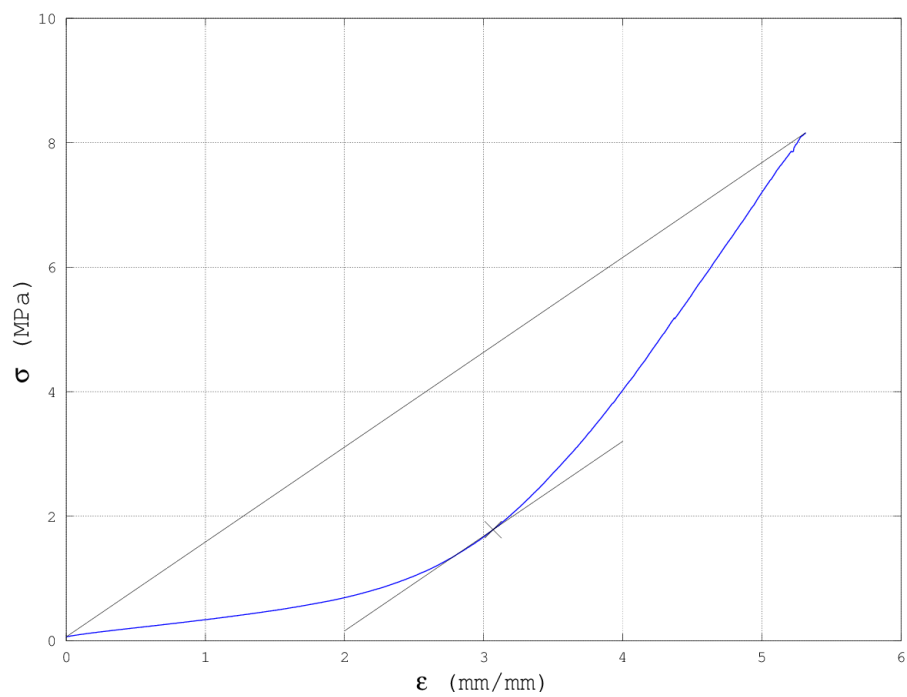


(c) Coplanova metoda

Obrázek B.1: Znázornění meze pružnosti ve směru sloupku



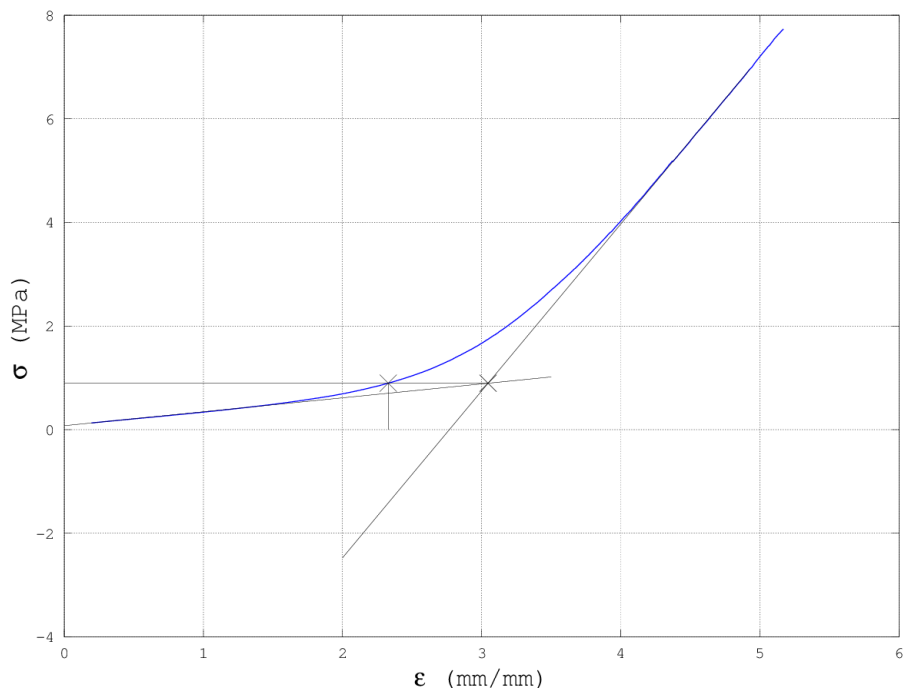
(a) Youngův modul



(b) Mereditova metoda

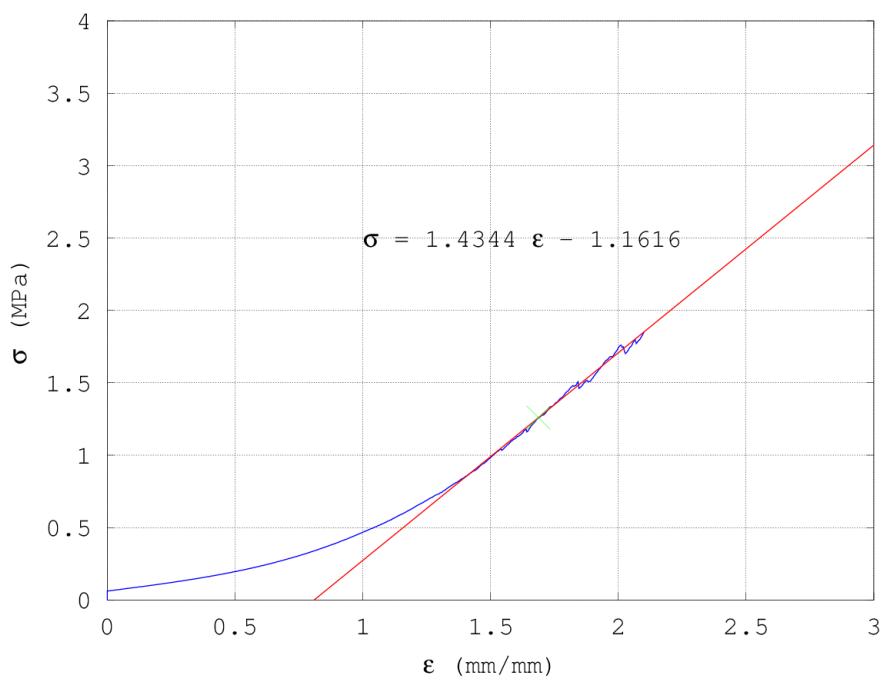
Obrázek B.2: Znázornění meze pružnosti ve směru řádku





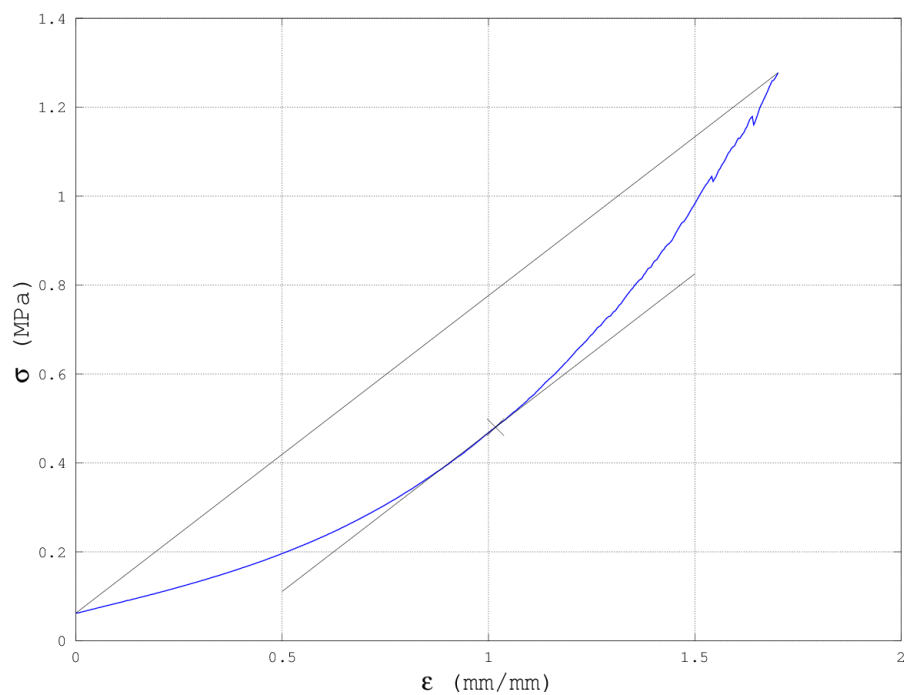
(c) Coplanova metoda

Obrázek B.2: Znázornění meze pružnosti ve směru řádku

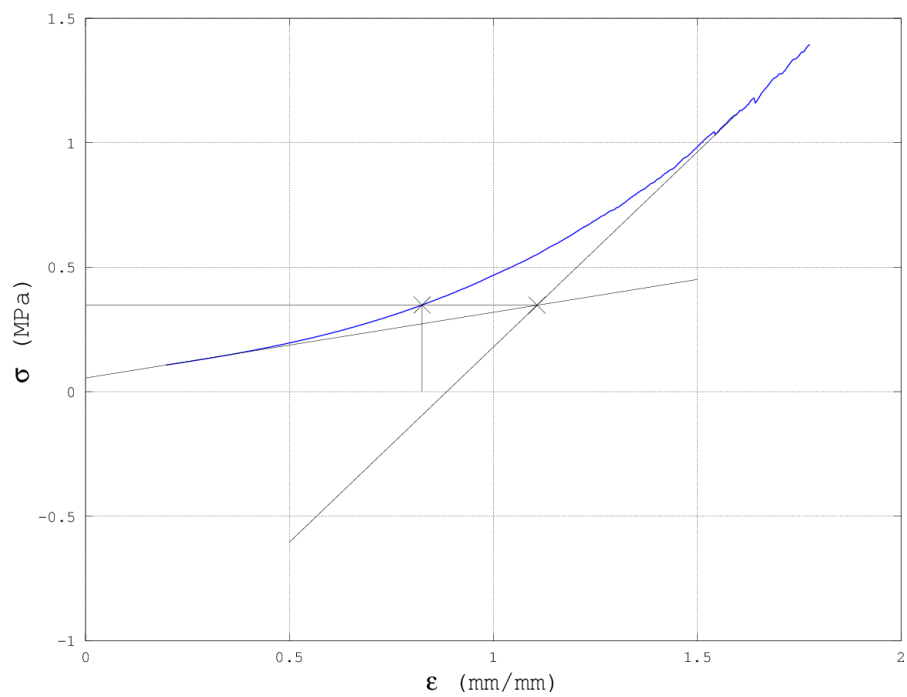


(a) Youngův modul

Obrázek B.3: Znázornění meze pružnosti v diagonálním směru



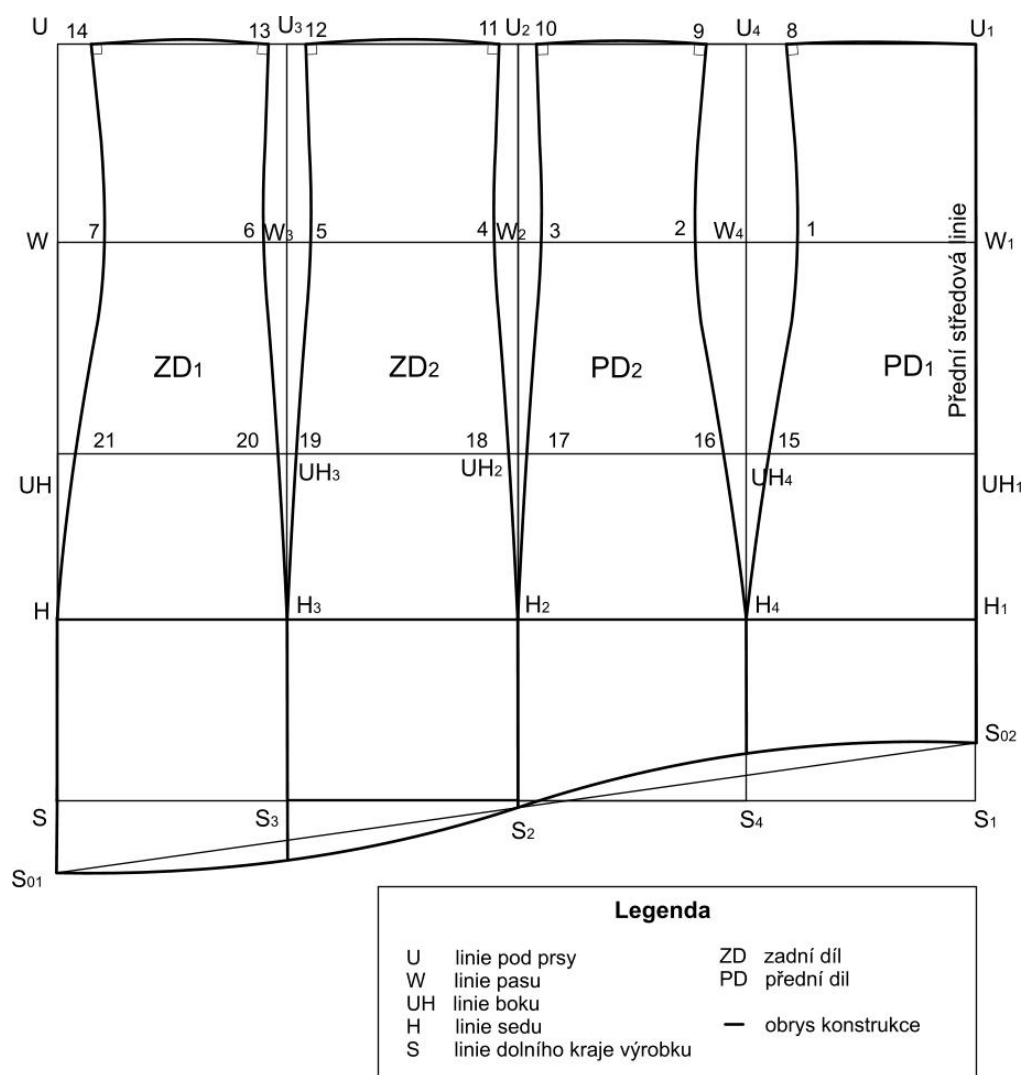
(b) Mereditova metoda



(c) Coplanova metoda

Obrázek B.3: Znázornění meze pružnosti v diagonálním směru

## C Konstrukce bokovky se zvýšeným pasovým krajem



Obrázek C.1: Konstrukce bokovky se zvýšeným pasovým krajem

Tabulka C.1: Algoritmus pro tvorbu modelové úpravy bokovky se zvýšeným pasovým krajem [38]

P.č.	Bod	Popis	Konstr. úsečka	Vzorec	Kontr. výpočet (cm)
1	W	Nakreslit pasovou přímku	$1 \perp w$		
2	U	Od pasové přímky nahoru	WU	$WU = vhp$	9,0
3		Nakreslit podprsní přímku	$u \perp 1$		
4	UH	Od pasové přímky dolu	UHH $\downarrow$ w	$UHH = vhb$	12,0
5		Nakreslit boční přímku	$uh \perp 1$		
6	H	Od pasové přímky dolu	WH $\downarrow$ w	$WH = bd$	19,0
7		Nakreslit sedovou přímku	$h \perp 1$		
8	S	Od pasové přímky dolu	WS $\downarrow$ w	$WS = hs$	28,0
9		Nakreslit dolní přímku	$s \perp 1$		
10	H <sub>1</sub>	Naměřit na sedové přímce	HH <sub>1</sub>	$HH_1 = 0,5os$	46,5
11	U <sub>1</sub>	Uzavřít stříhovou síť	$U_1W_1S_1 \perp h$		
	W <sub>1</sub>	svislou přední středovou			
	UH <sub>1</sub>	přímku			
	S <sub>1</sub>				
12	S <sub>01</sub>		SS <sub>01</sub>	$SS_{01} = konst$	4,0
13	S <sub>02</sub>		SS <sub>02</sub>	$SS_{02} = konst$	3,0

Tabulka C.1: pokračování

P.č.	Bod	Popis	Konstr. úsečka	Vzorec	Kontr. výpočet (cm)
14		Spojit $S_{01}$ a $S_{02}$ přímkou	$S_{01}S_{02}$		
15		Oformit dolní kraj křivkou	$S_{01}S_2S_{02}$		
16	$W_2$			$WW_2 = 0,5WW_1$	23,25
17	$U_2, UH_2,$ $H_2, S_2$	Nakreslit svislou přímkou	$U_2 UH_2 H_2 S_2 \perp w$		
18	$W_3$			$W_3W_2 = 0,5WW_2$	11,625
19	$U_3, UH_3,$ $H_3, S_3$	Nakreslit svislou přímkou	$U_3 UH_3 H_3 S_3 \perp w$		
20	$W_4$			$W_4W_2 = 0,5W_1W_2$	11,625
21	$U_4, UH_4,$ $H_4, S_4$	Nakreslit svislou přímkou	$U_4 UH_4 H_4 S_4 \perp w$		
22		Hodnota pasových výběru		$V_p = (os - op)/2$	12,5
23		Výběr v podprsí části		$V_{opp} = (os - opp)/2$	8,5
24		Hodnota bočních výběru	$V_b = (os - ob)/2$	8,0	
25		Pasový výběr u:			
	1 a 2	předního členění	$W_4, W_{42}$	$W_4 = W_{42} = (0,46V_p)/2$	2,85

Tabulka C.1: pokračování

P.č.	Bod	Popis	Konstr. úsečka	Vzorec	Kontr. výpočet (cm)
	3 a 4	bočního členění	$W_{23}, W_{24}$	$W_{23} = W_{24} = (0, 18V_p)/2$	1,125
	5 a 6	zádového členění	$W_{35}, W_{36}$	$W_{33} = W_{34} = (0, 18V_p)/2$	1,125
	7	středu zad	W7	$W7 = (0, 18V_p)/2$	1,125
26		Výběr v podprsni části u:			
	8 a 9	předního členění	$U_{48}, U_{49}$	$U_{48} = U_{49} = (0, 46V_{opp})/2$	1,95
	10 a 11	bočního členění	$U_{210}, U_{211}$	$U_{210} = U_{211} = (0, 18V_{opp})/2$	0,75
	12 a 13	zádového členění	$U_{312}, U_{313}$	$U_{312} = U_{313} = (0, 18V_{opp})/2$	0,75
	14	středu zad	U14	$U14 = (0, 18V_{opp})/2$	0,75
27		Boční výběr u:			
	15 a 16	předního členění	$UH_{415}, UH_{416}$	$UH_{415} = UH_{416} = (0, 46V_b)/2$	1,84
	17 a 18	bočního členění	$UH_{217}, UH_{218}$	$UH_{217} = UH_{218} = (0, 18V_b)/2$	0,72
	19 a 20	zádového členění	$UH_{319}, UH_{318}$	$UH_{319} = UH_{320} = (0, 18V_b)/2$	0,72
	21	středu zad	UH21	$UH21 = (0, 18V_b)/2$	0,72
21		Oformit podprsni křivku			
22		Oformit boční křivky	11, 4, 18, H <sub>2</sub> 10, 3, 17, H <sub>2</sub>		

Tabulka C.1: pokračování

P.č.	Bod	Popis	Konstr. úsečka	Vzorec	Kontr. výpočet (cm)
23		Oformit křivky předního členění	9, 2, 16, H <sub>4</sub> 8, 1, 15, H <sub>4</sub>		
24		Oformit křivky zadního členění	13, 6, 20, H <sub>3</sub> 12, 5, 19, H <sub>3</sub>		
24		Oformit křivku středu zad	14, 7, 21, H		

## D Výpočet tělesných přídavků

Tabulka D.1: Výpočet tělesných přídavků pro dosažení druhé kompresní třídy (3 066–4 266 Pa) s pomocí Laplaceova zákona ve směru sloupku

(a) při  $P = 3\,066\text{ Pa}$

Tělesný rozměr	$C_2$ , cm	$d$ , mm	$\sigma$ , kPa	$\varepsilon$ , mm/mm	$C_1$ , cm
<i>opp</i>	77	1,6	233,23	0,454	53
<i>op</i>	72	1,6	218,09	0,426	50
<i>ob</i>	90	1,6	272,61	0,519	59
<i>os</i>	98	1,6	296,84	0,555	70

(b) při  $P = 4\,266\text{ Pa}$

Tělesný rozměr	$C_2$ , cm	$d$ , mm	$\sigma$ , kPa	$\varepsilon$ , mm/mm	$C_1$ , cm
<i>opp</i>	77	1,6	324,52	0,593	48
<i>op</i>	72	1,6	303,44	0,564	46
<i>ob</i>	90	1,6	379,30	0,663	54
<i>os</i>	98	1,6	413,02	0,701	58



Tabulka D.2: Výpočet tělesných přídavků pro dosažení druhé kompresní třídy (3 066–4 266 Pa) s pomocí Laplaceova zákona ve směru řádku

(a) při  $P = 3\,066\text{ Pa}$

Tělesný rozměr	$C_2$ , cm	$d$ , mm	$\sigma$ , kPa	$\varepsilon$ , mm/mm	$C_1$ , cm
<i>opp</i>	77	1,6	233,23	0,604	48
<i>op</i>	72	1,6	218,09	0,544	47
<i>ob</i>	90	1,6	272,61	0,759	51
<i>os</i>	98	1,6	296,84	0,851	53

(b) při  $P = 4\,266\text{ Pa}$

Tělesný rozměr	$C_2$ , cm	$d$ , mm	$\sigma$ , kPa	$\varepsilon$ , mm/mm	$C_1$ , cm
<i>opp</i>	77	1,6	324,52	0,955	39
<i>op</i>	72	1,6	303,44	0,876	38
<i>ob</i>	90	1,6	379,30	1,150	42
<i>os</i>	98	1,6	413,02	1,264	43

Tabulka D.3: Výpočet tělesných přídavků pro dosažení druhé kompresní třídy (3 066–4 266 Pa) s pomocí Laplaceova zákona v diagonálním směru

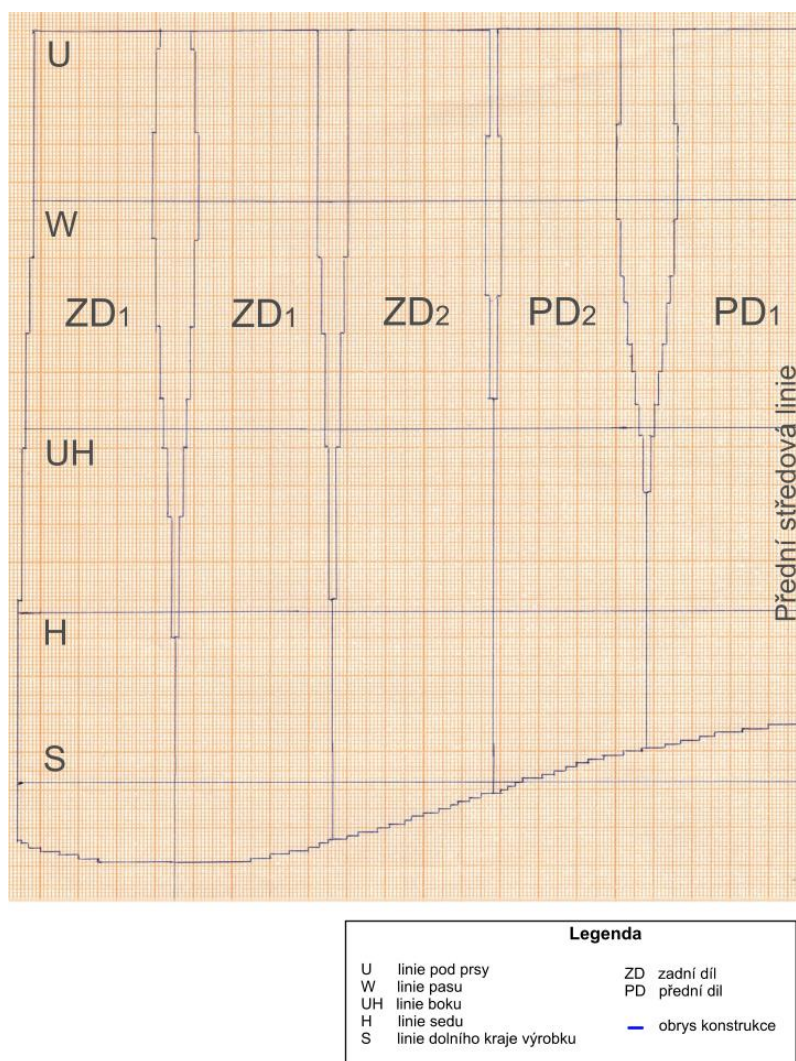
(a) při  $P = 3\,066\text{ Pa}$

Tělesný rozměr	$C_2$ , cm	$d$ , mm	$\sigma$ , kPa	$\varepsilon$ , mm/mm	$C_1$ , cm
<i>opp</i>	77	1,6	233,23	0,591	48
<i>op</i>	72	1,6	218,09	0,555	46
<i>ob</i>	90	1,6	272,61	0,678	54
<i>os</i>	98	1,6	296,84	0,727	57

(b) při  $P = 4\,266\text{ Pa}$

Tělesný rozměr	$C_2$ , cm	$d$ , mm	$\sigma$ , kPa	$\varepsilon$ , mm/mm	$C_1$ , cm
<i>opp</i>	77	1,6	324,52	0,779	43
<i>op</i>	72	1,6	303,44	0,740	41
<i>ob</i>	90	1,6	379,30	0,873	48
<i>os</i>	98	1,6	413,02	0,926	51

## E Úprava střihu bokovky pro bezešvou metodu



Obrázek E.1: Znázornění upravené konstrukce bokovky se zvýšenou pasovou linií pro výrobu bezešvou metodikou

## F Měření tlaku s pomocí senzoru PicoPress



(a) bokovka + figurína AlvaForm



(b) pevné těleso – kruhový válec

Obrázek F.1: Měření kompresních účinků vyrobených modelů