



# Výzkum nízkohustotných kompozitních pěn s přírodními vlákny pro návrh výplně automobilových sedaček

## Disertační práce

*Studijní program:* P2302 – Stroje a zařízení  
*Studijní obor:* 2302V010 – Konstrukce strojů a zařízení  
*Autor práce:* **Ing. Pavel Srb**  
*Vedoucí práce:* doc. Ing. Vítězslav Fliegel, CSc.





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC  
Faculty of Mechanical Engineering ■

# Research of Low-density Composite Foam with Natural Fibers for Car Seats Cushion

## Dissertation

*Study programme:* P2302 – Machines and Equipment  
*Study branch:* 2302V010 – Machine and Equipment Design  
*Author:* **Ing. Pavel Srb**  
*Supervisor:* doc. Ing. Vítězslav Fliegel, CSc.



## Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou disertační 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 disertační práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li disertační práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom 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.

Disertační práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé disertační práce a konzultantem.

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

Datum: 3. 7. 2018

Podpis: 

## **Poděkování**

Tato disertační práce byla vypracována na Katedře částí a mechanismů strojů Fakulty strojní Technické univerzity v Liberci za podpory projektu Studentské grantové soutěže pro rok 2018 na Fakultě strojní TU v Liberci s názvem: „Inovace výrobku a zařízení ve strojírenské praxi“, podporované Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky.

Rád bych na tomto místě poděkoval všem, kteří přispěli ve vzniku této práce. Zejména bych chtěl poděkovat školiteli doc. Ing. Vítězslavovi Fliegelovi, CSc. za příkladné vedení a cenné rady spojené s tvorbou této práce.

Dále chci poděkovat doc. Ing. Michlovi Petřů, PhD. za cenné rady a podněty, zejména v závěrečné fázi tvorby této práce.

Závěrem bych chtěl poděkovat celé své rodině, přátelům a kolegům, kteří mě po celou dobu studia podporovali ať již morálně, inspirací či dobrou radou.

## **Anotace**

Snižování škodlivých emisí a energetické náročnosti provozu jsou v současnosti jedny z nejdůležitějších faktorů ovlivňujících aktuální trendy vývoje částí pro automobilový průmysl, zejména díky legislativním regulacím o snížení produkce skleníkových plynů. Jednou z možností, jak mohou tohoto cíle výrobci dosáhnout, je snížení hmotnosti jednotlivých dílů automobilu, při zachování nebo zlepšení jejich užitných vlastností. Požadavek na snížení hmotnosti se proto týká i výplní automobilových sedaček. Předkládaná disertační práce se zabývá výzkumem nízkohustotních kompozitních pěn s přírodními vlákny, použitelných jako výplně automobilových sedaček. Byly provedeny řady analýz a rozborů struktur vybraných vzorků standardních polyuretanových pěn a navržených nízkohustotních kompozitních pěn s přírodními vlákny. Dále byly experimentálně určeny vybrané mechanické vlastnosti těchto vzorků pomocí laboratorních zařízení. Na základě těchto analýz, rozborů a měření byly stanoveny důležité parametry jako kontaktní tlaky, tuhost a tlumení, které jsou důležité pro návrh kompozitního materiálu vhodného pro konstrukci výplně automobilové sedačky. Následně byly za pomoci modelových simulací metodou konečných prvků (MKP) vytvořeny strukturní modely umožňující studovat a vizualizovat rozložení napětí mezi vlákny a strukturou polyuretanové pěny. Bylo vytvořeno několik konfigurací strukturních modelů s horizontálně a vertikálně orientovanými vlákny. Na základě porovnání chování modelů s reálnými vzorky byl vytvořen homogenizovaný materiálový model reflektující míru zaplnění a druh použitých vláken v kompozitním materiálu. Byly vytvořeny MKP simulace odpovídající reálné geometrii sedáku automobilové sedačky a z nich vyhodnoceny výsledky. Dále byl sestaven konstrukční návrh a realizován vzorek výplně automobilové sedačky z kompozitní nízkohustotní pěny s kokosovými vlákny. Pro testování statických a dynamických vlastností funkčních vzorků výplní i celých automobilových sedaček byla navržena a sestavena experimentální zařízení. Navržené řešení výplně automobilové sedačky z kompozitní nízkohustotní pěny s kokosovými vlákny má odpovídající mechanické a komfortní vlastnosti ve srovnání s čistou polyuretanovou pěnou a proto může být alternativním řešením vývoje automobilových sedaček.

### **Klíčová slova**

Automobilová sedačka, výplně automobilových sedaček, nízkohustotní kompozitní pěna s přírodními vlákny, MKP, nelineární mechanické vlastnosti, přenos vibrací

## **Annotation**

Reduction of both harmful emissions and energy performance intensity of transportation currently ranks among the most important factors influencing the current trends in the development of components used in the automotive industry, particularly due to the legislative regulations concerning the reduction of greenhouse gases. For car makers, one of the possible ways of how to achieve such a goal is to reduce the weight of individual car components while maintaining or improving their in-use material properties. Therefore, the requirement of weight reduction also applies to car seat fillers. This thesis deals with the research of low-density natural-fiber composite foams, which can be used as car seat cushion fillers. A number of structure analyses of selected samples of standard polyurethane foams and designed low-density natural-fiber composite foams were carried out. Further, selected mechanical properties of these samples were measured by means of laboratory apparatus. On the basis of these analyses and measurements, important parameters such as contact pressures, stiffness and damping, parameters which are important for the design of composite material suitable for the construction of car seat cushion filler, were determined. Subsequently, there were created structural models enabling us to study and visualize the stress distribution between the fibers and the polyurethane foam structure, the structural models were created by means of model simulations using the finite elements. Several configurations of structural models with horizontal and vertical threads were created. On the basis of the comparison of its behavior with real samples, a homogenized material model, that reflects the rate of filling and the type of fibers used in the composite material, was developed. There were developed FEM simulations corresponding with real geometry of the seat cushion and their results were evaluated. Next, the structural design was drawn up and a sample of the car seat cushion filler made of low-density coconut-fiber composite foam was created. Experimental testing devices were designed and built for testing of the static and dynamic properties of functional seat cushions fillers and complete car seats as well. The proposed solution to the car seat cushion filler made of low-density coconut-fiber composite foam has the corresponding mechanical and comfort properties compared to plain polyurethane foam and therefore it can serve as an alternative solution to car seat development.

### **Keywords**

Car seat, car seat cushion, low density composite foam with natural fibers, FEM, nonlinear mechanical properties, vibration transmissibility

## Obsah

Seznam zkratk a symbolů .....	9
Seznam obrázků.....	12
Seznam tabulek.....	16
1. Úvod.....	17
2. Problematika výzkumu a vývoje výplní automobilové sedačky .....	19
2.1 Úvod do problematiky výzkumu a vývoje výplní pro automobilové sedačky .....	19
2.2 Rozbor současných požadavků na konstrukční řešení sedačky .....	21
2.2.1 Testování sedadel .....	23
2.2.2 Obecné požadavky na zatížení a testování sedaček lze rozdělit do následujících bodů:.....	26
2.3 Rozbor současných požadavků na mechanické vlastnosti výplňových materiálů	33
2.3.1 Vlastnosti PU pěn.....	34
2.3.2 Možnosti náhrady PU pěny .....	37
2.4 Závěr kapitoly.....	43
3. Cíle disertační práce .....	44
4. Stanovení vybraných fyzikálních vlastností vzorků nízkohustotních kompozitních pěn s přírodními vlákny.....	46
4.1 Analýzy a rozborů struktury vzorků nízkohustotních kompozitních pěn s přírodními vlákny .....	46
4.2 Stanovení mechanických vlastností vzorků kompozitních pěn.....	50
4.2.1 Odpor vůči stlačení – cyklické stlačování.....	51
4.2.2 Relaxace napětí při stlačení .....	56
4.3 Modely pro stanovení mechanických vlastností .....	57
4.4 MKP Modely pro stanovení mechanických vlastností.....	60
4.4.1 MKP model polyuretanové pěny a pěny s vlákny.....	65
4.5 Porovnání a verifikace MKP modelu na velkém vzorku .....	74

4.6	Závěr kapitoly.....	77
5.	Konstrukční návrh výplně automobilové sedačky z kompozitní nízkohustotní pěny s přírodními vlákny .....	79
5.1	Konstrukční návrh a realizace funkčního vzorku výplně automobilové sedačky .	79
5.1.1	MKP simulace vzorku výplně automobilové sedačky z kompozitní nízkohustotní pěny s přírodními vlákny.....	79
5.1.2	Realizace funkčního vzorku výplně automobilové sedačky z kompozitní nízkohustotní pěny s kokosovými vlákny .....	84
5.2	Experimentální testování funkčního vzorku výplně automobilové sedačky.....	87
5.2.1	Experimentální zařízení pro dlouhodobé zkoušky .....	96
5.3	Závěr.....	101
6.	Přínosy disertační práce.....	102
6.1	Přínosy pro vědní obor .....	102
6.2	Přínosy pro praxi .....	103
7.	Závěr.....	104
	Seznam použité literatury .....	106
	Vybrané publikace autora.....	113



## Seznam zkratek a symbolů

EHK	Evropská hospodářská komise
EPP	extrudovaný polypropylen
FFT	rychlá Fourierova transformace
HDL	Hydrodynamická laboratoř
HMH	hypotéza Huber Mises Hencky
MDI	methyldiizokyanát
MKP	metoda konečných prvků
PU	polyuretan
PUK	polyuretan s kokosovými vlákny

TDI toulendiizokyanát

A	amplituda .....	[mm]
$a_1$	vstupní zrychlení.....	[m.s <sup>-2</sup> ]
$a_2$	výstupní zrychlení.....	[m.s <sup>-2</sup> ]
$a_w$	zrychlení .....	[m.s <sup>-2</sup> ]
$B_0$	modul objemové pružnosti .....	[MPa]
$C_i$	konstanta .....	[-]
E	modul pružnosti .....	[MPa]
$E_{PU}$	modul pružnosti polyuretanové pěny.....	[MPa]
$E_S$	modul pružnosti vláken.....	[MPa]
$E_S^P(\tau_1)$	modul pružností paralelního systém v závislosti na čase .....	[MPa]
$E_S^S(\tau_1)$	modul pružnosti sériového systému v závislosti na čase.....	[MPa]
f	frekvence.....	[Hz]
F(t)	síla v závislosti na čase .....	[N]
$F_{25}$	síla při 25% stlačení.....	[N]
$F_{65}$	síla při 25% stlačení.....	[N]
$F_n$	matice působících sil.....	[N]
$F_{OP}$	zatěžující síla v opěráku.....	[N]
$F_{OPXM}$	zatěžující síla v opěráku od muže ve směru x .....	[N]
$F_{OPYM}$	zatěžující síla v opěráku od muže ve směru y .....	[N]
$F_{OPXT}$	zatěžující síla v opěráku pro testování ve směru x .....	[N]
$F_{OPYT}$	zatěžovací síla v opěráku pro testování ve směru y.....	[N]
$F_{SEM}$	zatěžující síla v sedáku od muže.....	[N]

$F_{SET}$	zatěžovací síla v sedáku pro testování .....	[N]
$F_{XM}$	zatěžující síla v sedačce od muže ve směru x .....	[N]
$F_{XT}$	zatěžující síla v sedačce pro testování ve směru x .....	[N]
$F_{YM}$	zatěžující síla v sedačce od muže ve směru y .....	[N]
$F_{YT}$	zatěžující síla v sedačce pro testování ve směru x .....	[N]
$F_p$	funkcionál komfortních parametrů .....	[-]
$G$	přetížení .....	[m.s <sup>-2</sup> ]
$G_R(t)$	relaxační modul .....	[N.mm <sup>-2</sup> ]
$H$	přenosová amplitudová charakteristika .....	[-]
$I$	invariant .....	[-]
$k$	tuhost .....	[N.m <sup>-1</sup> ]
$K$	matice tuhosti .....	[N.m <sup>-1</sup> ]
$L$	počet vzorků signálu .....	[-]
$m$	hmotnost .....	[kg]
$M$	matice hmotností .....	[kg]
$M_M$	moment síly v opěráku od muže .....	[N.m]
$M_T$	moment síly v opěráku pro testování .....	[N.m]
$M_{JS}$	moment síly v opěráku podle normy JASO .....	[N.m]
$N_s$	počet bodů .....	[-]
$PSD$	výkonová spektrální hustota .....	[m.s <sup>-2</sup> /Hz]
$\ddot{Q}_n$	matice zrychlení uzlových bodů .....	[m.s <sup>-2</sup> ]
$Q_n$	matice posuvů uzlových bodů .....	[m]
$R_i$	rotace v souřadném systému .....	[°]
$R^2$	koeficient determinace .....	[-]
$RMS$	efektivní hodnota vibrací .....	[m.s <sup>-1</sup> ]
$SAG$	faktor komfortu .....	[-]
$SEAT$	efektivita přenosu vibrací .....	[%]
$S_{ij}$	struktura plniva .....	[-]
$T$	časová perioda .....	[s]
$t$	čas .....	[s]
$U$	energie .....	[J]
$U_i$	posuv v souřadném systému .....	[m]
$V_{pu}$	objem polyuretanu .....	[m <sup>-3</sup> ]

$V_{vl}$	objem vláken.....	$[m^{-3}]$
$V_{vz}$	objem vzduchu.....	$[m^{-3}]$
$V_i$	objemový podíl složky.....	$[m^{-3}]$
$w$	definice okénka .....	$[-]$
$z$	zdvih .....	$[mm]$
$\alpha_i$	materiálová konstanta .....	$[-]$
$\beta_i$	materiálová konstanta .....	$[-]$
$\lambda_i$	prodloužení .....	$[-]$
$\delta_{max}$	maximální velikost stlačení .....	$[mm]$
$\varepsilon$	poměrné prodloužení .....	$[-]$
$\eta_t$	celkové tlumení.....	$[Ns/m]$
$\mu_i$	materiálová konstanta .....	$[MPa]$
$\mu_0$	počáteční modul pružnosti ve smyku .....	$[MPa]$
$\nu$	Poissonovo číslo .....	$[-]$
$\nu_{PU}$	Poissonovo číslo polyuretanové pěny.....	$[-]$
$\nu_S$	Poissonovo číslo vláken.....	$[-]$
$\nu_S^P(\tau_1)$	Poissonovo číslo paralelního systém v závislosti na čase.....	$[-]$
$\nu_S^S(\tau_1)$	Poissonovo číslo paralelního systém v závislosti na čase.....	$[-]$
$\rho_{PU}$	měrná hmotnost .....	$[kg \cdot m^{-3}]$
$\sigma(t)$	mechanické napětí .....	$[MPa]$
$\tau_i$	aktuální hodnota času .....	$[s]$
$\Psi$	objemové zaplnění .....	$[-]$

## Seznam obrázků

<b>Obr. 2.1</b> Vývoj polyuretanových pěn vedoucí ke snižování objemové hmotnosti [28] .....	20
<b>Obr. 2.2</b> Fyzikální rozpor mezi ideálním sezením a předsunutím hlavy [34] .....	22
<b>Obr. 2.3</b> Základní geometrie a polohy sedadla [41] .....	25
<b>Obr. 2.4</b> Určení směru a působíště zatížení a ukázka výrazné hystereze při odl. [38] .....	25
<b>Obr. 2.5</b> Zatížení sedadla silou – ekv. momentem a silou na hlavovou opěrku [39] .....	25
<b>Obr. 2.6</b> Měření kontaktních tlaků a následné určení sil pomocí trasování tlakové oblasti křivkou.....	27
<b>Obr. 2.7</b> Rozložení působícího zatížení od sedící osoby při změně úhlu opěradla a horizontální poloze sedáku (chybové úsečky prezentují – statistické odchylky mezi testovanými subjekty včetně real_human_manikina) .....	27
<b>Obr. 2.8</b> Přenos vibrací měřen u dospělého muže v oblasti páteře [34] .....	28
<b>Obr. 2.9</b> Obvyklé rozměry a uvažované síly působící na sedadlo [41] .....	30
<b>Obr. 2.10</b> Pákový mechanismus adjustace opěradla.....	31
<b>Obr. 2.11</b> Statické testování rámu automobilové sedačky [41] .....	32
<b>Obr. 2.12</b> Závislost napětí na deformaci PU vzorku – rozdělení na 3 oblasti .....	35
<b>Obr. 2.13</b> Maxwellův model (vlevo), Kelvinův model (vpravo).....	36
<b>Obr. 2.14</b> Charakteristiky PU pěny a) průběh koeficientu tlumení, b) průběh koeficientu tuhosti, c) přenosová charakteristika, d) fázová charakteristika.....	36
<b>Obr. 2.15</b> a) Pěnový sedák s otvory, b) sada cylindrických tlačných pružin.....	38
<b>Obr. 2.16</b> Koncept sedačky založené na tvaru lidského těla. ....	38
<b>Obr. 2.17</b> a) Silikonová auxetická pružina b) Sestava sedáku s pružinami .....	40
<b>Obr. 2.18</b> Průběh zat. a kontaktní tlaky změřené na sedáku s auxetickými pružinami .....	40
<b>Obr. 2.19</b> Systém aktivního tlumení .....	40
<b>Obr. 4.1</b> Snímky struktury polyuretanové pěny a) vnější stavba (nízkoprodyšný obal) b) vnitřní stavba c) polyuretanová pěna s kokosovými vlákny d) polyuretanová pěna s vlákny africké trávy.....	47
<b>Obr. 4.2</b> Snímky vláken a) kokosová vlákna, b) vlákna africké trávy .....	47
<b>Obr. 4.3</b> a) Naprašovačka Q150R ES, b) Vzorky s nanosenou vrstvou zlata.....	48
<b>Obr. 4.4</b> Rastrovací elektronový mikroskop TESCAN VEGA 3 .....	48
<b>Obr. 4.5</b> Snímky struktury čisté polyuretanové pěny .....	48
<b>Obr. 4.6</b> Snímky struktury polyuretanové pěny s kokosovými vlákny a) zvětšení 100 x, b) zvětšení 200 x .....	49

<b>Obr. 4.7</b> Snímky struktury polyuretanové pěny s vlákny africké trávy a) zvětšení 200 x, b) zvětšení 1000 x.....	49
<b>Obr. 4.8</b> Distribuce průměrů vláken a) kokosová vlákna, b) vlákna africké trávy.....	49
<b>Obr. 4.9</b> Měrná hmotnost kompozitní pěny v závislosti na podílu vláken a zaplnění: a) kokosová vlákna, b) vlákna africké trávy.....	50
<b>Obr. 4.10</b> Určení odporu vůči stlačování a) schematické uspořádání měření, b) zkušební vzorky .....	52
<b>Obr. 4.11</b> Realizace stlačování vzorku .....	52
<b>Obr. 4.12</b> Průběh závislosti síly na deformaci pro vzorek čisté pěny při cyklickém stlačování.....	53
<b>Obr. 4.13</b> Průběh závislosti síly na deformaci – porovnání 1. a 4. cyklu.....	54
<b>Obr. 4.14</b> Průběh jednoho cyklu stlačování – tlumení.....	54
<b>Obr. 4.15</b> Průběh závislosti síly na deformaci vzorků.....	55
<b>Obr. 4.16</b> Průběh závislosti tuhosti na deformaci.....	55
<b>Obr. 4.17</b> Průběh relaxace vzorků .....	57
<b>Obr. 4.18</b> Model nízkohustotní pěny s plnivou .....	58
<b>Obr. 4.19</b> a) model paralelní (vlevo), model sériový (vpravo), b) rozložení přetvoření paralelního modelu (vlevo), rozložení přetvoření sériového modelu (vpravo).....	59
<b>Obr. 4.20</b> Aproximace křivek materiálového modelu na základě naměřených dat.....	65
<b>Obr. 4.21</b> Numerický model stlačování vzorku PU pěny .....	66
<b>Obr. 4.22</b> a) Princip kontaktu v modelových simulacích, b) výběr kontaktních ploch .....	67
<b>Obr. 4.23</b> Prostředí softwaru ABAQUS interaktivní (vlevo), textové rozhraní (vpravo) ..	67
<b>Obr. 4.24</b> Průběh stlačení vzorku čisté PU pěny v porovnání se simulací .....	68
<b>Obr. 4.25</b> Model PU pěny s 16 svislými vlákny.....	69
<b>Obr. 4.26</b> Průběh deformace PU pěny se svislými vlákny .....	69
<b>Obr. 4.27</b> Deformace svislých vláken v PU pěně.....	70
<b>Obr. 4.28</b> Deformace pěny se svisle kladenými vlákny .....	70
<b>Obr. 4.29</b> Geometrie vlákna, geometrie segmentu pěny .....	71
<b>Obr. 4.30</b> Natočení jednotlivých segmentů kompozitní PU pěny .....	71
<b>Obr. 4.31</b> Uspořádání jednotlivých segmentů s vlákny do bloku kompozitní PU pěny.....	72
<b>Obr. 4.32</b> Deformace jednotlivých vláken při stlačení kompozitní pěny .....	72
<b>Obr. 4.33</b> Uspořádání vláken z bočního pohledu .....	73
<b>Obr. 4.34</b> Deformovaná vlákna při 70 % stlačení pěny.....	73

<b>Obr. 4.35</b> Porovnání výsledných průběhů stlačení simulací s experimentem .....	74
<b>Obr. 4.36</b> Uspořádání experimentu stlačování vzorku PU pěny kruhovým indentorem....	75
<b>Obr. 4.37</b> Porovnání průběhu stlačování bloku pěny experiment a MKP simulace.....	76
<b>Obr. 4.38</b> Rozložení kontaktního tlaku a) v bloku čisté pěny b) v bloku kompozitní pěny	77
<b>Obr. 4.39</b> Rozložení napětí a) v bloku čisté pěny b) v bloku kompozitní pěny .....	77
<b>Obr. 4.40</b> Zobrazení celkového posunutí a) v bloku čisté pěny b) v bloku komp. pěny ....	77
<b>Obr. 5.1</b> MKP model stlačování sedáku kruhovým indentorem a indentorem tvaru dolních končetin .....	80
<b>Obr. 5.2</b> Rozložení deformace v sedáku s PUK zatěžovaném kruhovým indentorem (nahore) a indentorem tvaru těla (dole) .....	81
<b>Obr. 5.3</b> Rozložení kontaktního tlaku od kruh. indentoru: PU (vlevo), PUK (vpravo) .....	82
<b>Obr. 5.4</b> Rozložení napětí od kruh. indentoru: PU (vlevo), PUK (vpravo).....	82
<b>Obr. 5.5</b> Zobrazení celkového stlačení od kruh. indentoru: PU (vlevo), PUK (vpravo)....	82
<b>Obr. 5.6</b> Rozložení kontaktního tlaku od indentoru tvaru dolních končetin: PU (vlevo), PUK (vpravo) .....	82
<b>Obr. 5.7</b> Rozložení napětí od ind. tvaru dolních končetin: PU (vlevo), PUK (vpravo) .....	83
<b>Obr. 5.8</b> Zobrazení celkového stlačení indentorem tvaru dolních končetin: PU (vlevo), PUK (vpravo) .....	83
<b>Obr. 5.9</b> Výsledné průběhy síly získané z MKP simulací .....	84
<b>Obr. 5.10</b> Funkční vzorek výplně automobilové sedačky z kompozitní nízkohustotní pěny s kokosovými vlákny.....	86
<b>Obr. 5.11</b> Plošina se šesti stupni volnosti, hydromotor .....	87
<b>Obr. 5.12</b> Experimentální statické zařízení funkčních vzorků výplní .....	88
<b>Obr. 5.13</b> X-senzor pro měření rozložení kontaktního tlaku .....	89
<b>Obr. 5.14</b> Rozložení kontaktního tlaku – kruhový ind. (PU pěna vlevo, PUK vpravo).....	89
<b>Obr. 5.15</b> Rozložení kontaktního tlaku – indentor tvaru dolních končetin (PU pěna vlevo, PUK vpravo).....	89
<b>Obr. 5.16</b> Porovnání průběhů síly v závislosti na deformaci experiment a MKP simulace při stlačování kruhovým a tvarovým indentorem.....	90
<b>Obr. 5.17</b> Průběhy tuhosti PU a PUK pěny získané z naměřených dat při stlačování kruhovým a tvarovým indentorem .....	91
<b>Obr. 5.18</b> Experimentální dynamické zařízení funkčních vzorků výplní.....	92
<b>Obr. 5.19</b> Stacionární periodický signál .....	93

<b>Obr. 5.20</b> Schéma výpočtu PSD Welchovou metodou.....	94
<b>Obr. 5.21</b> Výkonová spektrální hustota .....	95
<b>Obr. 5.22</b> Porovnání průběhů přenosových charakteristik čisté PU pěny a kompozitní pěny pro různé hmotnosti.....	95
<b>Obr. 5.23</b> Návrh zařízení pro dlouhodobé zkoušky .....	96
<b>Obr. 5.24</b> Průběh zrychlení na jednotlivých vačkách .....	97
<b>Obr. 5.25</b> Náhled okna ovládacího softwaru .....	98
<b>Obr. 5.26</b> Realizace zařízení pro dlouhodobé zkoušky .....	99
<b>Obr. 5.27</b> Vstupní a výstupní průběh zdvihu testu přenosových charakteristik 30 kg .....	100
<b>Obr. 5.28</b> Porovnání průběhů přenosových charakteristik naměřených zařízením pro dlouhodobé testování sedaček .....	100

## Seznam tabulek

<b>Tab. 4.1</b> Parametry testovaných vzorků.....	51
<b>Tab. 4.2</b> Hodnota SAG faktoru .....	56
<b>Tab. 4.3</b> Relaxace materiálu.....	57
<b>Tab. 4.4</b> MKP model stlačování vzorku .....	67
<b>Tab. 4.5</b> Vstupní materiálové vlastnosti MKP modelu.....	68
<b>Tab. 4.6</b> MKP model stlačování bloku pěny .....	75
<b>Tab. 5.1</b> MKP model stlačování sedáku kruhovým indentorem a indentorem tvaru dolních končetin .....	80
<b>Tab. 5.2</b> Parametry jednotlivých vaček.....	98



## 1. Úvod

Výrobci vozidel kladou v současné době vysoké nároky na vývoj a konstrukční řešení automobilových sedaček. Důležitými parametry pro porovnávání vlastností automobilové sedačky jsou komfort (kvalita sezení) a bezpečnost pasažéra (vibroizolační a nárazové schopnosti). Komfortem se rozumí nejen pohodlí při sezení ovlivněné bezpečností sedačky při nárazu, ale také odpovídající ergonomie, což ze současného konstrukčního řešení automobilové sedačky vytváří komplexní problém. Základní problém spočívá v tom, že v současné době je **hlavním požadovaným parametrem celkové snižování hmotnosti automobilu**. Snižování hmotnosti automobilu je řešeno prostřednictvím změny konstrukčních prvků exteriéru i interiéru, což se přímo týká odlehčování automobilové sedačky. Problematika konstrukčního řešení sedačky je výrazně ovlivněna především anatomii člověka (tělesnou konstitucí – stavbou těla), což bude podrobněji popisuje kap. 2. Každý jedinec a jeho anatomie je spojená s pohodlím v daném prostoru, která má vliv na snadnou dosažitelnost ovládacích prvků automobilu. Hmotnost a stavba těla člověka ovlivňuje interakci těla a sedačky popsatelnou rozložením a velikostí kontaktního tlaku. Dále ovlivňuje dynamické parametry popsatelné změnou tuhosti a tlumení, nebo výslednými přenosovými charakteristikami sedačky. Tyto a další mechanické parametry jsou závislé na tvaru a velikosti styčné plochy stlačené komfortní výplně (sedáku a opěráku) v daných klimatických podmínkách. V řadě prací bylo diskutováno, že konstrukcí rámu sedačky se při jízdě přenášejí účinky mechanických vibrací v důsledku dynamických sil vznikajících při jízdě po vozovce, resp. v terénu, které mají nepříznivé účinky na člověka, jak je uvedeno např. v [1 – 11]. Proto další požadovanou vlastností při snižování hmotnosti automobilové sedačky je zachování či zlepšení útlumu a minimalizace mechanických vibrací přenášených na člověka. Na Katedře částí a mechanismů strojů TUL a v Laboratoři aplikované mechaniky Oddělení konstrukce strojů je jednou ze specializací výzkum a testování automobilových sedaček, a to zejména výzkum komfortu sezení. Analýzy se provádějí podle předepsaných norem a směrnic na zkušebních vzorcích i kompletních autosedačkách získaných ze spolupráce s průmyslem (mj. testování autosedaček pro Škoda auto, a.s. a VW s pevnou i lidskou zátěží). V současné době je **nedořešeným problémem náhrada samotné komfortní výplně automobilové sedačky**. Je to dáno jednak nelineárními mechanickými vlastnostmi současných materiálů komfortní výplně (ovlivněné geometrií, tuhostí, tlumením), jednak požadavky na ekologii a možnosti

recyklace, a v neposlední řadě energetickou náročností výrobní technologie. Přestože se v současné době vyvíjí řady alternativních řešení v podobě náhrady současného dominantního materiálu tj. polyuretanové pěny (PU pěny) za jiné struktury, jak uvádí např. [12 – 18]. Musíme si ovšem uvědomit, že úplnou náhradou PU pěny se tento problém v současné době uspokojivě nevyřeší, neboť by se tím musely přestat využívat stávající technologické postupy a výrobní zařízení (produkční linky na výrobu výplně z polyuretanové pěny <sup>(1)</sup>). **Díličí řešení problematiky snižování hmotnosti automobilové sedačky se proto nabízí v oblasti vývoje nízkohustotních kompozitní pěn vyplněné lehkými výztužemi,** které zajistí snížení výsledné objemové hmotnosti v důsledku synergického účinku „pěna + výztuž“ a umožní řízené snížení hmotnosti komfortní výplně při zachování odpovídajících mechanických vlastností. Tím by se docílilo nejen snížení hmotnosti komfortní výplně, ale zároveň snížení hmotnosti celé sedačky.

---

<sup>(1)</sup> Pozn. Systémové řešení komfortní výplně automobilových sedaček se v současné době musí stále hledat u stávajících technologií, neboť vývoj těchto technologií je na vysoké úrovni a „ze dne na den“ se nezastaví. Je to dáno tím, že významní výrobci polyuretanové pěny jako je mj. Fehrer, Johnson Controls, atd. mají ještě na řady let smlouvy na dodávky komfortní výplně z PU pěny.

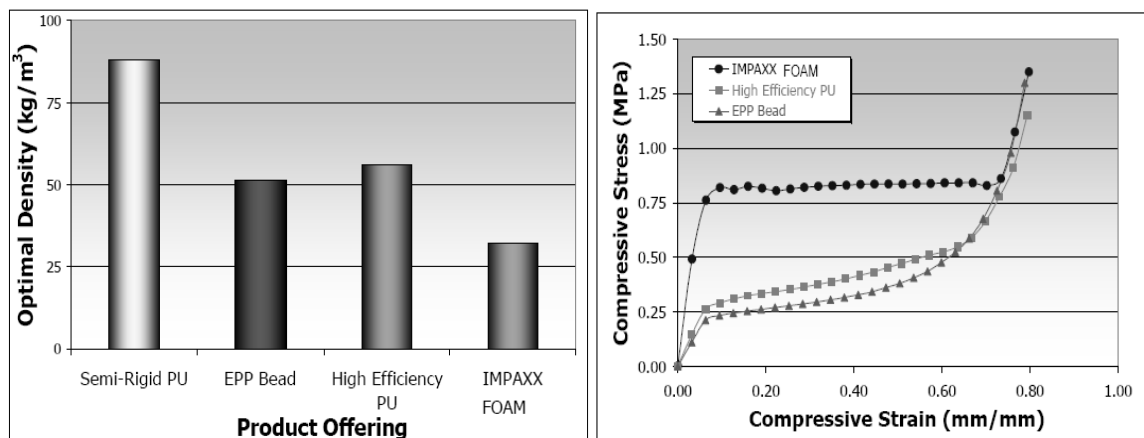
## 2. Problematika výzkumu a vývoje výplně automobilové sedačky

V této kapitole zabývající se řešením daného problému je nejprve uvedena problematika výzkumu a vývoje výplně automobilové sedačky, dále je diskutován rozbor současných požadavků na konstrukční řešení sedačky a s tím související testování. Závěrem jsou přiblíženy možnosti řešení náhrady současného materiálu výplně automobilové sedačky.

### 2.1 Úvod do problematiky výzkumu a vývoje výplně pro automobilové sedačky

Celá automobilová sedačka sloužící k interakci řidiče (pasažéra) s automobilem musí plnit bezpečnostní kritéria schvalovaná podle mezinárodních testovacích norem. K důležitým parametrům hodnotících kvalitu této interakce patří zejména parametry posuzující vliv mechanických vibrací na řidiče (pasažéra) a míru kvality sezení [19], [20], [21]. Na základě rozboru současného stavu vývoje automobilových sedaček lze konstatovat, že zejména účinná vibroizolace komfortní vrstvy sedáku a opěráku autosedačky je v současné době stále nedořešeným problémem. Sestava komfortní vrstvy sedačky je tvořena potahem a tvarovanou geometrií komfortní výplně, která je vyráběna nejčastěji z PU pěny. Tato sestava může být doplněna o další prvky, jako jsou např. klimatizace (vyhřívání, chlazení, odvětrávání), masážní a komfortní systémy (změna tuhosti a tlumení sedačky), hlavovými opěrkami s funkcí drive [22], či sestavou vrchního krytí (potahu) např. s funkcí „human humidity“. Jak bylo uvedeno v úvodu této práce, nedořešeným problémem jsou komfortní výplně automobilové sedačky, resp. parametr hmotnost/komfort + bezpečnost. Mechanické a fyzikální vlastnosti výplně se však mění s geometrií, tloušťkou, hustotou, typem materiálu výplně atd. Snížením tloušťky výplně se sice docílí snížení hmotnosti sedačky, ale zároveň se snižuje celkové tlumení a elastické parametry, jak uvádí Petřů [12]. Výsledkem je zhoršení kvality sezení. Pro komfort sezení lze určit některé mezní hodnoty, např. maximální hodnotu kontaktního tlaku, nebo maximální hodnotu přenosu mechanických vibrací, přičemž tyto hodnoty nesmějí být v žádném případě překročeny. Problém má jednoduché zadání, které je obtížně řešitelné resp. splnitelné řešení. Za účelem snížení nepříznivých účinků mechanických vibrací při

zachování až zlepšení kvality sezení vyvíjejí výrobci výplní různá opatření, jako bylo např. konstrukční řešení propojením polyuretanové pěny s nepolyuretanovým materiálem u sportovních vozidel koncernu VW (nové typy vozidel Porsche), kde kvalitu sezení při snížené výšce sedáku zvýšili propojením polyuretanové pěny s plošnou textilií. Ford Company patentoval a dále vyvíjí ve spolupráci s americkými univerzitami tzv. Biopěnu (BIOfoam), kde je buněčná struktura polyuretanové pěny nahrazena ze 40 % přírodním extraktem ze sójových bobů [23]. Popisováno je taktéž vrstvení polyuretanových pěn s rozdílnými fyzikálními vlastnostmi (objemovou hmotností, tvrdostí, buněčnou strukturou, chemickým složením atd.) [24], které však nepřinášejí očekávané zlepšení. To může být dáno faktem, že pouhé vrstvení polyuretanových pěn nepřinášejí odpovídající synergický účinek [25]. Snahou a současným trendem se proto stal, i vzhledem k zachování stávajících výrobních technologií, vývoj nízkohustotních PU pěn. Warren [26] vysvětluje výhody a úskalí v porovnání mezi nízkohustotní pěnou a standardní pěnou o hustotě 45-50 kg.m<sup>-3</sup>, přičemž konstatuje, že lze vyrábět PU pěny se sníženou hustotou až na 30 kg.m<sup>-3</sup>, při zachování stejných mechanických vlastností. To potvrzuje i Woldesenbet [27], který uvádí, že nízkohustotní pěny o hustotě 31 kg.m<sup>-3</sup> mohou snížit hmotnost současných komfortních výplní, při významném zvýšení pevnosti a stlačitelnosti. Význam nízkohustotních pěn v závislosti na stlačení je patrný z obr. 2.1 [28].



**Obr. 2.1** Vývoj polyuretanových pěn vedoucí ke snižování objemové hmotnosti [28]

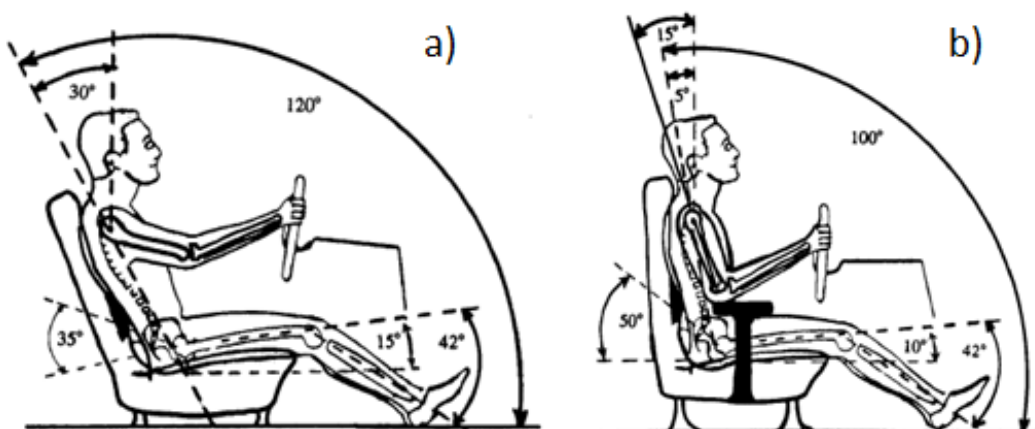
Výše uvedená další řešení jsou však obecně omezená hodnotou hustoty, která se v současné době pohybuje okolo 30 kg.m<sup>-3</sup>, tedy snížení objemové hmotnosti oproti současným řešením přibližně o 33-40 %. Možným řešením se však mohou stát konstrukce komfortní výplně ještě o podstatně nižší objemové, a tedy i celkové hmotnosti, kde by se však již nejednalo jen o nízkohustotní pěny, ale o nízkohustotní pěny s výztužemi, resp.

**nízkohustotní kompozitní pěny.** Vysvětlení problému vychází z funkcionálu požadovaných parametrů  $F_p$  pro optimální mechanické a fyzikální vlastnosti komfortní výplně při jízdě. Jestliže  $F_p$  rozložíme do 2 složek tj. komfortu a bezpečnosti sezení a budeme minimalizovat snížení hodnoty hustoty polyuretanové pěny  $\rho_{PU}$ , nesnížíme jen hmotnost výplně, ale současně dojde ke snížení celkového tlumení  $\eta_t$  ( $Ns.m^{-1}$ ) a požadované tuhosti  $K$  ( $N.m^{-1}$ ). Struktura výplně sedačky bude nejen nekomfortní, ale zároveň nestabilní, resp. nenosná. Výsledkem bude zvýšení nepříznivých účinků kvality sezení. Na základě těchto skutečností se jako možné konstrukční řešení komfortní výplně nabízí řešení prostřednictvím nízkohustotní pěny s výplňovými prvky. Výplňové prvky (např. přírodní či syntetická vlákna, odpadové a recyklované materiály, atd.) převezmou nosnou funkci, vyztuží a zpevní buněčnou strukturu a tím jí vrátí její snížené mechanické vlastnosti. Tím lze prakticky z běžné nízkohustotní pěny vytvořit **kompozitní pěnu, resp. kompozitní strukturu**, která optimalizací množství a typu výztuže umožní dosáhnout synergického účinku pro požadovaný komfort a bezpečnost sezení. Toto řešení je složité a komplexní a proto vyžaduje ucelený výzkum a syntézu prostřednictvím teorií, experimentálních měření, simulací a analýz, které povedou k výsledkům a znalostem umožňujícím navrhnout a zhotovit konstrukční řešení funkčního modelu automobilového sedáku s nízkohustotní kompozitní pěnou.

## 2.2 Rozbor současných požadavků na konstrukční řešení sedačky

Vzhledem k rostoucí potřebě cestovat, tráví lidé ve vozidlech a na cestách stále více času. Automobilové sedadlo je po celou dobu v přímém kontaktu s lidským tělem a jeho parametry mají značný vliv na kvalitu jízdy, a to jak hodnoceno měřitelnými parametry (kontaktní tlak, tlumení), tak na subjektivní pocity řidiče (komfort, únava). Jak uvádí Harrison [29], na přelomu tisíciletí byla již dokonale zpracována oblast komfortu a biomechaniky sezení na kancelářských židlích. Oblastem komfortu a ergonomie sezení při řízení dopravního prostředku bylo ovšem věnováno mnohem méně pozornosti a právě nástupem 21. století zažila tato oblast výrazný rozmach. Zatímco parametry jako bezpečnost, pevnost atd. se dají pomocí specifických testů přímo měřit a vyjádřit, bude komfort sezení vždy do značné míry subjektivní záležitostí a nikdy nelze zaručit, že bude vnímán a posuzován všemi jedinci shodně [30]. Na psychiku (rychlost únavy) a fyzický stav řidiče (biomechanika páteře a skeletu) totiž nemá vliv pouze tvar a tuhost sedadla, ale

i další vlivy jako přenos vibrací, tepelný komfort a odvod par a potu. Mezi nejčastější zdravotní problémy způsobené tvarem sedadla a působením přenášených vibrací patří podle [31] bolesti v oblasti bederní a krční páteře. Velmi významným parametrem v otázce bezpečnosti je otázka tlumení vibrací a schopnost absorbovat vzniklé rázy lidským tělem. Ve výzkumu řidičů nákladních automobilů poukázal Kesley [32] na téměř 4násobný výskyt vyhřeznutí meziobratlových plotének u sledovaných osob a Rosegger [33] provedl výzkum, kdy až u 70 % řidičů traktorů našel degenerativní změny na páteři. Na základě těchto studií je tedy možné říci, že pokud na sedící osobu zároveň působí vibrace, je výskyt zdravotních komplikací mnohonásobně častější. Velké množství autorů se také věnuje optimálnímu nastavení jednotlivých částí sedadla (sedák, opěradlo, bederní a hlavová opěrka), které mají přímý vliv na pozici a natočení páteře, pánve a krčních obratlů. Jak uvádí [29], využití SAE figuríny je v tomto případě nevhodné, neboť přenáší zatížení do sedáku odlišným způsobem než pánev reálného lidského těla. Její použití je tedy především doporučeno pro testování prostoru řidiče, nastavení sedadla a dosah dolních končetin. Toto jsou důvody, proč je testování a konstrukce sedadel velmi důležitá. Dalším významným parametrem, jenž ovlivňuje kvalitu a komfort řidiče, je možnost individuálního nastavení sedadla. Na obr. 2.2 je možné vidět fyzikální rozpor při různém úhlu nastavení sedadla. Při optimálním nastavení sedadla pro pouhé sezení ( $120^\circ$  sklon), vykazuje pasažér při řízení výrazné předsunutí hlavy. Současně také nastává problém v příliš rovné poloze dolních končetin, kdy je významně omezena možnost rychle vyvinout sílu ke stlačení pedálů. Změnou úhlu opěradla na  $100^\circ$  a mírným sklopením sedáku je možné výrazné snížení flexe hlavy.



**Obr. 2.2** Fyzikální rozpor mezi ideálním sezením a předsunutím hlavy [34]

Mezi hlavní požadavky a sledované parametry v oblasti vývoje a konstrukce autosedaček obecně patří, že pěnová výplň by měla být přibližně středně tuhá. Nastavitelná a dostatečně pružná opěrka hlavy, vytvarování rámu opěradla dle fyziologických parametrů člověka – prohnutí respektující zakřivení páteře (lordóza, kyfóza). Významným parametrem je současně také tepelný komfort, v jehož množině je skryta schopnost transportu tekutin, prodyšnost a tepelná kapacita kontaktních materiálů. Ve zcela ideálním případě by mělo být možné v reálném čase nastavovat dle stylu jízdy a požadavků řidiče útlum, tuhost, kontaktní tlak, prodyšnost, atd. [35]. V reálném případě však obecně sedadla mají plnit:

- **účinné a optimální tlumení vibrací,**
- **nastavitelný úhel opěradla, výšky sedadla a horizontální nastavení sedáku,**
- **odpovídající vertikální a horizontální nastavení bederní podpory,**
- **nastavení pozic vzdálenosti od pedálů (lineární pojezd celého sedadla, zdvihání sedáku.**

Jak Martonka [20] uvádí ve své práci, pro posouzení míry vztahu pasažéra a sedadla ve stojícím autě je použit tzv. SAG faktor vycházející z [36], který bezrozměrně definuje poměr zatěžujících sil při 25% a 65% deformaci celkové výšky pěnového sedáku. Optimální hodnota SAG faktoru by přitom měla ležet v rozmezí 2-4, kde  $F_i$  je síla odpovídající danému stupni deformace [N].

$$SAG = F_{65}/F_{25} \quad (2.1)$$

### 2.2.1 Testování sedadel

Všechny rozměry a tvary sedadla jsou odvislé od základní geometrie sedadla (obr. 2.3) od polohy H bodu (osa rotace kyčelního kloubu) a R bodu (referenční bod užívaný při konstrukčním návrhu sedačky, kdy v ideálním případě jsou R bod a H bod totožné) [37]. Při provádění testů **komfortu a bezpečnosti** jsou studovanými parametry např. tlumení, kontaktní tlaky, prodyšnost či tepelný komfort, provádí se mechanické testy nárazu impaktoru/figuríny do sedačky, které obecně vychází z norem a předpisů. Příkladem lze uvést evropské předpisy podle EHK:

- Předpis pro ukotvení pásů (EHK R14 [38]) stanovuje podmínky ukotvení bezpečnostních pásů. Definuje se zde tažná síla, co do velikosti i směru, vzhledem k horizontální rovině. K zatížení pásů dochází prostřednictvím figuríny. Tříbodový pás je testován silou 13,5 kN v každém pruhu případně až silou 22,5 kN

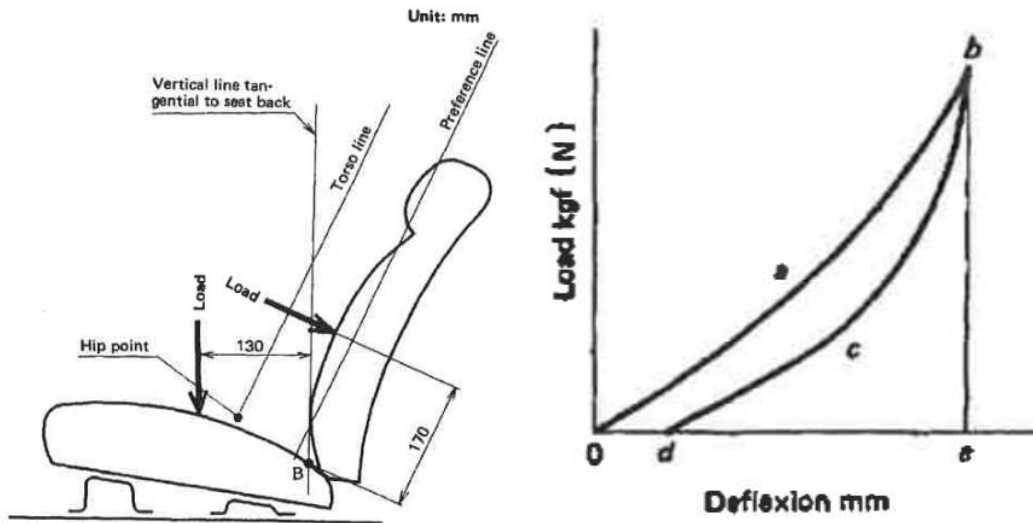
v diagonální hrudní části (obr. 2.4). Zařízení musí odolat alespoň po dobu 0,2 s. Podobné podmínky platí i pro testování rámu opěradla sedadla zadního. Vzhledem k protínajícím se požadavkům na bezpečnost a současně i co nejmenší hmotnost sedadla, se dnes již ve většině případů pásy nekotví k sedadlům, ale přímo ke karoserii. Jediný bod, který zůstal s rámem sedadla pevně spojen, je bezpečnostní západka čepu pásu, u které je požadována změna polohy při nastavování polohy sedadla příčným posuvem, standardně 120 mm.

- Pevnost sedadel a jejich upevnění do podlahy (např. EHK R17 [39]). Vzhledem ke konstrukci se zde jedná o jedny z nejdůležitějších předpisů. Jedná se o kontrolu mechanismu seřizování úhlu sedadla momentem 373 - 530 Nm vzhledem k H bodu. Případně současným působením sil 700 N na sedák a 400 N na opěradlo, při rychlosti zatěžování 150-300 mm/min. Vzhledem k výrazné hysterezi celé konstrukce se doporučuje provádět dané zatížení několikrát, nejméně však dvakrát. Dále se jedná o statické zkoušky podélného posuvného mechanismu sedadla. Mezi další případy testu se řadí i test pevnosti kostry, která se zatěžuje 20násobkem váhy sedadla v jeho těžišti. Všechny díly jsou nejčastěji formou výpočtu kontrolovány na zatížení odpovídající zrychlení 20 G.
- Testování opěrky hlavy dle EHK R25 [40]. Vzhledem k přímé návstavbě mechanismu hlavové opěrky na konstrukci sedadla, jsou tyto testy přímo spjaté s konstrukcí rámu sedadla a jeho parametry ve značné míře ovlivňují. Standardně prováděnou zkouškou je zkouška statická, která se provádí pomocí kulové hlavice se silou narůstající až do 885-890 N při maximální přípustné deformaci 102 mm, jak je patrné na obr. 2.5. Podstatou dynamického testu je náraz kulového impaktoru do opěrky rychlostí 24,1 km/h, kdy zpomalení impaktoru nesmí přesáhnout hodnotu 80 G po dobu 3 ms.

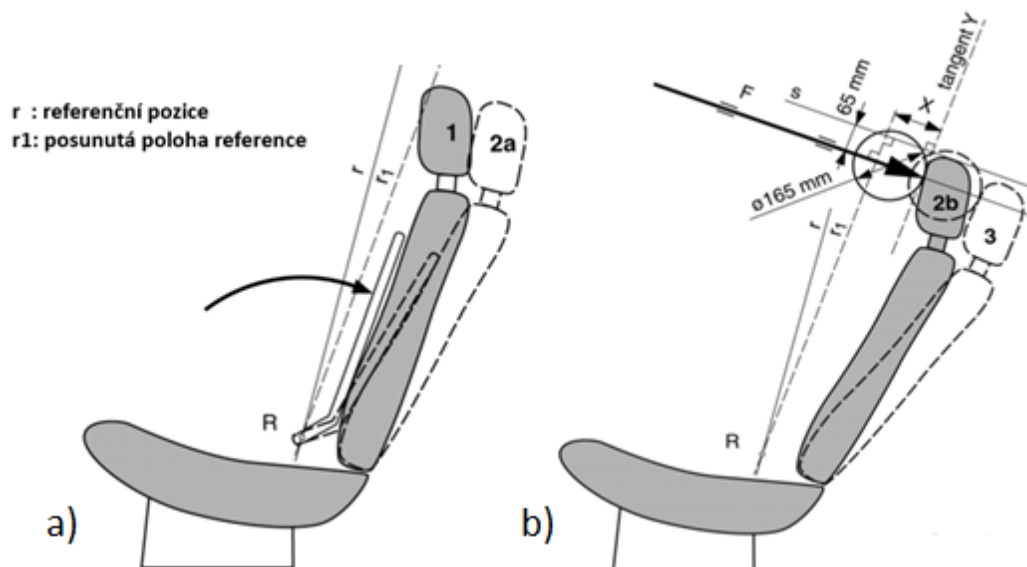




Obr. 2.3 Základní geometrie a polohy sedadla [41]



Obr. 2.4 Určení směru a působíště zatížení a ukázka výrazné hystereze při odlehčení [38]



Obr. 2.5 Zatížení sedadla silou – ekvivalent. momentem a silou na hlavovou opěrku [39]

## 2.2.2 Obecné požadavky na zatížení a testování sedaček lze rozdělit do následujících bodů:

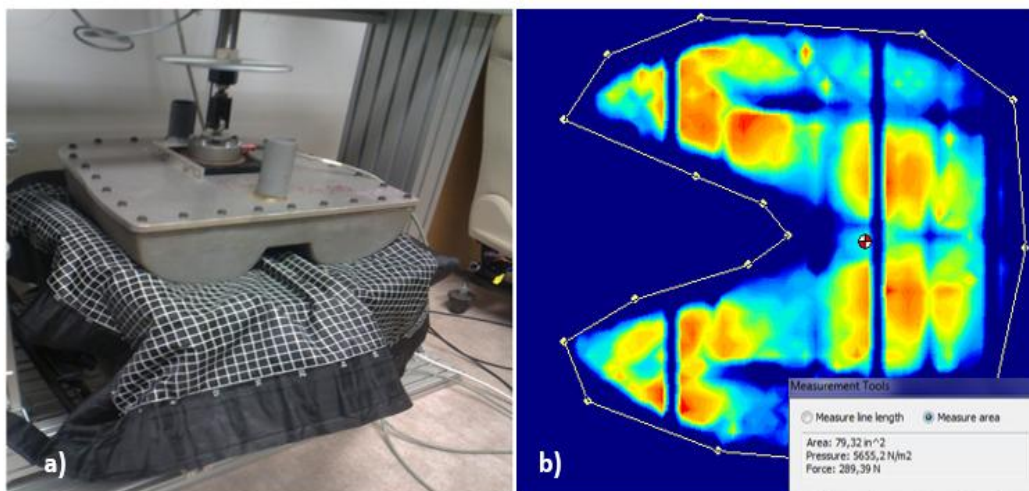
### i. Zatěžování sedačky lidským tělem

Primárním zdrojem zatížení je pro autosedačku lidské tělo a síly, které ve spojení hmotnosti těla a působícího zrychlení mohou vzniknout, jak publikovala řada autorů např. [12], [20], [21], [42], [43], [44]. V důsledku podstatných rozdílů v individuálních velikostech těla jsou střední hodnoty tělesných rozměrů málo použitelné a namísto toho je vhodné pracovat s rozpětím. Statisticky [45] bylo dokázáno, že měření lidského těla v jakémkoli daném vzorku populace bude distribuováno tak, že většina případně přibližně do středu, zatímco malý počet extrémních měření připadne na některý konec spektra. Je nemožné provádět návrh pro celý vzorek populace, proto je nezbytné vybrat segment ze středové části. V důsledku toho je dnes vcelku obvyklé nevímat si extrémů na obou koncích a pracovat s 90 % populační skupiny [46]. Většina antropometrických údajů je proto často vyjádřena v termínech percentilů. Percentily udávají počet procent osob v rámci populace (přesněji populačního vzorku), které mají tělesné rozměry určité velikosti (nebo menší). Například 95% percentil udává, že pouze 5 % populace studie má výšky větší a 95 % populace studie má výšky stejné nebo menší. Předpokládat ovšem, že 50% percentil představuje míry „průměrného člověka“ a vytvářet návrh, který by vyhovoval 50% percentilu, je velmi vážným omylem v používání dat. Klamný závěr obsažený v této domněnce spočívá v tom, že podle dřívější definice 50 % skupiny stačí. „Průměrný člověk“ totiž neexistuje. V závislosti na povaze problému má být návrh nejen autosedaček obvykle koncipován tak, aby vyhovoval 5% nebo 95% percentilu [45].

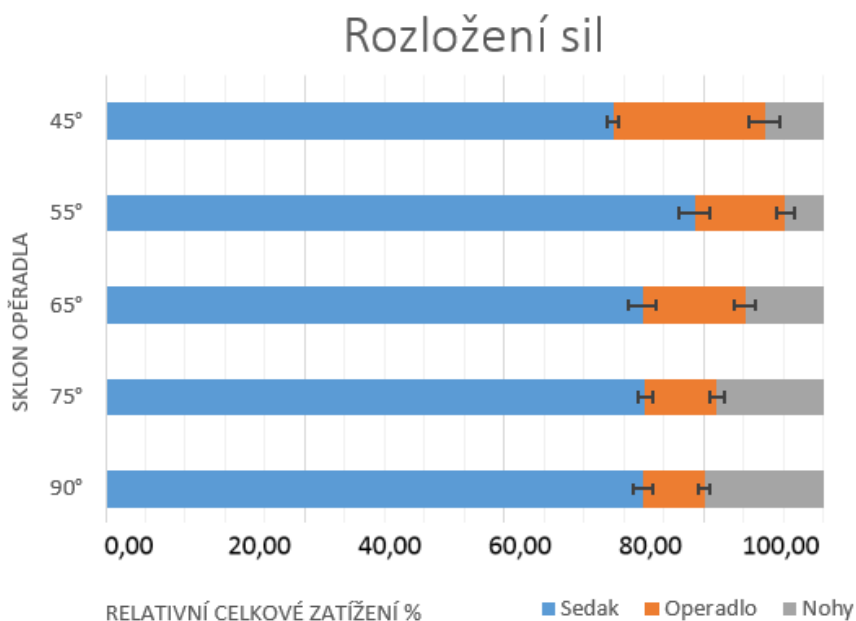
### ii. Kontaktní tlak

Hmotnost a stavba lidského těla mají přímý vliv na vzájemnou interakci mezi tělem a sedadlem. Jako parametr, jenž tento vztah popisuje a udává rozložení a hodnoty vznikajícího napětí se využívá parametr zvaný kontaktní tlak. Měření kontaktních tlaků je znázorněno na obr. 2.6. Mezní hodnoty kontaktního tlaku jsou dány různými limity, např. Jackson [47] určil hodnotu kontaktního tlaku 8,8 kPa jako nejvyšší považovanou za komfortní pro sedák. Dle fyziologických norem [46] a jak uvádí např. Vlček [48] sedák podepírá řidiče v relativně značné stykové ploše a přenáší většinu jeho hmotnosti. Na jednotlivé části sedačky by se měly tlaky přenášet přibližně v následujících poměrech: sedák 64-72 %, opěradlo 4-16 % a zbývajících přibližně 15 % přejde jako reakce od

chodidel do podlahy vozidla. Na obr. 2.7 je ukázáno rozložení zatížení v závislosti na nastavení sedadla.



**Obr. 2.6** Měření kontaktních tlaků a následné určení sil pomocí trasování tlakové oblasti křivkou



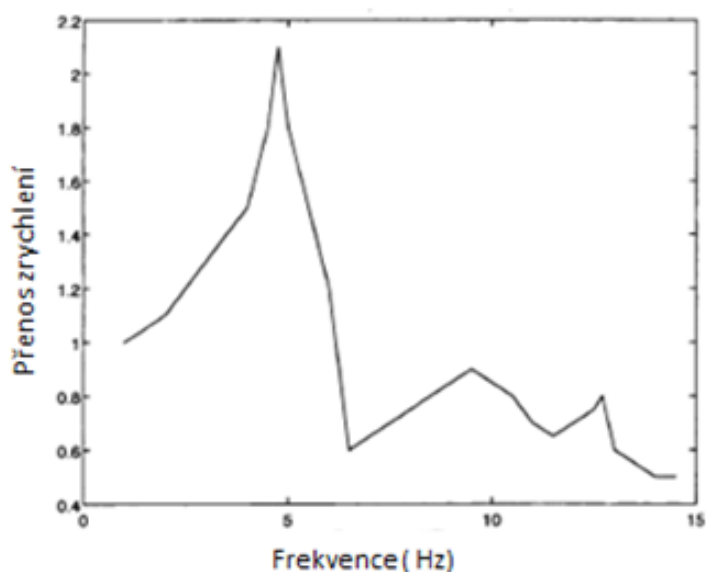
**Obr. 2.7** Rozložení působícího zatížení od sedící osoby při změně úhlu opěradla a horizontální poloze sedáku (chybové úsečky prezentují – statistické odchylky mezi testovanými subjekty včetně real\_human\_manikina)

Podle Chena [49] by měl být kontaktní tlak nejvyšší pod centrálními sedacími kostmi a měl by se postupně snižovat směrem k nohám a bokům. Velmi důležité je podepření v bederní části páteře a minimální podepření v podkolenní části. Hodnocení komfortu podle kontaktního tlaku je velice ovlivněno individuálními preferencemi, např. Carcone [50] ve své studii dlouhodobého sezení uvádí tendenci lepšího hodnocení komfortu v souvislosti s

větší kontaktní plochou, dále ukazuje výraznou korelaci v hodnocení komfortu opěráku s hodnotou tlaku. Naproti tomu Porter [51] nezaznamenal žádný významný vztah mezi vnímaným komfortem a průměrným tlakem v oblasti opěradla. Hodnoty kontaktních tlaků lze snadno experimentálně měřit pomocí zařízení X-Senzor a následným přepočtem oblastí, v nichž působí měrné tlaky, získat hodnoty síly [41].

### iii. Přenos a útlum vibrací

Mezi nejnebezpečnější vibrace dle Wildera [51] patří frekvence 4,75 Hz, 9,5 Hz a 12,7 Hz, kdy dochází k rezonanci páteře. Jak následně doplnil např. Pope [53], většina dopravních prostředků se pohybuje obvykle ve frekvenci 3-6 Hz, což znamená, že zde leží i dle Wildera [51] nejvýznamnější vibrační mód 4,75 Hz. Primární vibroizolace vozidel, jako např. tlumení karoserie od kol obvykle nejsou dostatečné pro pocit a zajištění nezbytného jízdního komfortu. Z toho důvodu je do vozidel nutné přidávat anatomicky tvarovaná sedadla doplněná o další možnosti tlumení. Tento účinek je obvykle docílen kombinací několika vrstev, které zahrnují potah, komfortní vrstvu a ocelovou konstrukci spojenou s nosným rámem. Jako výplň komfortních vrstev je obvykle používána PU pěna. Chování pěny je silně nelineární a viskoelastické při relaxaci a obnově původního tvaru. Dle [54] je zásadnějším problémem recyklace PUR pěny, která je možná pouze v případě, že v pěně nejsou přítomny další aditivní složky, jež ovšem obvykle přidány jsou. Jak již bylo zmíněno, různí lidé jsou na vibrace různě citliví, což bylo ověřeno a studováno autorem např. v publikacích [41], [43], [55].



**Obr. 2.8** Přenos vibrací měřen u dospělého muže v oblasti páteře [34]

Je tedy nutné nalézt optimální kompromis mezi hodnotou kontaktního tlaku a přenosem vibrací z vozidla [34], [56]. Dle [57] je zde ovšem obecně stanovena hodnota, na kterou jsou lidé zvyklí a působí jim pouze minimální problémy. Tato frekvence je nazývána kroková a přes mírné odlišnosti leží v oblasti 2-4 Hz. Mimo tuto oblast by měly být minimalizovány především vibrace nízkých frekvencí, které odpovídají vlastním frekvencím orgánů. Schopnost izolovat vibrace o určité frekvenci a amplitudě popisuje parametr nazývaný přenosová funkce obr. 2.8. Tato funkce popisuje závislost přenosu vibrací mezi zdrojem a sledovaným místem <sup>(2)</sup>. Tato funkce a její interpretace či běžné porovnání je ovšem celkem složitá. Z toho důvodu ve snaze vyjádřit dynamické chování pouze jednou hodnotou, bývá ve specializované literatuře [58] používán tzv. SEAT faktor.

$$SEAT = 100 \times \frac{RMS_{SEAT}}{RMS_{FRAME}} [\%] \quad (2.2)$$

Kde RMS je definováno jako efektivní hodnota vibrací měřených na sedadle a kotvení rámu.

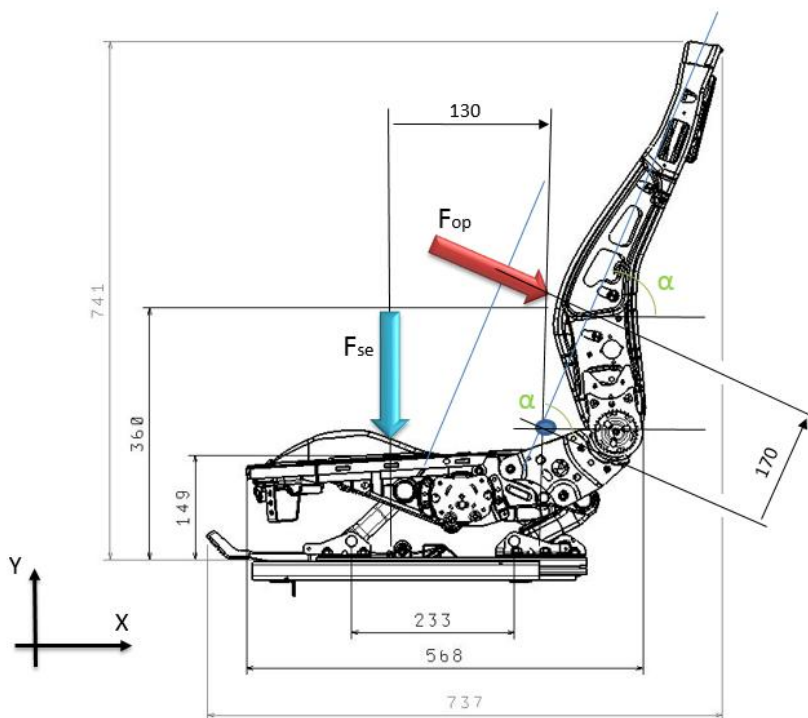
$$RMS = \left[ \frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t) dt \right]^{1/2} \quad (2.3)$$

Kde T je časová perioda v [s],  $a_w$  akcelerace [ $m \cdot s^{-2}$ ] a t je složka času.

#### iv. Zatížení jednotlivých dílů

V publikaci [41] bylo uvažováno zatížení sedadla prostřednictvím dvou výchozích hodnot. Antropometrické tabulky Evropana, který svojí hmotností odpovídá 73,5 kg se směrodatnou odchylkou 15,4. Horní a dolní percentil (25 a 75) následně odpovídají hodnotám hmotnosti 62,7 a 83,7 kg. Pro výpočet zatížení sedící osobou je tedy zvolena osoba vyskytující se těsně nad hranicí běžného rozložení o hmotnosti 85 kg. Podle bezpečnostní normy hodnoty zatížení odpovídají až 700 N pro sedák a 400 N pro opěradlo, případně síle, která na opěradlo působí momentem 530 Nm. Uvažované rozměry a působící síly jsou uvedeny na obr. 2.9.

<sup>(2)</sup> Pozn. Frekvence  $f_i$ , při kterých jsou hodnoty přenosu největší, jsou nazývány jako rezonanční frekvence systému



**Obr. 2.9** Obvyklé rozměry a uvažované síly působící na sedadlo [41]

### Zatížení od sedícího Muže

$$F_{OPXM} = F_{op} \cdot \cos(\pi/2 - \alpha) = F_{op} \cdot \sin \alpha = 130 \cdot \cos(\pi/2 - 70) = 122 \text{ N}$$

$$F_{OPYM} = F_{op} \cdot \sin(\pi/2 - \alpha) = F_{op} \cdot \cos \alpha = 130 \cdot \sin(\pi/2 - 70) = 44 \text{ N}$$

$$F_{YM} = F_{SEM} + F_{OPYM} = 578 + 44 = 622 \text{ N}$$

### Testovací zatížení

$$F_{OPXT} = F_{op} \cdot \cos(\pi/2 - \alpha) = 400 \cdot \cos(\pi/2 - 70) = 375 \text{ N}$$

$$F_{OPYT} = F_{op} \cdot \sin(\pi/2 - \alpha) = 400 \cdot \sin(\pi/2 - 70) = 136 \text{ N}$$

$$F_{YT} = F_{SET} + F_{OPYT} = 700 + 136 = 836 \text{ N}$$

#### **v. Sklápěcí mechanismus**

Sklápěcí mechanismus opěradla zajišťuje jednoduchou adjustaci úhlu opěradla (obr. 2.10). Působící síla odpovídá v závislosti na celkovém nastavení sedadla přibližně 5 – 20 % celkové hmotnosti sedící osoby, což pro 85kg muže odpovídá zatížení zhruba 130 N a z toho vyplývající moment pak odpovídá hodnotě přibližně 20 Nm. Testovací zatížení, na něž jsou ovšem opěradla testována, dosahuje hodnot až k hranici 500 Nm. Při takovémto zatížení musí mechanismus nejen vydržet působící moment, ale taktéž nesmí dojít k jeho uvolnění z dané fixní polohy – pootočení. Vzhledem k tomu, že se jedná o

čelní zubový převod, který není samosvorný, je aretace zajišťována přidavným mechanismem.

### Moment od řidiče

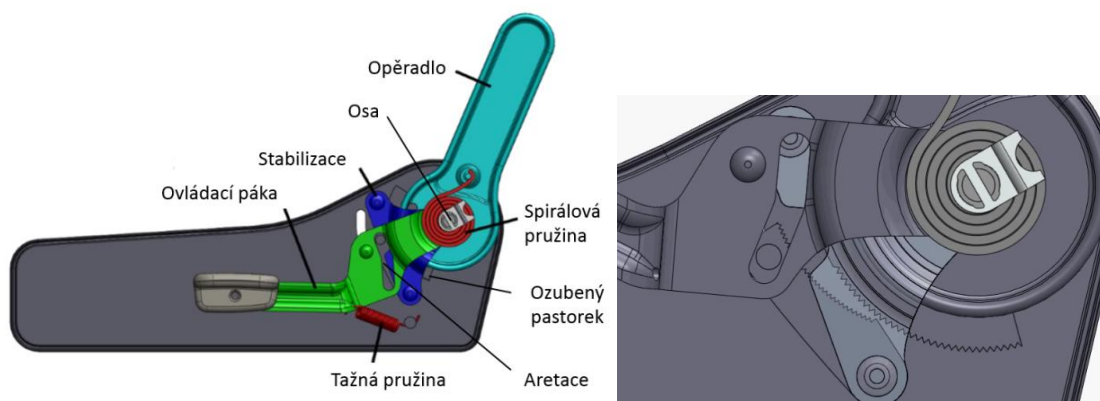
$$M_M = F_{OPXM} \cdot 0,17 \cdot \sin \alpha + F_{OPYM} \cdot 0,17 \cdot \cos \alpha = F_{OP} \cdot 0,17 = 22,1 \text{ Nm}$$

### Moment experimentální

$$M_T = F_{OPT} \cdot 0,17 = 68 \text{ Nm}$$

### Moment dle JASO

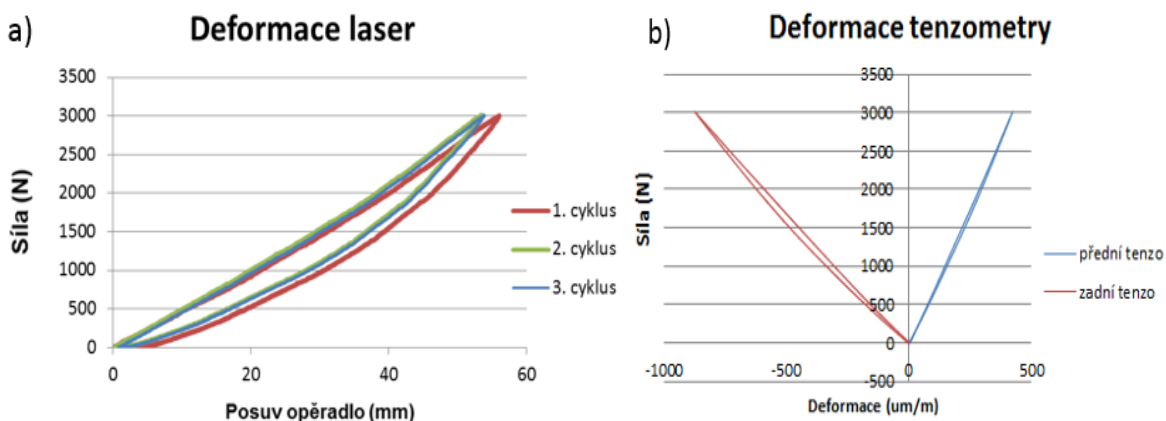
$M_{JS} = 500 \text{ Nm}$ , který by na daném sedadle mohla teoreticky způsobit síla na opěradlo 2950 N, vznikající např. při zadním nárazu, kde dle ECE testujeme zatížení až 25 G. Je tedy zřejmé, že normalizované testy reflektují působení jak dlouhodobých statických sil, tak i krátkých dynamických dějů.



**Obr. 2.10** Pákový mechanismus adjustace opěradla

#### **vi. Opěradlo**

U testování opěradla se rozlišuje zatížení statické, kdy třemi opakovanými měřeními postupně zatěžujeme k maximální síle a dynamické, kdy dochází k nárazu kulového impaktoru do hlavové opěrky, jak je ukázáno na obr. 2.11. Bylo provedeno zatížení opěradla sedadla ve 3 cyklech po sobě, jak je předepsáno normou EHK 17 [39] s rychlostí posuvu  $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ . Na přední a zadní část v rámu, v místech největší koncentrace napětí podle modelové simulace byly umístěny tenzometry. Přední tenzometr (strana k volantů) zaznamenává prodloužení, zadní tenzometr zaznamenává zborcení v zadní části v místě výrazné změny křivosti rámu.



Obr. 2.11 Statické testování rámu automobilové sedačky [41]

### vii. Hlavová a bederní opěrka

Hlavní funkce hlavové opěrky autosedačky je ochránit krk a hlavu případně v nehody. Je řada situací, ve kterých je možné využít opěrku hlavy k relaxaci, např. při jízdě na dálnici nebo při pomalé jízdě v hustém provozu. Hlavová opěrka může zvýšit pocit komfortu zejména při dlouhých cestách. Kromě bezpečnosti a pohodlí je věnována také pozornost otázce zdraví při řízení automobilu. Fyziologická zakřivení páteře by měla mít vhodnou oporu, vzpřímený krk s mírnou lordózou usnadňuje průtok krve vertebrálními tepnami [59]. Nastavení bederní opěrky může ovlivnit funkci vyživování meziobratlových plotének [60]. Návrhem hlavové opěrky s integrovanou opěrou pro oblast krční páteře se zabýval Franz [61]. Z jeho průzkumu vyplývá, že hlavová opěrka by měla být poměrně tuhá, zatímco opora krku velice měkká. Většina respondentů hodnotila přidání krční podpory kladně.



### **viii. Potahy**

Pro potahy automobilových sedaček je obvykle používána tloušťka materiálu 2 – 8 mm, vyšší hodnoty pro luxusnější sedadla. Již delší dobu se pro potah používá vrstvený kompozitní materiál. Pro vrchní vrstvu se používají tkaniny nebo pleteniny převážně z polyesteru. Druhou vrstvu tvoří 3 – 5 mm polyuretanové pěny, třetí vrstvou bývá síťovina z polyesteru nebo polyamidu. Polyuretanová pěna tvoří pojivo mezi první a třetí vrstvou. I zde se v posledních letech hledá alternativa zejména z důvodu omezené prodyšnosti polyuretanové pěny a jejích negativních ekologických dopadů. Jako náhrada polyuretanové pěny pro potah mohou být použity např. netkané 3D textilní materiály. Tyto materiály dostatečně plní požadavky na prodyšnost, tuhost atd., ale z důvodu vysoké ceny se používají pouze pro některé typy luxusních vozidel [62].

## **2.3 Rozbor současných požadavků na mechanické vlastnosti výplňových materiálů**

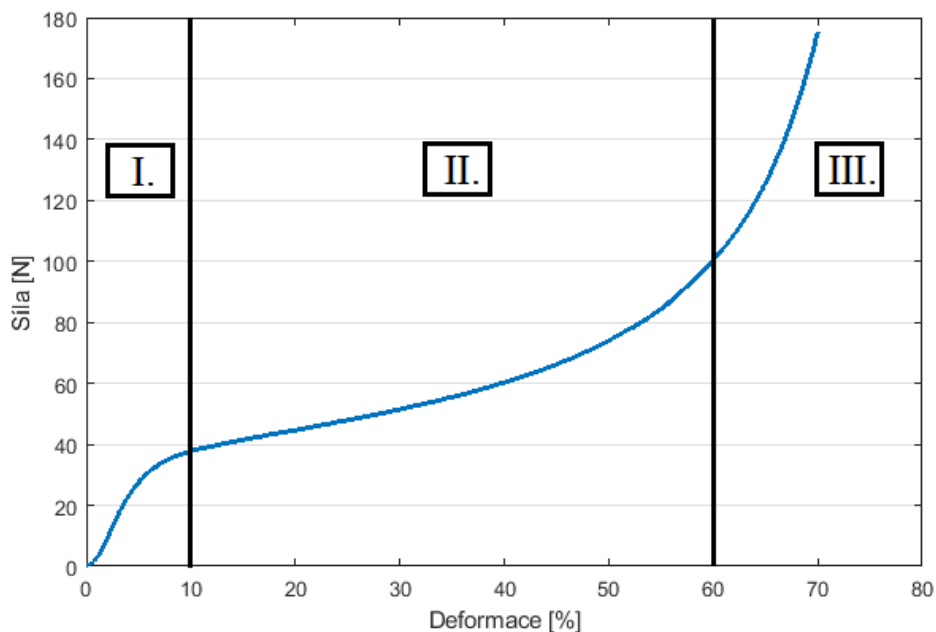
V současné době se používají jako výplňové materiály sedaček polyuretanové pěny (dále jen PU) doplňované o nepolyuretanové materiály, jak uvádí např. Petrů [12]. Dominantní však jsou PU pěny, neboť se používají k výrobě opěr, sedáku, hlavových a loketních opěrek atd. Produkce výrobků z PU pěn je poměrně rychlá a přesná. Dle zkonstruované formy lze dosáhnout rozmanitých tvarů v relativně krátkém čase. Pro výrobu polyuretanové pěny se používá chemická směs izokyanátu a polyolu která při relativně nízkém tlaku zreaguje a vytvoří polyuretan. Pro automobilové sedačky se obvykle používají dva typy izokyanátů, toluendiizokyanát (TDI) a methyldiizokyanát (MDI). Volba jednotlivého typu izokyanátu dle jeho fyzikálních vlastností záleží na požadavcích a očekáváních zákazníků. Při výrobě polyolu jsou přidány katalyzátory, silikony / emulgátory, buněčné aktivátory, zesilující látky a voda [63]. Při produkci PU pěn nevznikají žádné vedlejší látky kromě oxidu uhličitého. Ten je zde naopak potřebný z důvodu vzniku buněčné struktury PU a objevuje se ve formě pórů. Díky oxidu uhličitému získává PU pěna své nedocenitelné vlastnosti a to v oblasti tlumení a pružení. Jedinými tuhými odpady jsou přetoky u forem, odřezky či zmetky. Polyuretanové pěny se liší svými fyzikálními vlastnostmi jako je tvrdost, odolnost proti opakovanému stlačení, pružící a tlumící schopnosti či elasticita. K dosažení požadovaných vlastností dochází sloučením obou složek v požadovaném poměru. Smíchání obou komponent probíhá ve vstříkovací

hlavě a poté je směs nalita do formy. Tento proces musí být co nejrychlejší, po promíchání obou látek dochází k okamžité chemické reakci. Výsledný výrobek může kombinovat různé vlastnosti. Zákazník si může např. zvolit, že okraje výrobku mohou mít jinou tvrdost než střed. Při výrobě sedáků jsou tyto kombinované vlastnosti velmi běžné a žádané [63]. Mechanické vlastnosti PU materiálu výrazně ovlivňují komfort sezení a to jak při statickém, tak i dynamickém zatížení. Jsou závislé na chemickém složení a na vzájemném poměru jednotlivých komponent. Správným poměrem polyolu, izokyanátu a vody dochází k uvolňování oxidu uhličitého, díky němuž se vytváří pěnová struktura. Vznikající polyuretan již během vypěňování začíná tuhnout. Dle chemického složení směsi lze produkovat pěny TDI či MDI. Obě tyto varianty lze vyrábět ve dvou provedeních, s otevřenými či uzavřenými póry. Pro výrobky s otevřenými póry je typické, že povrchová struktura se liší od struktury vnitřní. Povrch je tvořen méně prodyšnou vrstvou, která zčásti brání proudění vzduchu. Vnitřní struktura je tvořena vzájemně propojenými dutinami, které při deformaci hmoty umožňují omezený pohyb vzduchu. Vibroizolační vlastnosti jsou ovlivněny jak obecnými vlastnostmi PU materiálu, tak i dalšími faktory. Mezi ně můžeme zařadit tvar výsledného polotovaru, vložené inzerty (dráty, rám, EPP, atd.), potah a s ním spojené švy. Pružné materiály mají mechanické vlastnosti charakterizované tuhostí  $k$  a tlumením  $\eta$ . Mechanickými vibracemi vstupujícími do automobilové sedačky a jejich analýzou se podrobně zabývají [1], [56]. Zkoumají reakci lidského těla na mechanické vibrace a jejich dopad na zdravotní stav.

### 2.3.1 Vlastnosti PU pěn

PU pěna je charakteristická viskoelastickými vlastnostmi. To znamená, že kombinuje vlastnosti pevné a kapalné látky. Elastické vlastnosti PU pěn převládají u krátkodobého zatěžování. Naopak při dlouhodobém zatěžování je chování PU pěny podobné chování viskózní kapaliny. Statické vlastnosti závisí na obou těchto chováních [42]. PU materiál je charakteristický svým silně nelineárním chováním. Při stlačování vzorku je silová odezva závislá na velikosti i rychlosti deformace. Hysterezní křivka je tvořena závislostí napětí na deformaci při stlačování a odlehčování materiálu. Při stlačování dochází k deformaci stěn buněk pěny a při následném odlehčení k obnovení původního tvaru. Při dlouhodobém zatěžování dochází v důsledku viskózního chování ke dvěma význačným dějům. Při trvalé deformaci dochází k deformaci pórů, které nejsou schopny regenerovat dostatečně rychle. Tento jev je obecně znám jako relaxace materiálu.

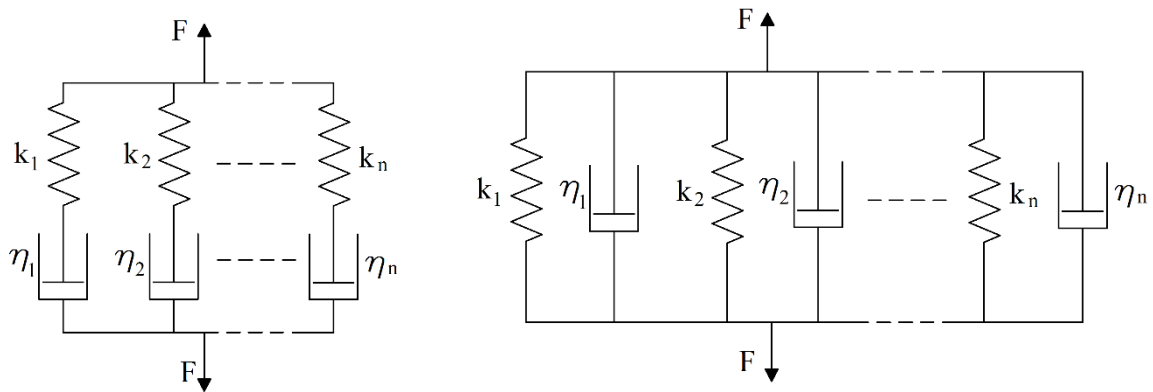
Při trvalém zatížení pěny konstantním tlakem dochází k rovnoměrnému zvýšení deformace a tím k poklesu napětí. Časová deformace v důsledku konstantního napětí se nazývá tečení. Jde o stav, kdy je pěna trvale zatěžována stálým napětím a díky tomu dochází k rovnoměrnému zvyšování deformace v čase. Z důvodu sestavení materiálového modelu pro statické namáhání konstantním napětím je nutno sledovat jak relaxaci napětí, tak i tečení PU materiálu.



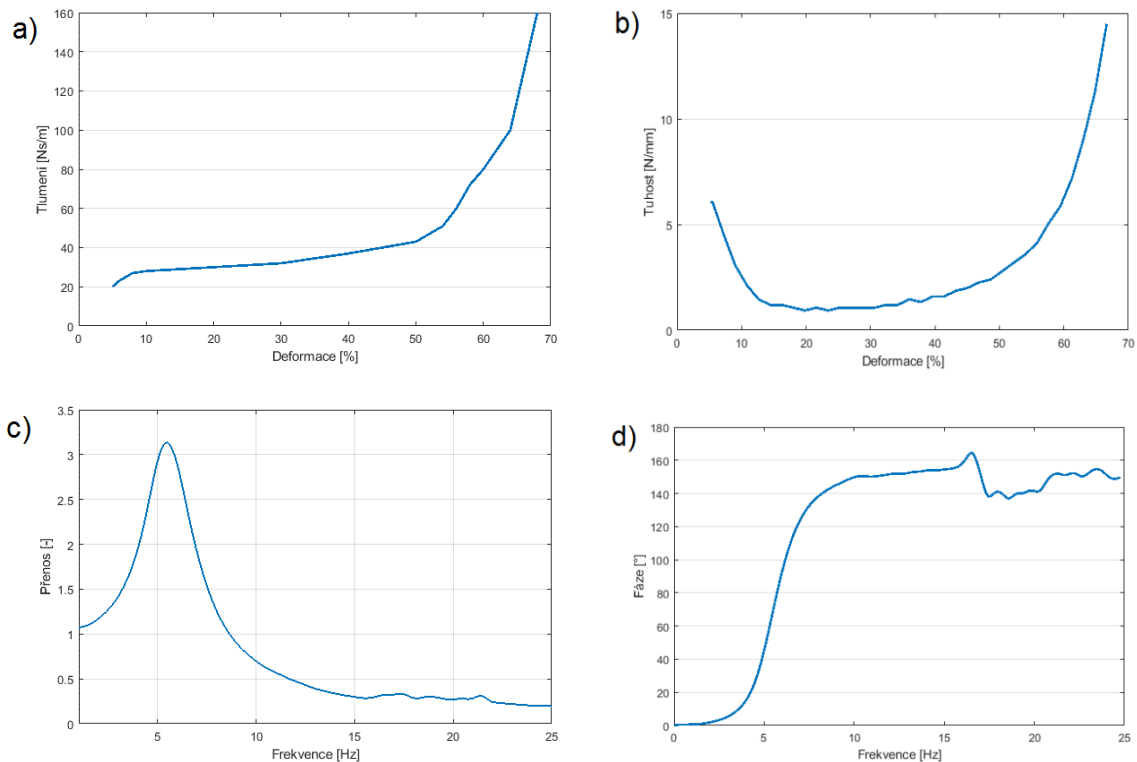
**Obr. 2.12** Závislost napětí na deformaci PU vzorku – rozdělení na 3 oblasti

Průběh silové odezvy v důsledku působení zvyšující se síly je znázorněn na obr. 2.12. Charakteristický průběh silové odezvy je ukázán na vzorku PU pěny o velikosti 100x100x50 mm. Typicky se křivka závislosti silové odezvy na deformaci dělí na tři oblasti. Oblast I. se vyznačuje mírnou deformací pěny 5-10 %. Je zde téměř lineární náběh z nulových hodnot s vyšší strmostí (tuhost). Tato oblast vykazuje vysokou elasticitu a vysokou místní tuhost. Oblast II. je tzv. oblast jízdního komfortu. Deformace pěny se pohybuje mezi 10 a 60 %. Opět je zde téměř lineární nárůst síly s nejnižší strmostí. Typický pro tuto oblast je efekt odpružení s vysokým tlumením a nízkou tuhostí. Oblast III. je charakteristická deformací pěny zhruba 60 % a víc. Vyznačuje se prudkým zvýšením napětí. Má nelineární průběh a razantně roste strmost. Dochází k viditelnému zhutnění, resp. objemová hmotnost je lineární funkcí stlačení pěny a zvýšení tuhosti. V této oblasti ztrácí pěna své vlastnosti. Díky zvyšujícímu se silovému účinku pěna tuhne a přibližuje se svými vlastnostmi k tuhé desce. Díky viskoelastickému chování PU materiálu je nutné vhodným způsobem charakterizovat a modelovat toto chování. Velké množství látek nelze

prostřednictvím jednoduchých modelů popsat vůbec. Takové látky je nutno popisovat obecnými reologickými modely. Reologie se zabývá studiem deformací hmot a hledá vzájemné vztahy mezi napětím, deformací a rychlostí deformace pro různé druhy materiálů. Vytváří se proto reologické modely, pomocí nichž lze popsat chování různých materiálů a látek. K popisu látek s viskózním chováním slouží model Newtonovské látky. Při popisu elastických materiálů lze využít model Hookovské látky.



**Obr. 2.13** Maxwellův model (vlevo), Kelvinův model (vpravo)



**Obr. 2.14** Charakteristiky PU pěny a) průběh koeficientu tlumení, b) průběh koeficientu tuhosti, c) přenosová charakteristika, d) fázová charakteristika

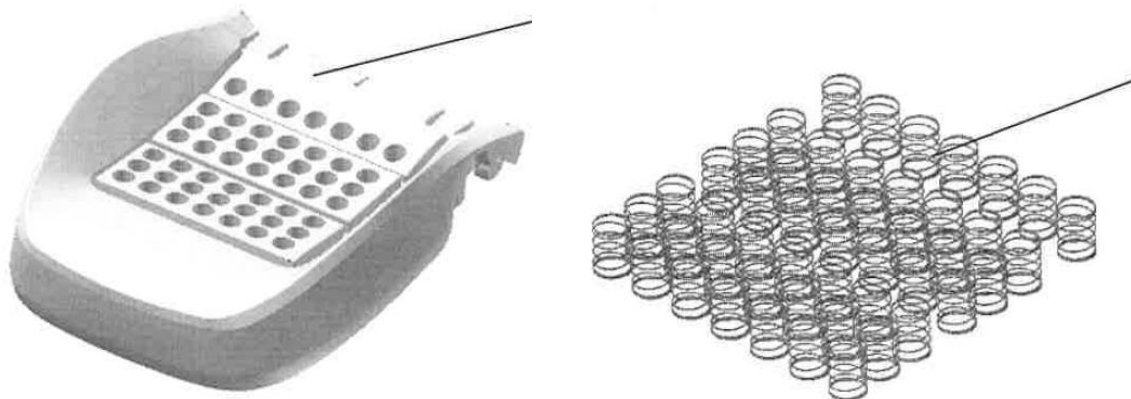
Při vytváření obecného reologického modelu se nejčastěji omezujeme na kombinaci Newtonova viskózního a Hookeova elastického členu. Chování PU materiálu leží na

hranici mezi kapalnou a pevnou látkou. Proto se pro jeho reologický popis používá kombinace obou látek. Spojování jednotlivých členů obecného reologického modelu lze provádět sériově či paralelně. Tzv. Maxwellův reologický model (obr. 2.13) spojuje sériově newtonské viskózní kapaliny a Hookovské elastické látky. Kelvinův reologický model naopak spojuje paralelně Hookovské elastické látky a Newtonské viskózní látky. Byl sestaven reologický Kelvinův model, prostřednictvím kterého je možné zjistit nejen průběh tuhostního koeficientu  $k$  a koeficientu tlumení  $\eta$  (obr. 2.14 a, b), ale také fázové a přenosové charakteristiky (obr. 2.14 b, c). Díky modelu lze z průběhu přenosové charakteristiky určit vlastní (rezonanční) frekvenci. Rezonanční frekvence odpovídá špičce amplitudové závislosti. Samotný koeficient tlumení je možné určit ze znalosti průběhu amplitudové frekvenční charakteristiky a koeficient tuhosti je přímo úměrný derivaci průběhu síly na deformaci.

### 2.3.2 Možnosti náhrady PU pěny

Fliegel a Martonka v užitém vzoru [64] popisují řešení sedáku automobilové sedačky. Uvádějí, že běžně vyráběná komfortní vrstva sedáku je tvořena polyuretanovou pěnou. Je tedy tvořen jedním materiálem se stejnými vlastnostmi v celém jeho objemu a nemůže zohledňovat hmotnost uživatele nebo různé zatížení. V užitém vzoru je navržena výplň sedáku skládající se ze dvou částí. První částí je polyuretanový díl opatřený válcovými otvory (obr. 2.15 a). Druhou část tvoří tlačné vinuté pružiny (obr. 2.15 b). Pružiny mohou mít rozdílné vlastnosti v různých oblastech sedáku a jsou voleny v závislosti na individuálním požadavku uživatele. Sada pružin je snadno vyměnitelná. Kamp [65] popisuje prototyp odlehčené sedačky (obr. 2.16), jejíž hmotnost je snížena přibližně o 50 % oproti standardnímu typu. Tvar sedačky byl navržen tak, aby co nejlépe kopíroval lidské tělo, tloušťka komfortní vrstvy byla snížena na 25 mm na sedáku i na opěráku. Hodnocení sedačky bylo prováděno vzorkem 21 osob s různými tělesnými proporcemi. Porovnávány byly tři typy sedaček – sportovnější, luxusnější a odlehčená. Výsledky průzkumu ukazují, že odlehčená sedačka byla hodnocena jen o málo hůře v porovnání se standardními. To by se dalo považovat za značný úspěch vzhledem k výrazné úspoře hmotnosti. Je nutné však poznamenat, že průzkum byl prováděn v laboratoři za statických podmínek. Dalším omezením je to, že účastníci seděli na každé ze sedaček pouze několik minut a sedačka neumožňovala její nastavení. Na důležitost těchto aspektů upozorňuje Zenk [66], který ukazuje významnou souvislost mezi dobou strávenou na sedačce a subjektivním

hodnocením komfortu. Možnost nastavení sedadla má na kvalitu sezení také zásadní vliv, jak uvádí např. [29]. Tato sedačka by zřejmě uspěla v prvním kontaktu s uživatelem, ale při dlouhodobějším používání by pravděpodobně byla hodnocena výrazně hůře.



**Obr. 2.15** a) Pěnový sedák s otvory, b) sada cylindrických tlačných pružin

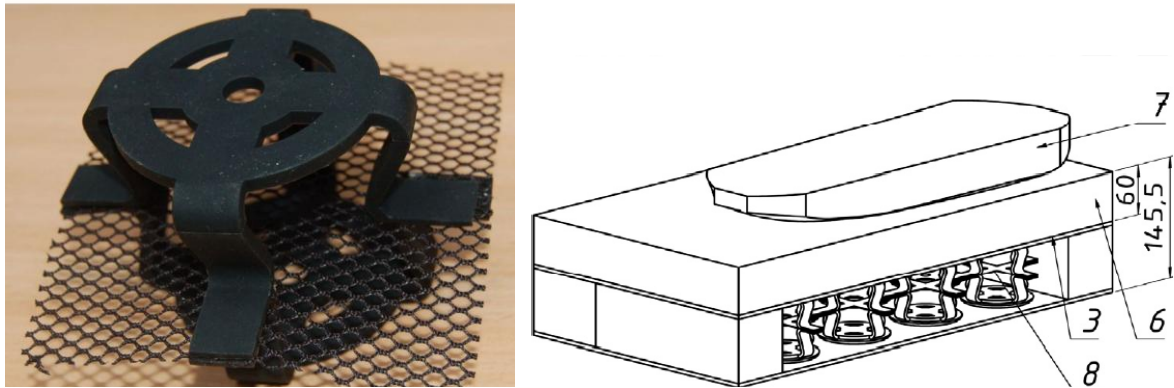


**Obr. 2.16** Koncept sedačky založené na tvaru lidského těla.

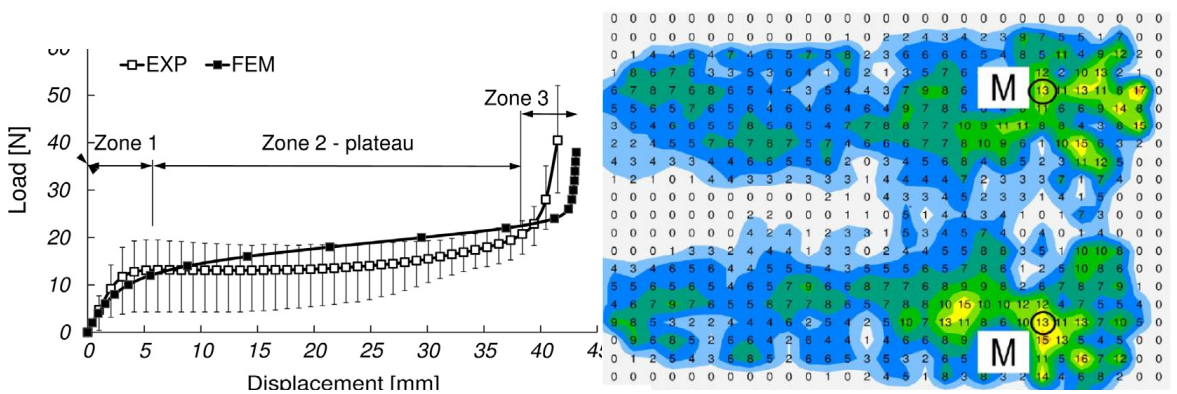
Smardzewski [67] ve své práci zkoumá možnosti použití auxetického materiálu v sedáku. Vědecké zkoumání auxetických struktur bylo dosud zaměřené zejména na analýzy na molekulární a makroskopické úrovni a jen málo studií se týkalo popisů auxetických modelů, které by mohly najít uplatnění v předmětech každodenního použití. Auxetický materiál je materiál, který má záporné Poissonovo číslo. Pokud je tedy tento materiál natahován (stlačován) v jednom směru, roztahuje (smršťuje) se i ve směru k němu kolmém. Záporného Poissonova čísla je možné v materiálu dosáhnout poměrně složitou vnitřní strukturou, kdy při deformaci dochází k natáčení prvků struktury. Často jde o struktury složené z tuhých prvků propojených poddajnými prvky. Obecně je přijímán fakt,

že pružinové systémy jsou trvanlivější a uživatelsky příjemnější než pěnové systémy. Podle výsledků testování Jasinska [68] se auxetické pružiny ukazují být velice vhodné při použití pro sezení. Jejich statické charakteristiky při stlačování jsou velice podobné standardní polyuretanové pěně. Díky jejich zápornému Poissonovu číslu dochází k lepšímu rozložení kontaktního tlaku a tím i pocitu většího pohodlí. Obecně platí dle Wang [69], že měkký sedák pomáhá snížit kontaktní tlak, nicméně příliš měkký sedák se může propadnout a způsobit v důsledku zvýšení kontaktního tlaku, (pěna pohybuje ve III. oblasti s vysokou tuhostí), případně dojde ke kontaktu s rámem sedačky nebo jinou pevnou částí automobilu. Materiál se záporným Poissonovým číslem určitou měrou snižuje špičky kontaktního tlaku, pokud je smykový modul konstantní. V [70] jsou popsány auxetické pružiny vyrobené ze silikonu o rozměrech 70x110x110 mm. Na obr. 2.17 a) jsou zobrazeny jednotlivé pružiny se skládající ze dvou stejných polovin. Mezi poloviny pružin byla vlepena neflexibilní síťka, aby byla umožněna deformace ramen pružiny pouze směrem dovnitř. Dále byly na vrchní a spodní část jednotlivých pružin nasazeny tuhé polyamidové krytky tloušťky 5 mm, zabraňující prohnutí vrchní a spodní části pružiny. Takto byla vytvořena sestava 16 pružin obr. 2.17 b) z boční a vrchní části byly přidány bloky z polyuretanové pěny pro rovnoměrnější rozložení kontaktního tlaku. U vozidel používaných pro pracovní účely, jako jsou např. autobusy, nákladní vozidla, traktory, stavební stroje, se často věnuje odpružení sedadla řidiče větší pozornost oproti osobním vozidlům vzhledem k předpokládané době, kterou řidič ve vozidle obvykle tráví. Obecně se systémy odpružení sedadel dělí do třech skupin, pasivní, semi aktivní a aktivní. Pasivní systémy obvykle umožňují manuálně změnit vlastní frekvenci kmitání, případně upravit velikost tlumícího účinku kmitající soustavy [71]. Semi aktivní systémy umožňují plynule měnit charakter tlumení na základě aktuálních provozních podmínek. Zajímavým řešením jsou tlumiče využívající tzv. inteligentní tekutiny elektoreologické nebo magnetoreologické [72]. Jedná se o suspenze mikročástic s magnetickými nebo dielektrickými vlastnostmi ve vhodné nosné kapalině. Jejich největší výhodou je schopnost měnit viskozitu v širokém rozsahu ve zlomcích sekund. V aktivních systémech sledují snímače vstupní i výstupní hodnoty polohy, rychlosti a zrychlení. Následně se data vyhodnocují a odesílají do aktuátorů. Je nutná zpětná vazba, aby mohl systém dynamicky kompenzovat náhlé změny [73]. V [74] je navržen a testován inovativní nízkonákladový systém aktivního odpružení sedadla sestávající ze dvou servomotorů s redukční převodovkou obr. 2.19. Tření vznikající ve dvou převodovkách umožňuje disipaci energie.

System byl při testování buzen nízkými frekvencemi v rozsahu 1 - 4,5Hz na platformě se šesti stupni volnosti. Analýza výsledků dle ISO 2631-1 prokázala vysokou efektivitu tohoto systému, subjektivně bylo sezení hodnoceno výrazně lépe než s odpružením pasivním. Na takto vytvořeném sedáku byla provedena řada mechanických testů. Statická zatěžovací charakteristika a distribuce kontaktního tlaku obr. 2.18 ukazují, že je takto sestavený sedák vhodný pro dlouhodobé sezení.



Obr. 2.17 a) Silikonová auxetická pružina b) Sestava sedáku s pružinami



Obr. 2.18 Průběh zatěžování a kontaktní tlaky změřené na sedáku s auxetickými pružinami



Obr. 2.19 Systém aktivního tlumení



Tyto aktivní systémy se obvykle využívají ve speciálních strojích zejména v těžebním průmyslu, z důvodu vysoké ceny, zástavbových rozměrů a energetické náročnosti. Jak ukazuje Donghong [74] lze sestavit aktivní tlumení při přijatelných nákladech. Lze předpokládat, že s vývojem elektroniky se cena i zástavbové rozměry sníží a bude možné takovýto systém využít i v běžných vozidlech.

### **2.3.2.1 Pěny na přírodní bázi**

Vývoji nových druhů polyolů založených na přírodní bázi je věnováno velké úsilí z důvodu snížení závislosti na petrochemickém průmyslu [75]. V posledních letech byly vyrobeny polyuretanové pěny nejen z mnoha druhů rostlinných olejů jako sojový, palmový, karanja, řepkový, ricinový, ale i z bioodpadů jako bambus, kukuřice, borová kůra, kraft lignin a cukrové třtiny [76]. Je popsáno pět různých metod, které se obvykle používají k výrobě přírodních polyolů [77], [78]. V komerčních aplikacích mohou být použity přírodní polyoly jako úplná nebo částečná náhrada polyolů na ropné bázi [79], které tvoří největší objem polyolů používaných pro výrobu polyuretanových pěn. Přes slibný vývoj v oblasti vývoje přírodních olejů a jejich derivátů, jejich výroba stále čelí technickým problémům, které zvyšují náklady, což brání širokému rozšíření jejich použití při výrobě flexibilních pěn. Budoucí snahy v této oblasti mohou být velmi zajímavé. Surový glycerol jako vedlejší produkt výroby biopaliv je velice slibnou obnovitelnou surovinou pro výrobu polyolů. Díky různorodému složení glycerolu je obtížné získávat polyoly s konzistentní kvalitou a vlastnostmi. Použití jednoho typu mastné kyseliny a vývoj v oblasti genetického inženýrství by měl vést k výrobě pěn s homogennější strukturou a konzistentními vlastnostmi [80]. V současné době je výroba polyuretanových pěn na přírodní bázi nákladnější než výroba pěny z produktů petrochemického průmyslu [81]. S pokračujícím technologickým vývojem a nevyhnutelným vyčerpáním zásob ropy se zdá být výroba pěn z rostlinných složek zřejmým budoucím řešením.

### **2.3.2.2 Kompozitní pěny**

Mnoho studií popisuje použití přírodních vláken jako výztuže v polyuretanových pěnách. Gu [82] popisuje vliv přidání celulózových vláken jako plniva do tuhých i flexibilních polyuretanových pěn. Přidání vláken mělo za následek zvýšení pevnosti v tahu a tlaku u tuhé pěny a zvýšení tuhosti flexibilní pěny. Chan [83] zkoumá kompozitní pěny s kokosovými vlákny s ohledem na tlumení vibrací. Po přidání 2,5 % kokosových vláken

do flexibilní polyuretanové pěny bylo zjištěno zvýšení tlumících vlastností polyuretanové pěny, ale rezonanční frekvence se posunula k vyšším hodnotám v porovnání s čistou pěnou. Banik [84] stanovil účinky různých celulóзовých vláknitých materiálů na průběh tvorby pěnové struktury. Přídavek vláken v řádu jednotek procent měl významný vliv na strukturu i výsledné vlastnosti polyuretanové pěny. Chao [85] popisuje výrobu vzorků pěny s přídavkem odpadního glycerolu z výroby biopaliv a travních vláken. Došel k závěrům, že se zvyšujícím se množstvím vláken klesá celková hustota kompozitní pěny a zároveň klesá tuhost.

### 2.3.2.3 Shrnutí možné náhrady PU pěny

Z uvedené rešerše vyplývá, že náhrada pěn je reálně proveditelná a technicky dosažitelná. Na příkladech byly ukázány různé směry, kterými se náhrada PU pěn a zlepšování jejich charakteristik může ubírat. Je nutné se zmínit o faktu, který vývoj náhrad pěn do značné míry nepodporuje. Jedná se především o malý tlak na využití pěn po ukončení životního cyklu jinou cestou, než je energetické využití (spalování). Pěny je samozřejmě možné recyklovat a to např. drcením a následným přidáním do nově vznikající pěny, ale také chemickým či termickým rozkladem na jednotlivé složky PU pěny. Tyto způsoby recyklace jsou však ekonomicky značně méně výhodné než energetické využití a touto cestou připravená PU pěna obvykle vykazuje horší charakteristiky. Je nutné si uvědomit, že náhrada složek pěny přírodními látkami může být problematická z několika důvodů. Studie ukázaly, že kvalitativně vznikají méně hodnotné látky a výsledkem jsou pěny o nižší kvalitě. Výrobní cena je vyšší, protože samotné přípravě polyolu nebo diizokynátu poměrně náročným chemickým zpracováním předchází pěstování vhodné technické plodiny. Náklady na kultivaci půdy, zavlažování, pesticidy a herbicidy, ochranu během růstu a zrání a následnou sklizeň jsou značné a výrazně převyšují náklady na těžbu ropy. Nelze přehlédnout ani vliv technických plodin jako krajinnotvorného prvku, zejména podílu na erozi a degradaci půdy, neschopnosti zachytu vláhy apod. Náhrada pěny pomocí vhodně předepjaté textilie napodobující houpací síť představuje zajímavou alternativu. Toto řešení přináší excelentní prodyšnost, redukci kontaktního tlaku a významnou úsporu hmotnosti. Problémem je však zajištění elastických vlastností textilie při opakovaném a dlouhodobém zatížení a bezpečnostní rizika [86], [87]. Její použití není vhodné pro všechny kategorie automobilů, zejména vyšších tříd, protože tento způsob řešení neumožňuje snadnou instalaci klimatizačních či bezpečnostních prvků. Přetrvávající

použití pěny se tedy zdá, zejména z ekonomických důvodů jako řešení, které nebude-li legislativně omezeno, bude používáno i v následujících desetiletích. Pro úsporu spotřeby ropných produktů a snižování hmotnosti je však **velmi vhodné pěny kombinovat s dalšími látkami tak, aby synergickým efektem byly maximalizovány požadované vlastnosti**. Je tedy vhodné se zabývat návrhem a vývojem a zejména teoretickým popisem vlastností nízkohustotních kompozitních pěn.

## 2.4 Závěr kapitoly

Kapitola 2. se podrobně zabývala relevantními aspekty, které mají významný vliv na výslednou konstrukci výplně automobilových sedaček. Byly popsány současné trendy vývoje výplní automobilových sedaček, zejména v souvislosti s požadavky kladenými na výplňové materiály sedaček a popsány požadavky na konstrukční řešení sedaček pro dosažení optimálního poměru komfortu a bezpečnosti. Kapitola obsahuje postupy testování pro dosažení požadavků včetně příslušných norem a předpisů, popis problematiky zatěžování s ohledem na populační vzorek a následný výběr silových a momentových zatížení. Byly zmíněny subjektivní složky hodnocení kvality sedaček z pohledu komfortu, kdy bylo konstatováno, že neexistuje takové řešení sedačky, které by reprezentovalo ideální řešení pro celý populační vzorek. V kapitole je proveden výpočet zatěžovacích sil na základě požadavků norem, které mají být při testování sedaček aplikovány a to jak pro statické, tak pro dynamické děje. Část kapitoly se zabývá výrobou a vlastnostmi flexibilních pěn. Zmíněny jsou jak výhody, tak i nevýhody pěn z pohledu zatěžování stlačováním. Pro vhodný popis chování pěn jsou ukázány možnosti využití reologických modelů a závěr kapitoly předkládá možné směry v oblasti náhrady pěn nebo jejich složek. Závěrem této kapitoly nechť je konstatováno, že polyuretanová pěna je a zřejmě bude významným a používaným materiálem pro výrobu výplní automobilových sedaček, avšak se vzrůstajícími nároky na recyklaci, snižování ceny a úsporu hmotnosti a materiálu bude důraz kladen na kombinaci pěn s dalšími podpůrnými materiály, které umožní tvorbu nízkohustotních kompozitních pěn s vysokou přidanou hodnotou.

### 3. Cíle disertační práce

Na základě poznatků z dané problematiky a rozboru současného stavu výzkumu a vývoje výplní pro automobilové sedačky byly stanoveny hlavní cíle disertační práce. Tím je návrh a realizace funkčního vzorku nízkohustotní kompozitní pěny vyztužené přírodními vlákny pro výplně automobilových sedaček při zachování stejných nebo lepších mechanických vlastností.

#### **K dosažení tohoto cíle budou provedeny:**

- *Stanovení vybraných fyzikálních vlastností vzorků nízkohustotních kompozitních pěn s přírodními vlákny aplikovatelných pro automobilové sedačky*
  - Návrh, výroba a analýzy vybraných mechanických vlastností vzorků z polyuretanové pěny a vzorků z nízkohustotní kompozitní pěny s přírodními vlákny
  - Provedou se analýzy a rozborů struktury vybraných vzorků nízkohustotních pěn vyplněných přírodními vlákny v porovnání s polyuretanovou pěnou.
  - Provede se stanovení mechanických vlastností vybraných vzorků nízkohustotních pěn vyplněných přírodními vlákny (stanovení odporu proti stlačování, relaxace, tuhost, tlumení) v porovnání s polyuretanovou pěnou.
  - Budou sestaveny modely pro stanovení mechanických vlastností pro studii a popis charakteru napětí, deformace, rozložení kontaktního tlaku pro vzorky nízkohustotních pěn vyplněných přírodními vlákny v porovnání s polyuretanovou pěnou.
  - Provede se porovnání a verifikace numerických modelů s experimenty.

- *Konstrukční návrh funkčního vzorku výplně automobilové sedačky z nízkohustotní kompozitní pěny s přírodními vlákny aplikovatelných pro automobilové sedačky*
  - Budou provedeny numerické simulace pro návrh a optimalizace konstrukčního řešení funkčního vzorku výplně automobilové sedačky z nízkohustotní kompozitní pěny s přírodními vlákny.
  - Provede se realizace funkčního vzorku výplně automobilové sedačky z nízkohustotní kompozitní pěny s přírodními vlákny.
  - Provede se návrh a realizace modernizovaných testovacích zařízení pro statické a dynamické zatěžování výplně sedáku i celé automobilové sedačky.
  - Provede se experimentální porovnání funkčního vzorku výplně automobilové sedačky z kompozitní pěny vyztužené přírodními vlákny s výplní automobilové sedačky z PU pěny.

Výsledkem disertační práce bude **funkční vzorek automobilového sedáku s nízkohustotní kompozitní pěnou s přírodními vlákny**, který bude vykazovat kvalitativně srovnatelné či lepší vybrané parametry kvality sezení v porovnání se současným řešením.

## **4. Stanovení vybraných fyzikálních vlastností vzorků nízkohustotních kompozitních pěn s přírodními vlákny**

V kapitole 4 se provedly analýzy a rozboru struktury vzorků nízkohustotních kompozitních pěn vyplněných přírodními vlákny. Dále byly stanoveny mechanické vlastnosti vzorků kompozitních pěn tj. studie odporu vůči cyklickému stlačení a relaxaci materiálu a sestaveny matematické modely prostřednictvím metody konečných prvků. MKP modely byly sestaveny jak pro vzorky PU pěny, tak pro vzorky nízkohustotní pěny s přírodními vlákny. Na závěr byly modelové analýzy porovnány s experimenty a shrnuty jejich charakteristické vlastnosti pro aplikace do výplně automobilových sedaček.

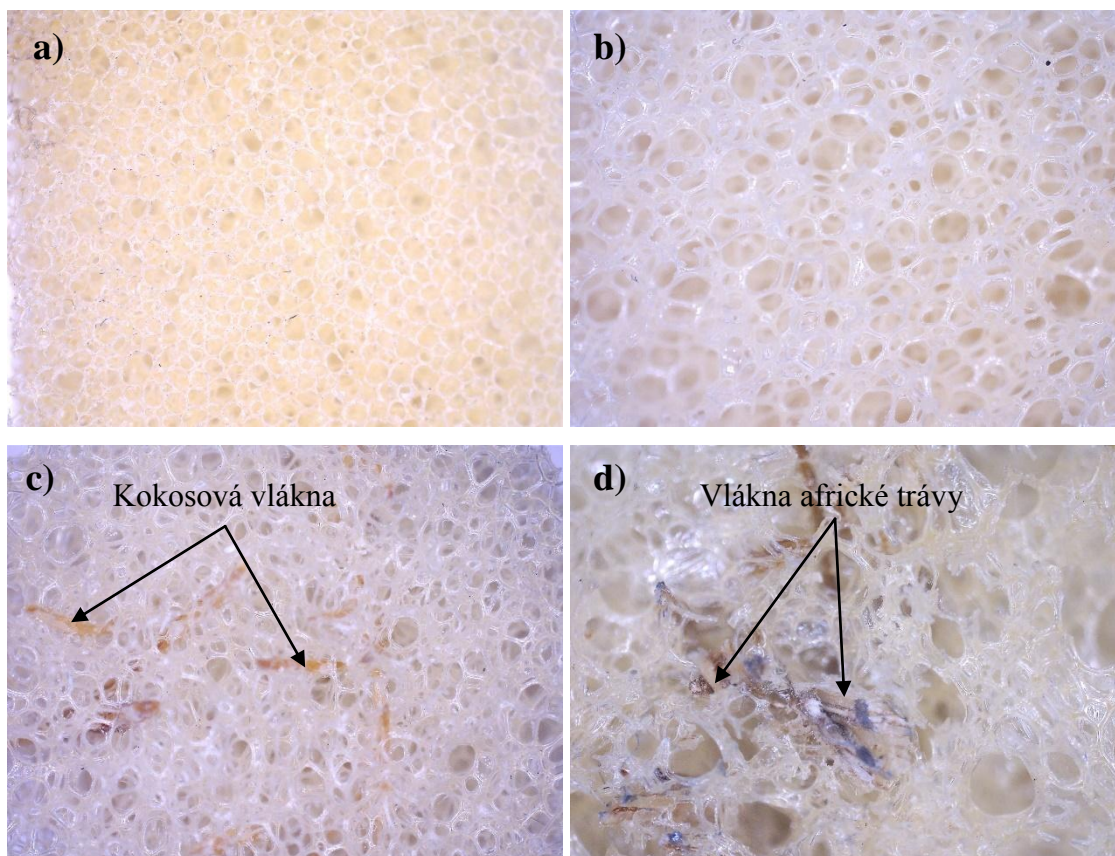
### **4.1 Analýzy a rozboru struktury vzorků nízkohustotních kompozitních pěn s přírodními vlákny**

Byly provedeny řady analýz a rozborů vyrobených vzorků. Vzorky byly analyzovány při standardní teplotě  $22\pm 2^\circ\text{C}$ . Pro studii struktury byly použity mikroskopické a makroskopické snímky struktury<sup>(3)</sup>. Makroskopické snímky byly pořízeny pomocí zařízení DigiMicro. Na obr. 4.1 je zobrazen příklad struktury čisté pěny a pěny s vlákny. Na obr. 4.2 jsou uvedeny makroskopické snímky kokosových vláken a vláken africké trávy. Mikroskopické snímky testovaného vzorku PU pěny byly získány pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu TESCAN VEGA 3, který lze použít až pro 50 000násobné zvětšení (obr. 4.4). Vybrané vzorky pro elektronovou mikroskopii byly nejprve opatřeny tenkou vrstvou zlata obr. 4.3 a) pomocí naprašovačky Q150R ES obr. 4.3 b) pro zajištění odpovídající vodivosti, která je nutná pro získání kvalitních snímků nevodivých materiálů. Obr. 4.5 zobrazuje strukturu čisté polyuretanové pěny. Obr. 4.6 ukazuje strukturu kompozitní polyuretanové pěny s kokosovými vlákny. Na obr. 4.6 je detailně zobrazeno jedno kokosové vlákno o průměru přibližně 0,5 mm. Můžeme zde vidět poškození vlákna, kdy je oddělená jeho povrchová část. K tomuto poškození došlo pravděpodobně při separaci vzorku pro mikroskopii. Na oddělené povrchové vrstvě můžeme pozorovat dobré spojení polyuretanu s kokosovým vláknem. Na obr. 4.7 a) je vidět struktura kompozitní polyuretanové pěny s vlákny z africké trávy, na obr. 4.7 b) je zobrazen detail vlákna africké trávy, je zde vidět dobré propojení polyuretanu s vláknem. Na obr. 4.8 jsou

---

<sup>(3)</sup> Pro detailnější rozboru struktury vzorků lze využít i nemikroskopické metody: např. měření densitometrické, rentgenografické

zobrazeny distribuce průměrů vláken ve vzorcích kokosových vláken a vláken africké trávy. Distribuce byla určena na vzorku 100 náhodně vybraných vláken. Parametrické grafy na obr. 4.9 ukazují závislost měrné hmotnosti kompozitní pěny na zaplnění a hmotnostním podílu vláken.



**Obr. 4.1** Snímky struktury polyuretanové pěny a) vnější stavba (nízkoprodyšný obal) b) vnitřní stavba c) polyuretanová pěna s kokosovými vlákny d) polyuretanová pěna s vlákny africké trávy



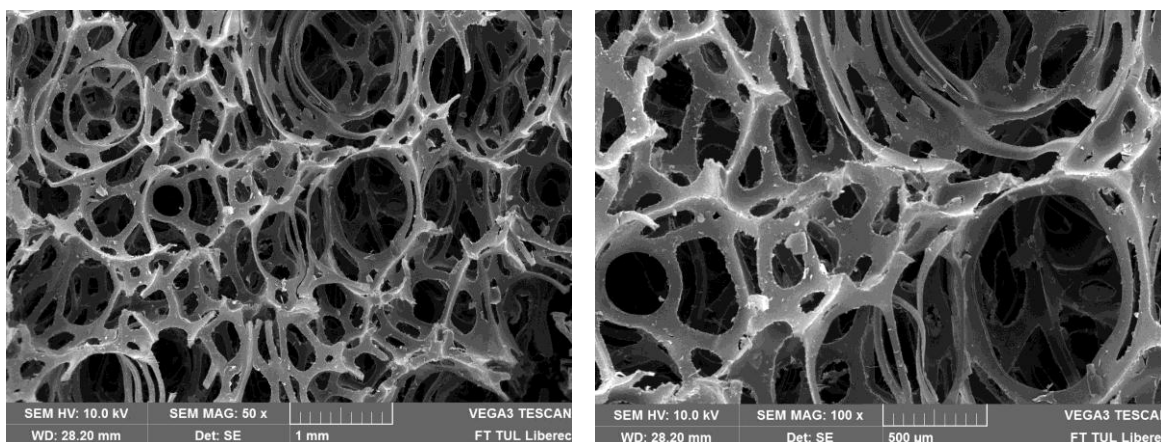
**Obr. 4.2** Snímky vláken a) kokosová vlákna, b) vlákna africké trávy



**Obr. 4.3** a) Naprašovačka Q150R ES, b) Vzorky s nanesenou vrstvou zlata

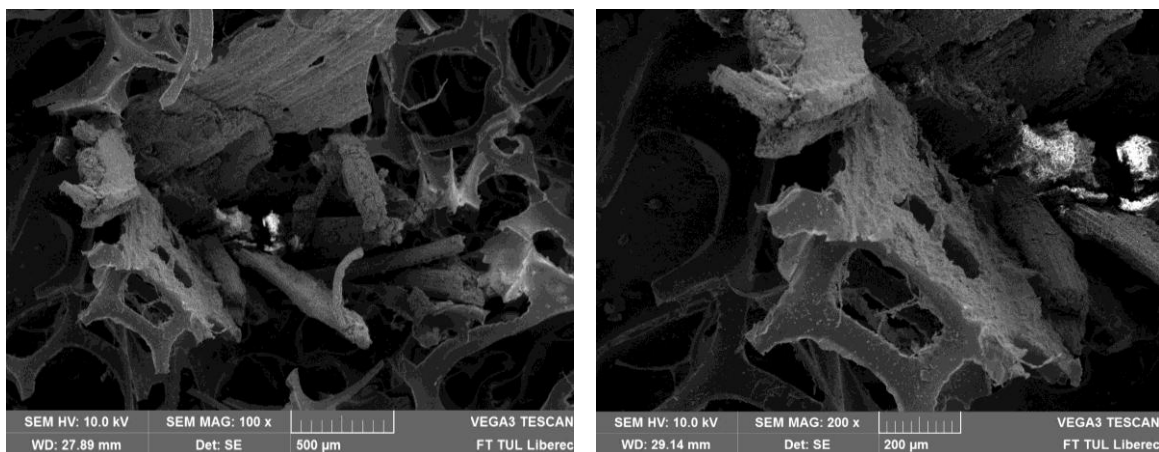


**Obr. 4.4** Rastrovací elektronový mikroskop TESCAN VEGA 3

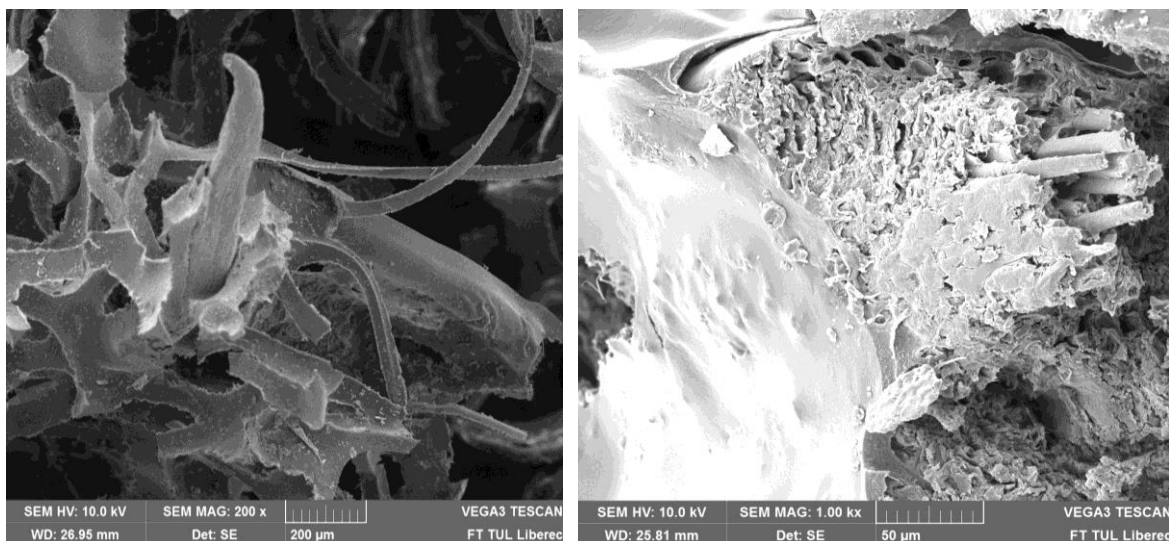


**Obr. 4.5** Snímky struktury čisté polyuretanové pěny

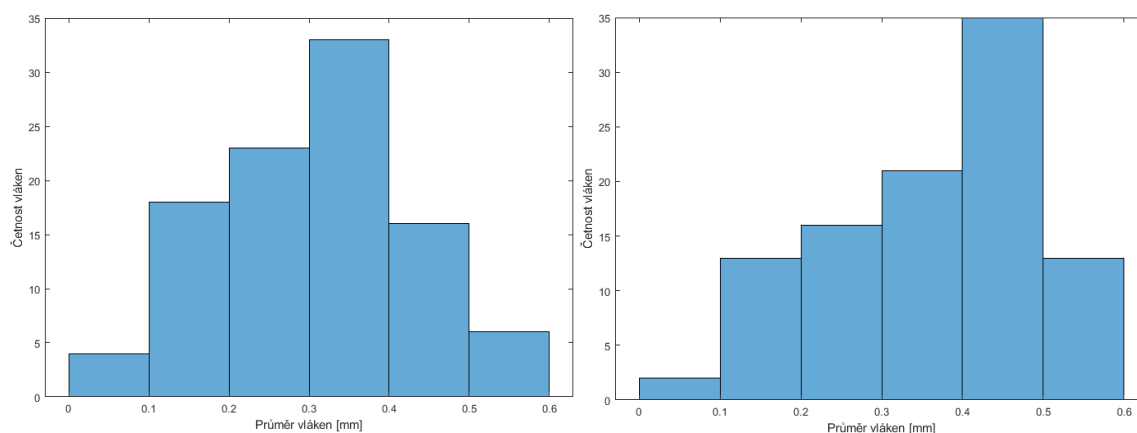




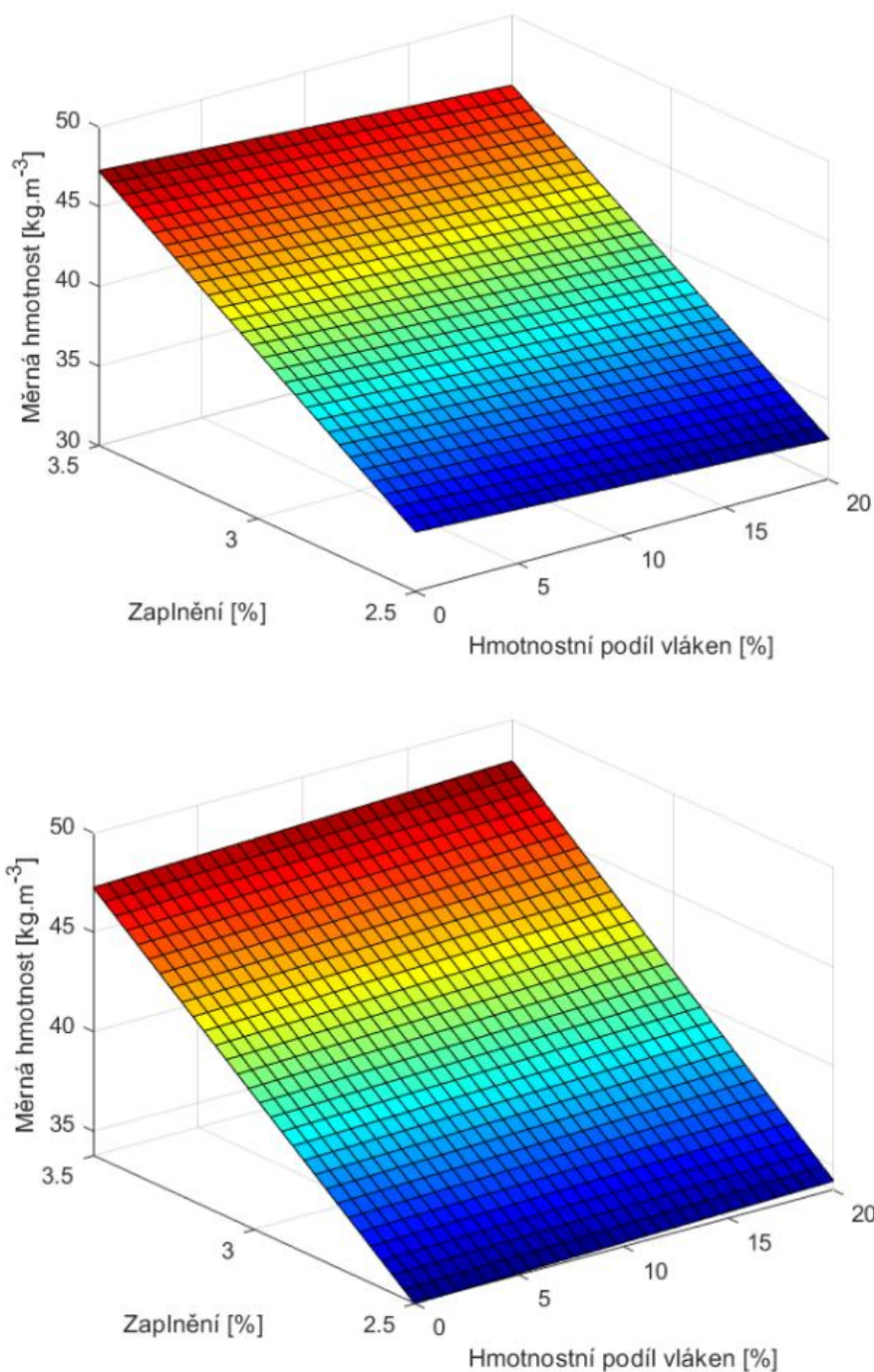
**Obr. 4.6** Snímky struktury polyuretanové pěny s kokosovými vlákny a) zvětšení 100 x, b) zvětšení 200 x



**Obr. 4.7** Snímky struktury polyuretanové pěny s vlákny africké trávy a) zvětšení 200 x, b) zvětšení 1000 x



**Obr. 4.8** Distribuce průměrů vláken a) kokosová vlákna, b) vlákna africké trávy



**Obr. 4.9** Měrná hmotnost kompozitní pěny v závislosti na podílu vláken a zaplnění:  
a) kokosová vlákna, b) vlákna africké trávy

## 4.2 Stanovení mechanických vlastností vzorků kompozitních pěn

Byly testovány vzorky třech materiálů: čisté polyuretanové pěny (označení A), kompozitní polyuretanové pěny s 5 hm. % kokosových vláken (označení B) a kompozitní polyuretanové pěny s 5 hm. % vláken africké trávy (označení C), od každého typu bylo

vyrobena a testováno 5 kusů vzorků. Byly vyrobeny vzorky o rozměrech cca 350x350x108 mm (dáno rozměry formy), které byly následně rozřezány na vzorky o rozměrech 100x100x108 mm. Výška vzorku nebyla upravena z důvodu zachování struktury, která se mírně odlišuje v blízkosti kontaktní plochy s formou. Charakteristickým parametrem pěnových materiálů je objemové zaplnění:

$$\psi = \frac{V_{pu} + V_{vl}}{V_{vz}} \quad (4.1)$$

Kde  $\psi$  [-] je objemové zaplnění pěnového materiálu,  $V_{pu}$  [ $m^3$ ] je objem polyuretanu,  $V_{vl}$  [ $m^3$ ] je objem vláken a  $V_{vz}$  [ $m^3$ ] je objem vzduchu. Výsledky rozboru vzorků jsou uvedeny v tab. 4.1.

**Tab. 4.1** Parametry testovaných vzorků.

Označení vzorku	Rozměry [mm]			Objem [ $dm^3$ ]	Hmotnost [g]	Měrná hmotnost [ $kg \cdot m^{-3}$ ]	Zaplnění [%]	Měrná hmotnost vláken [ $kg \cdot m^{-3}$ ]	Hmotnost vláken [g]
A	100±2,4	100±2,8	108±1,2	1,08±0,14	59,3±4,2	54,9±2,3	2,8±0,2	-	-
B	100±2,7	100±2,6	108±1,5	1,08±0,16	50,9±5,6	47,2±2,9	3,3±0,3	1140±50	2,5±0,2
C	100±2,5	100±2,7	108±1,3	1,08±0,19	53,9±5,1	49,9±2,6	3,4±0,3	1450±40	2,7±0,2

Zaplnění ve vzorcích pěny (A) bylo o cca 20 % nižší než zaplnění ve vzorcích z pěny s přírodními vlákny (B, C). Je to dáno tím, že zaplnění je ovlivněno průměrem vláken, četností vláken, hustotou zaplnění. Tyto parametry budou následně ovlivňovat výsledné elastické vlastnosti vzorků B, C, které budou následně ovlivňovat funkcionalitu výsledných mechanických vlastností.

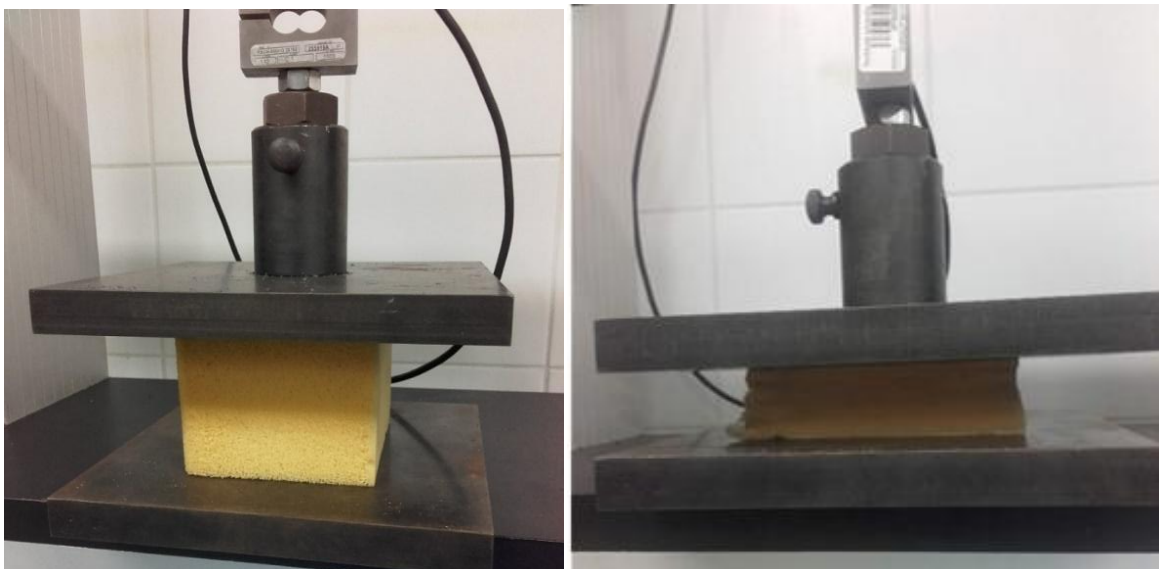
#### 4.2.1 Odpor vůči stlačení – cyklické stlačování

Pro získání mechanických vlastností při statickém stlačování byla využita norma ISO 3386 [88]. Bylo provedeno měření na statickém testovacím zařízení, na obr. 4.10 a) je zobrazeno schematické uspořádání měření. Jednotlivé zkušební vzorky obr. 4.10 b) (testováno 5 vzorků) byly umístěny na tuhou podložku a stlačovány pohyblivou deskou, přičemž byla snímána síla v závislosti na velikosti deformace. Stlačování bylo prováděno do 70 % deformace výšky vzorku. Na obr. 4.11 je ukázána realizace stlačování vzoru na testovacím zařízení. Zvolená rychlost zatěžování byla 100 mm/min. Po dosažení požadované deformace se vrátí pohyblivá zatěžovací deska do počáteční pozice. Vzorek čisté polyuretanové pěny při kvazistatickém stlačování a odlehčování vykazuje nelineární

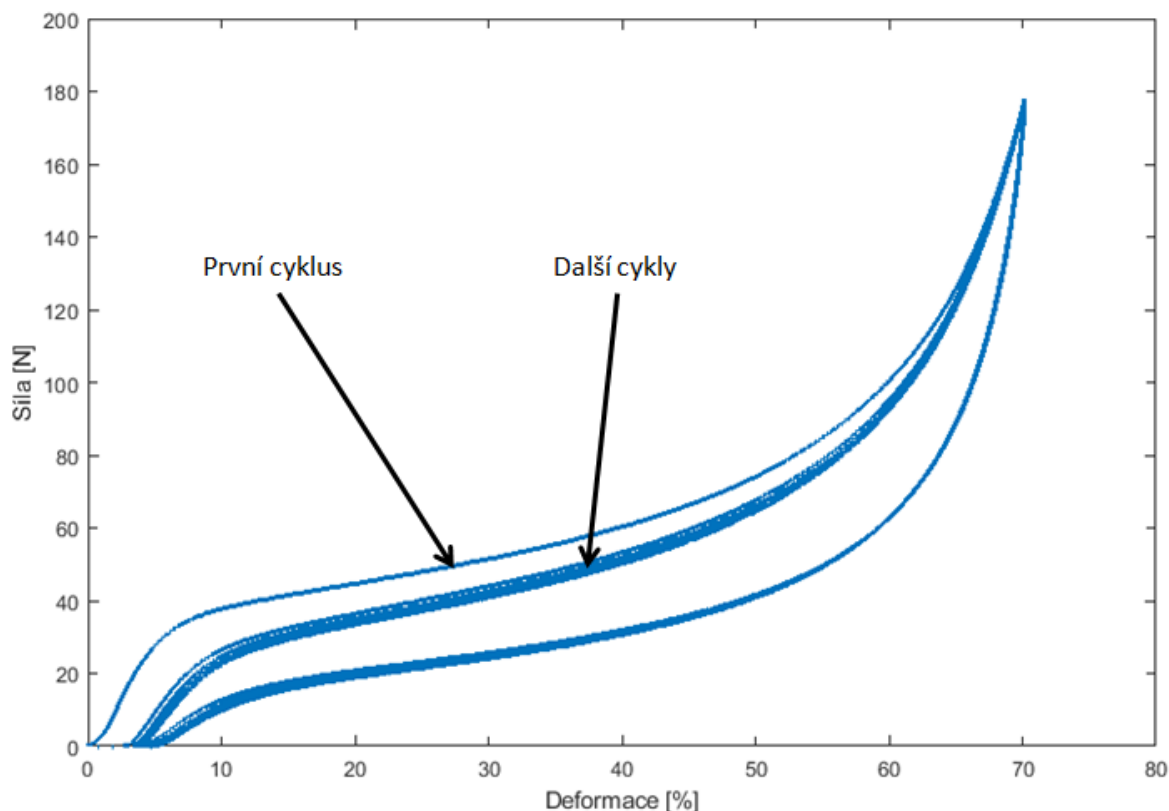
průběh zatěžující síly při stlačení. Naměřené průběhy tvarem odpovídají typické křivce, která lze rozdělit na tři oblasti viz kapitola 2.3.1. Při cyklickém stlačování vzorků můžeme pozorovat výrazně odlišný průběh síly při prvním zatěžovacím cyklu obr. 4.12 v porovnání s dalšími cykly, odlehčovací křivka má stejný průběh pro všechny cykly. Druhý a další zatěžovací cykly již vykazují téměř stejný průběh. Obdobné chování bylo popsáno u pryžových materiálů jako Mullinsův jev [89], odlišný průběh prvního a čtvrtého zatěžovacího cyklu je patrný z obr. 4.13. U pěnových materiálů je toto chování dáno tím, že se struktura materiálu nestihne vrátit do původního stavu. Z těchto důvodů se zpravidla provádí čtyři cykly. Z výsledků uvedených na obr. 4.12. je patrný charakteristický průběh střední hodnoty stlačování vzorku polyuretanové pěny [90].



**Obr. 4.10** Určení odporu vůči stlačování a) schematické uspořádání měření, b) zkušební vzorky

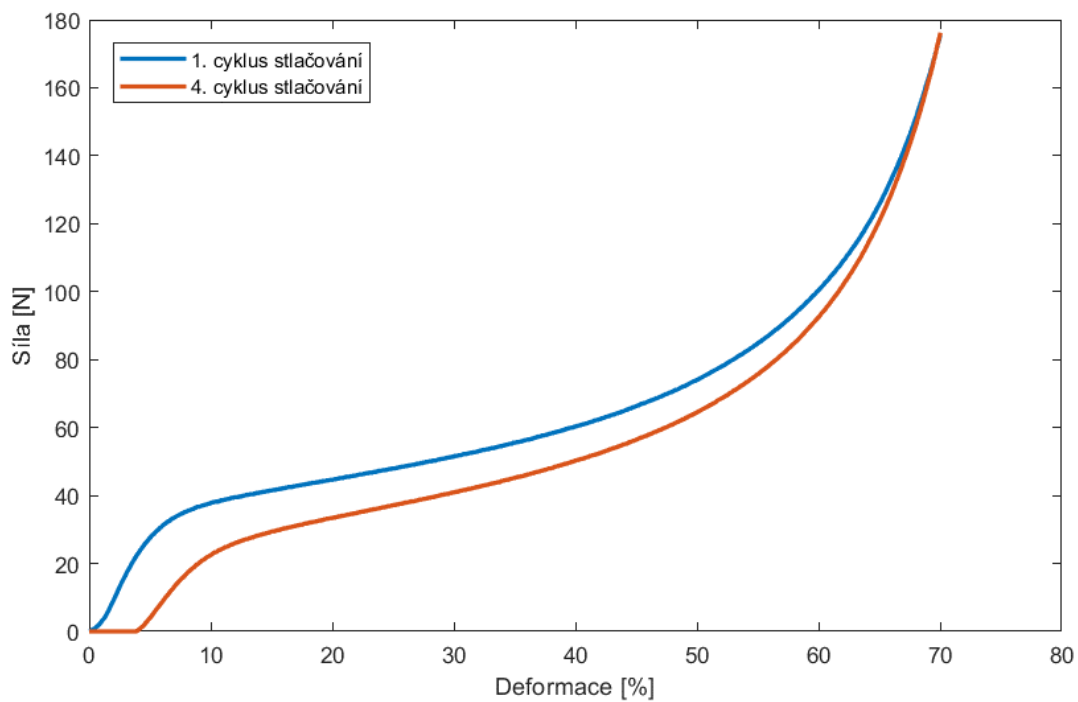


**Obr. 4.11** Realizace stlačování vzorku

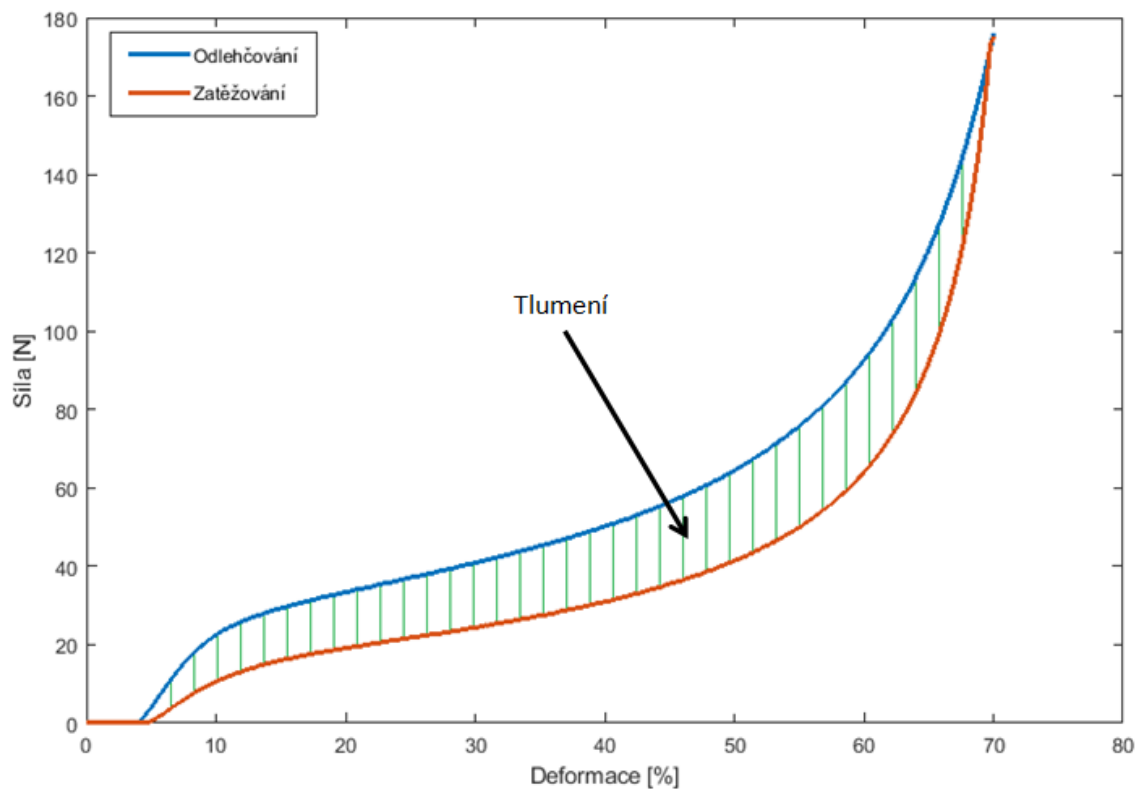


**Obr. 4.12** Průběh závislosti síly na deformaci pro vzorek čisté pěny při cyklickém stlačování.

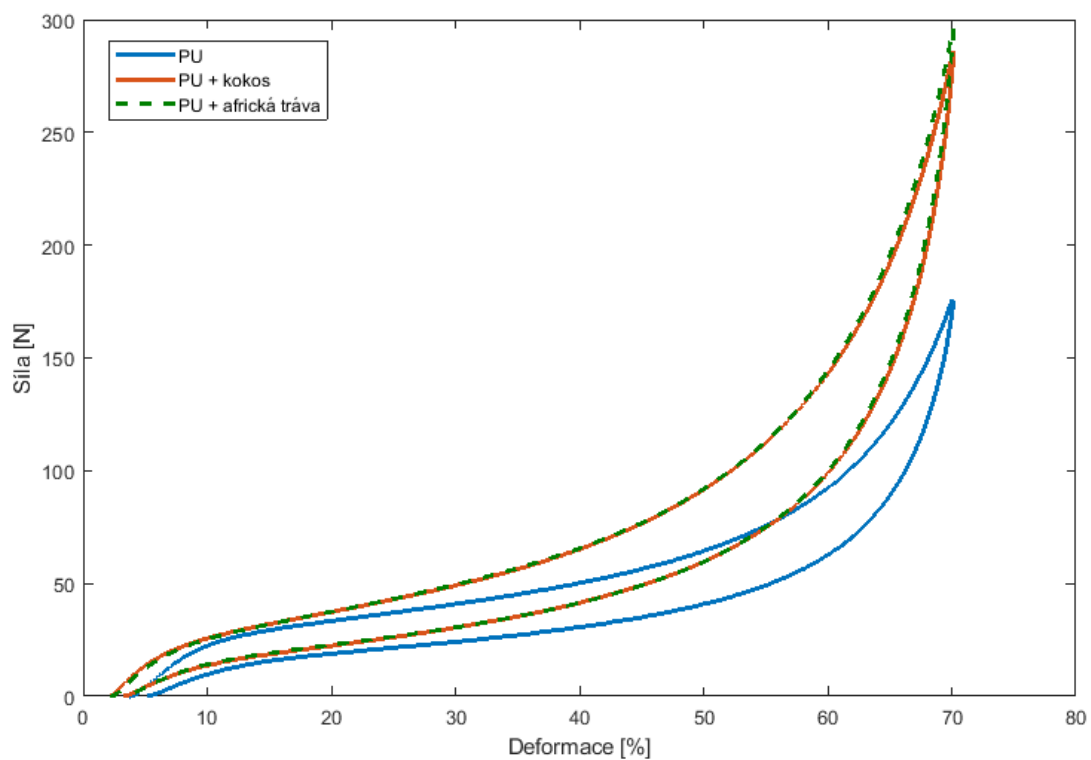
Některé elastické materiály jsou schopné uchovat až 100 % deformační energie. Zatímco při deformaci viskoelastických materiálů dochází k určité disipaci energie. Plocha pod zatěžovací křivkou vyjadřuje vstupní mechanickou energii, plocha pod odlehčovací křivkou vyjadřuje vratnou mechanickou energii uchovanou ve stlačovaném vzorku. Rozdíl těchto dvou ploch, respektive plocha nacházející se mezi zatěžující a odlehčovací křivkou vyjadřuje velikost tlumení v materiálu obr. 4.14. Dále byly vyhodnocovány průběhy posledního měřicího cyklu, jak je uvedeno na obr. 4.15., ze kterých lze porovnat charakteristické stlačení čisté pěny a pěny s přidanými přírodními vlákny. Porovnáním s pěnou s přírodními vlákny (kokos, africká tráva) je patrné, že čistá polyuretanová pěna má nižší silovou odezvu při stlačení. Tedy pěna s přírodními vlákny má větší tuhost charakteristickou obdobným nelineárním průběhem při stlačování jako u PU pěny. Na obr. 4.16 je zobrazen průběh tuhosti v závislosti na deformaci. Z počáteční hodnoty tuhost klesá do cca 15 % deformace, od této hodnoty deformace se velikost tuhosti mírně zvyšuje. Od deformace cca 40 % se tuhost zvyšuje výrazněji. V oblasti od 15 % do 40 % deformace je tuhost čisté pěny i kompozitní pěny téměř shodná. V tab. 4.2 jsou také uvedeny hodnoty  $F_{25}$  a  $F_{65}$  a SAG faktoru z testovaných vzorků.



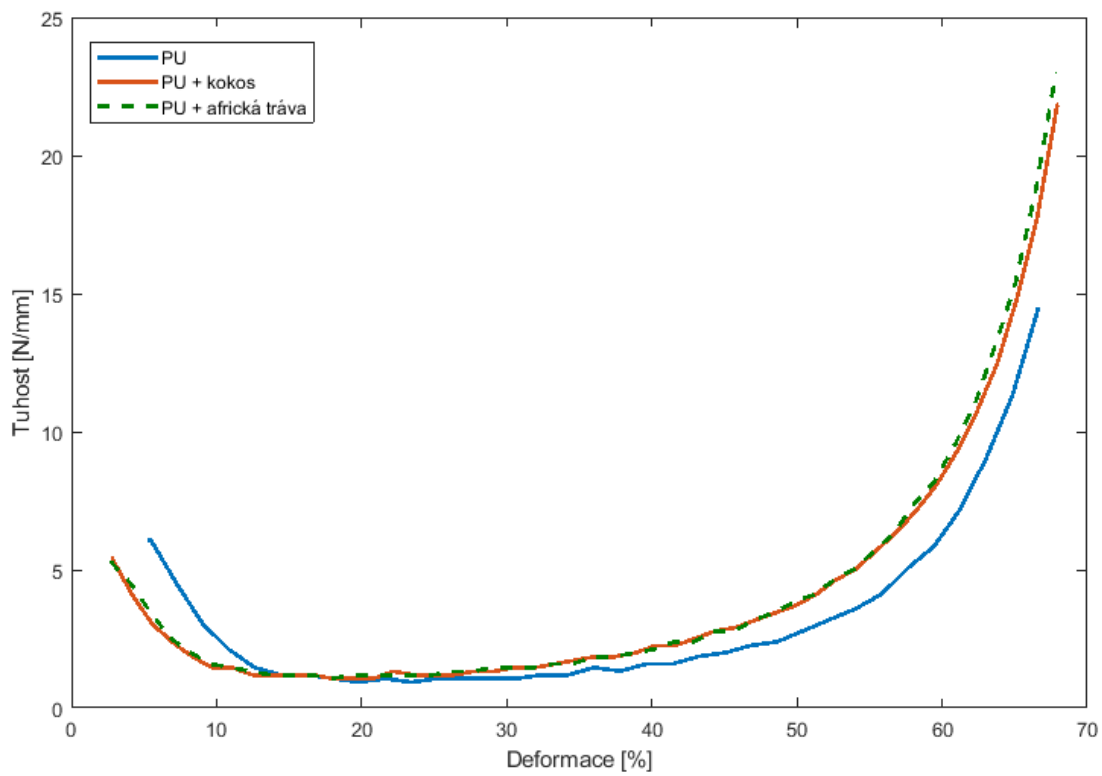
**Obr. 4.13** Průběh závislosti síly na deformaci – porovnání 1. a 4. cyklu



**Obr. 4.14** Průběh jednoho cyklu stlačování – tlumení



Obr. 4.15 Průběh závislosti síly na deformaci vzorků



Obr. 4.16 Průběh závislosti tuhosti na deformaci

**Tab. 4.2** Hodnota SAG faktoru

Vzorek	F <sub>25</sub> [N]	F <sub>65</sub> [N]	SAG faktor
A	37,2±2,3	119,5±9,5	3,21±0,23
B	43,05±3,1	194,3±10,3	4,51±0,31
C	43,07±2,9	196,7±12,3	4,57±0,37

#### 4.2.2 Relaxace napětí při stlačení

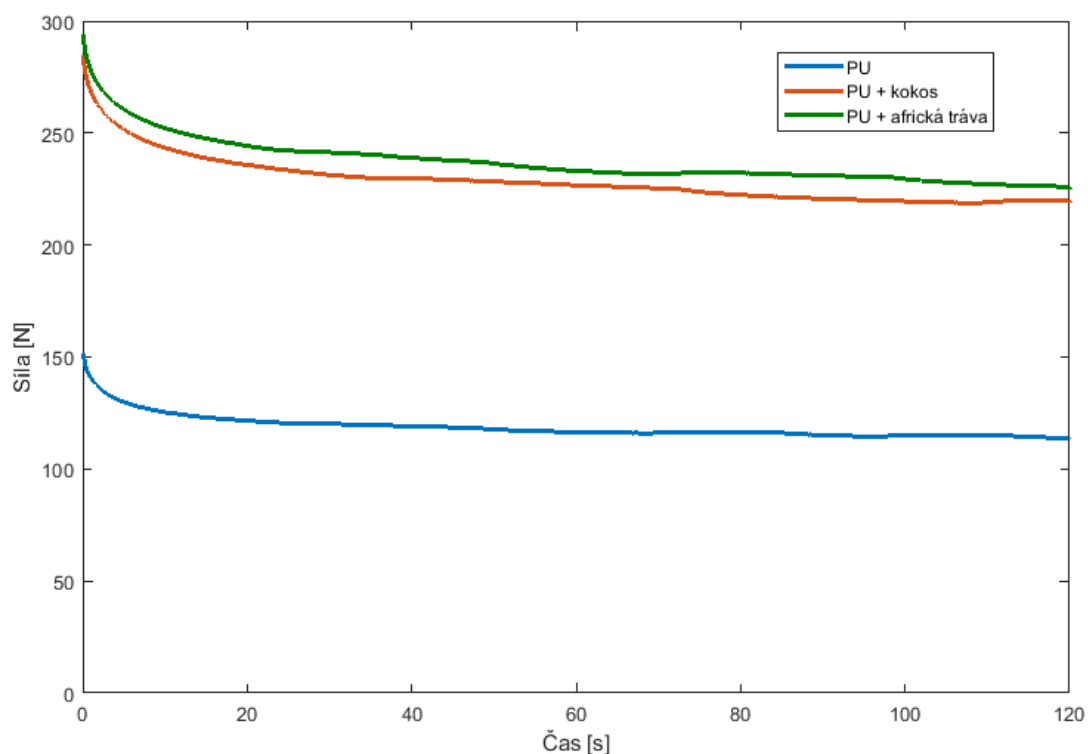
Charakteristické vlastnosti PU pěny při stlačení jsou ovlivněny tedy především velikostí deformace a také časem za jaký je pěna stlačena. S tím také souvisí jev zvaný creep (tečení struktury, struktura PU pěny se stává pod konstantním napětím poddajnější a zvyšuje se deformace). Obdobná je relaxace materiálu, kdy při konstantní deformaci dochází k postupnému poklesu napětí. Dle [25] je pro posuzování mechanických vlastností výhodnější měřit relaxaci materiálu. Tento fyzikální jev lze vyjádřit hodnotou relaxačního modulu  $G_R(t)$  popsaného poměrem:

$$G_R(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon_{konst}} \quad (4.2)$$

kde  $\sigma(t)$  je působící napětí a  $\varepsilon_{konst}$  konstantní deformace.

Měření relaxace materiálu bylo provedeno na stejných vzorcích jako statické stlačování. Vzorek byl zatížen tuhou deskou do konstantní hodnoty deformace 70 %, kde byla po dobu 120 s měřena silová odezva materiálu. Výsledné průběhy relaxace materiálu jsou zobrazeny na obr. 4.17. U všech testovaných vzorků se projevil výrazný pokles napětí na počátku měření, po cca 20 s není pokles již tak výrazný. Výsledné hodnoty relaxace jsou uvedeny v tab. 4.3, hodnota relaxace u vzorku čisté PU pěny je 37,9 N, u vzorků kompozitních pěn je hodnota relaxace téměř dvojnásobná 64,9 N u PU pěny s kokosovými vlákny a 68,5 N u PU pěny s vlákny africké trávy. V tab. 4.3 je také uveden rozdíl hodnot sil, který představuje časový úbytek síly při konstantním stlačení.





Obr. 4.17 Průběh relaxace vzorků

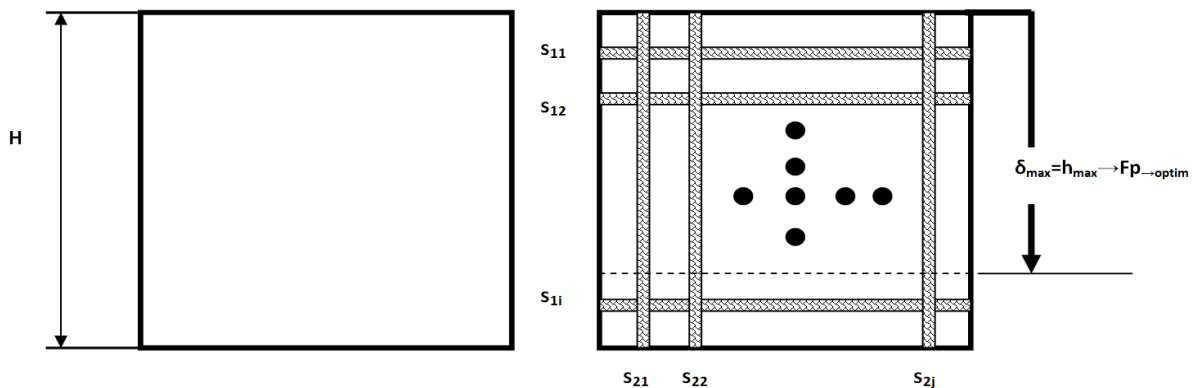
Tab. 4.3 Relaxace materiálu

Vzorek	Síla (t = 0 s) [N]	Síla (t = 120 s) [N]	Rozdíl
A	151,6	113,7	37,9
B	284,6	219,7	64,9
C	294,2	225,7	68,5

### 4.3 Modely pro stanovení mechanických vlastností

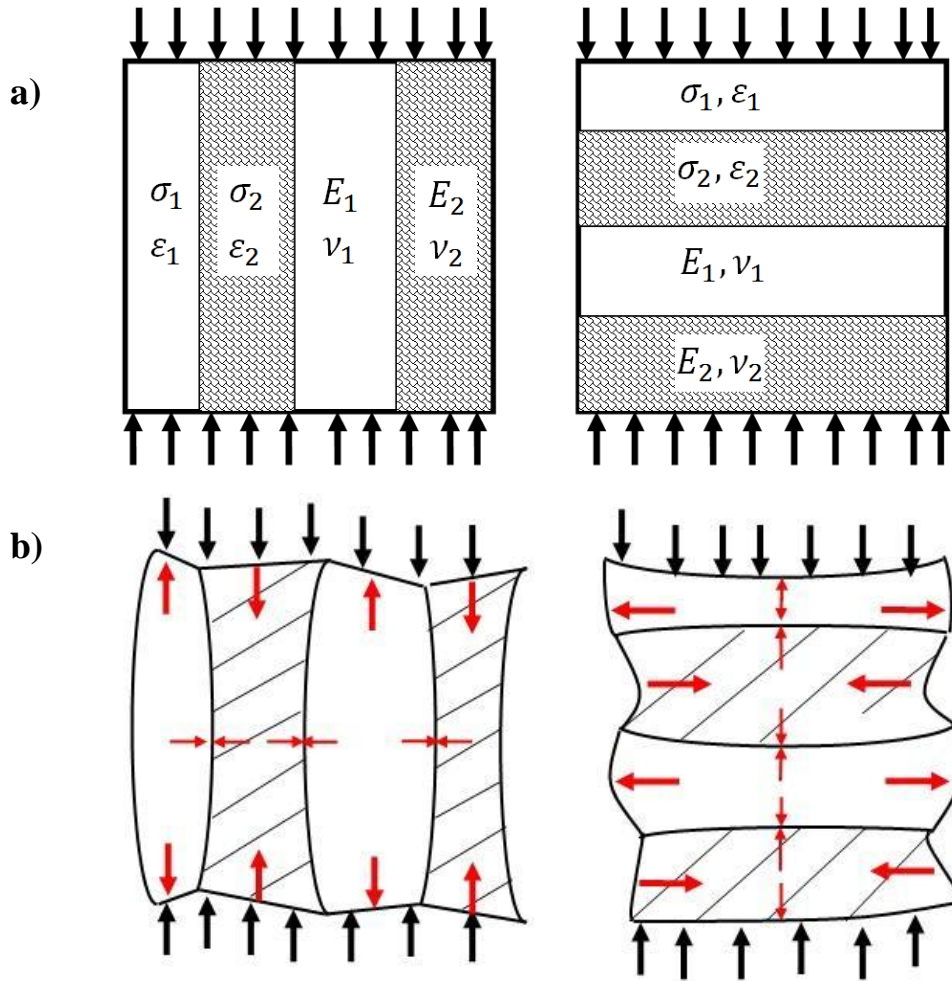
Struktura standardní polyuretanové pěny (PU pěny) vzniká chemickým procesem polyadice z polyesterů se dvěma hydroxylovými skupinami na koncích a izokyanátem. Při reakci izokyanátu s vodou se uvolňuje oxid uhličitý, který vytváří buněčnou strukturu. Podle poměru použitých složek se PU pěny dělí na **měkké, středně tuhé, tuhé či tvrdé** [91]. Mechanické, chemické a fyzikální vlastnosti s experimentálními rozborů struktury vzorků různých objemových hmotností  $\rho_{PU}$  běžných polyuretanových pěn (PU pěn) byly

významně popsány mj. v [25], [27], [92], [93], [94]. Výplně komfortní vrstvy autosedačky jsou zpravidla vyplněny PU pěnou o objemové hmotnosti v rozsahu přibližně **45 – 60 kg. m<sup>-3</sup>**. Vzorek z polyuretanové pěny se dá charakterizovat **buněčnou strukturou vytvářející nízkoprodyšný obal a jádro s rozdílnou vnitřní stavbou**. Vnitřní buněčná stavba je dána četností vzduchových buněk, která systematicky připomíná komplexním propojením chování mechanického systému - je-li struktura stlačována, vzduch se vypouští, stěny buněk se ohýbají a od určité fáze stlačování se o sebe stěny třou. Je-li struktura odlehčována, vzduch se opět nasává (systém zapojení pružin a tlumičů), jak uvádí ve své práci Petrů [12] či Martonka [20]. Mechanické vlastnosti vzorků nízkohustotní polyuretanové pěny s plnivem jsou při kompresním stlačování výrazně nelineární a viskoelastické, ovlivňuje je kompozitní působení jednotlivých komponent (PU pěna + plnivo). Jestliže do nízkohustotní buněčné struktury vložíme plnivo (přírodní vlákna, recyklovaná vlákna atd.), např. v horizontálním směru definované jako  $S_{11}, S_{12}, \dots, S_{1i}|_{i \rightarrow n}$  nebo ve vertikálním směru  $S_{21}, S_{22}, \dots, S_{2j}|_{j \rightarrow n}$ , získáváme mechanický systém (obr. 4.18), kde maximální stlačování  $\delta_{max}$  ovlivňující funkcionál komfortních parametrů  $F_p$  bude pro požadovanou tuhost a tlumení dán právě počtem, uspořádáním a typem plniva.



**Obr. 4.18** Model nízkohustotní pěny s plnivem

Z takovéto prvotní hypotézy lze vycházet pro stanovení hledaných tuhostních a deformačních parametrů tj. modulu pružnosti a Poissonova čísla. Jestliže bychom uvažovali jen horizontální či naopak vertikální uspořádání plniva, lze získat z charakteru kompozitního chování paralelní („tvrdý systém“) nebo sériový („měkký systém“), jak uvádí Bareš [95]. Rozložení napětí v těchto charakteristických strukturách je uvedeno na obr. 4.19.



**Obr. 4.19** a) model paralelní (vlevo), model sériový (vpravo), b) rozložení přetvoření paralelního modelu (vlevo), rozložení přetvoření sériového modelu (vpravo)

Sledujeme-li elastické přetvoření mezních modulů pod zatížením, definované modulem pružnosti  $E_1 = E_{PU}$ ,  $E_2 = E_S$  a Poissonovým číslem  $\nu_1 = \nu_{PU}$ ,  $\nu_2 = \nu_S$ , složek objemového podílu  $V_1$ ,  $V_2$  získáme pro ideální paralelní systém složený ze 2 struktur (PU pěna + 1 typ plniva) matematické odvození podle rovnice (4.3) a (4.4). Pro sériový systém se podle [95] matematické odvození zjednoduší na rovnice (4.5) a (4.6).

$$\frac{[(1 + \nu_2)V_1E_1 + (1 + \nu_1)V_2E_2][(1 - 2\nu_2)V_1E_1 + (1 - 2\nu_1)V_2E_2]}{(1 + \nu_2)(1 - 2\nu_2)V_1E_1 + (1 + \nu_1)(1 - 2\nu_1)V_2E_2} = E_S^P(\tau_1) \quad (4.3)$$

pro  $j = 2 < n, \tau_1 < t$

$$\frac{[\nu_1(1 + \nu_2)(1 - 2\nu_2)V_1E_1 + \nu_2(1 + \nu_1)(1 - 2\nu_1)V_2E_2]}{(1 + \nu_2)(1 - 2\nu_2)V_1E_1 + (1 + \nu_1)(1 - 2\nu_1)V_2E_2} = \nu_S^P(\tau_1) \quad (4.4)$$

pro  $j = 2 < n, \tau_1 < t$

$$\frac{E_1 E_2}{V_1 E_2 + V_2 E_1} = E_S^S(\tau_1), \quad \text{pro } i = 2 < n, \tau_1 < t \quad (4.5)$$

$$\frac{v_1 V_2 E_2 + v_2 V_1 E_1}{V_1 E_2 + V_2 E_1} = \mu v_S^S(\tau_1), \quad \text{pro } i = 2 < n, \tau_1 < t \quad (4.6)$$

kde,  $E_S^P(\tau_1), E_S^S(\tau_1)$  vyjadřují moduly pružnosti paralelního a sériového systému v čase,  $\tau_1 < t$ ,  $v_S^P(\tau_1), v_S^S(\tau_1)$  vyjadřují Poissonova čísla paralelního a sériového systému v čase  $\tau_1 < t$ .

Vzhledem k tomu, že takováto kompozitní struktura je časově závislá, a tedy mechanická odezva závisí na rychlosti zatížení, resp. rychlosti deformace, uvedené vztahy se dále budou komplikovat s aktuální hodnotou času  $\tau < t$ , což by bylo lépe řešitelné např. pomocí reologických modelů (Maxwellův model, Voigtův model, Weichertův model). Kde prostřednictvím různě sériově či paralelně zapojených pružin a tlumičů lze popisovat nelineární chování stlačované struktury.

#### 4.4 MKP Modely pro stanovení mechanických vlastností

Experimentální měření a analýzy mechanických vlastností vybraných vzorků pro použití jako výplňový materiál pro automobilovou sedačku, mohou poskytnout pouze omezené množství informací. Je velmi obtížné ukázat vnitřní strukturu testovaných vzorků, okamžité rozložení napětí a deformací. Je to dáno omezenými možnostmi měřícího zařízení, možnostmi umístění snímačů. Možným způsobem, jak nahlédnout do vnitřních struktur by mohlo být využití zobrazovacích technologií jako je magnetická rezonance nebo výpočetní tomografie. Jedná se ale o velmi drahá zařízení používaná zejména ve zdravotnictví. Některé vlastnosti nelze dobře měřit např. rozložení hlavních napětí a deformací buněčných či vlákenných struktur. Jejich znalost ve struktuře je důležitá, i proto že z ní lze vycházet při optimalizaci a návrhu tvaru komfortní výplně automobilové sedačky. Pro získání takovýchto informací je velice vhodnou možností využití numerických metod jako jsou metoda konečných prvků, metoda diskretních prvků, metoda hraničních prvků či metoda konečných objemů. Metoda konečných prvků (MKP) je v současné době nejuniverzálnější metodou pro mnoho typů problémů, nejen řešení okrajových úloh mechaniky kontinua. MKP převádí řešení diferenciálních rovnic na řešení soustav algebraických rovnic. Rozvoj této metody souvisí s rozvojem výpočetní techniky.

Mnoho komerčně úspěšných MKP softwarů má kořeny již v dobách sálových počítačů a dřevných štítků (NASTRAN 1966, MARC 1969, ANSYS 1970). Pomocí dnes běžně dostupných osobních počítačů není problém v přijatelném čase řešit soustavy o stovkách tisíc rovnic. Na trhu je řada komplexních programů postavených na MKP, dnes již s velice přívětivým uživatelským prostředím. MKP je variační metodou založenou na zobecněné Ritzově metodě. Tato metoda využívá báze funkce pro aproximaci polí hledaných veličin spojitě po celé konstrukci a hledány jsou pouze koeficienty těchto funkcí. Funkce musí splňovat okrajové podmínky a jsou obecně nenulové v celé řešené oblasti. Formálně se tím převede problém analytického řešení diferenciálních rovnic na řešení algebraických rovnic, které se sestaví tak, že se příslušný potenciál minimalizuje (derivuje postupně podle všech neznámých parametrů a derivace se pokládají rovny nule). Existují tři varianty MKP rozlišitelné podle významu hledané funkce a podle výrazu, který minimalizují. V současnosti nejpoužívanější varianta je založena na Lagrangeovu principu virtuálních přemístění. Další možnou formulací je silová varianta, kde jsou hledána pole napětí na principu Castiglianových virtuálních sil. Existuje také kombinovaná varianta, kde hledané funkce aproximují přemístění i napětí a příslušným funkcioálem je např. Hellinger-Reissnerův funkcioál. Pro získání mechanických vlastností výplňového materiálu, které lze obtížně měřit (jako např. tenzory napětí a deformace, kontaktní tlaky) byly vytvořeny simulační modely v konečněprvkovém programu ABAQUS. ABAQUS je program, který umožňuje modelovat a studovat mechanické vlastnosti nelineárních anizotropních materiálů (hyper elastických, visko-elastických) s kompozitním působením. ABAQUS využívá pro výpočet explicitní metodu, která pro výpočet časového kroku využívá řešení prostřednictvím centrálních diferencí [96], které vyjadřují posuvy, rychlosti a zrychlení uzlů v čase  $t_{n+1}$  pouze pomocí hodnot v čase  $t_n$ . Pro základní dynamickou rovnici pohybu hmoty  $m\ddot{x} + kx = F(t)$  lze explicitní algoritmus vyjádřit podle rovnice (4.7).

$$M \cdot \ddot{Q}_n + K \cdot Q_n = F_n \quad (4.7)$$

Kde:  $\ddot{Q}_n = (Q_{n+1} - 2Q_n + Q_{n-1})/\Delta t^2$  je matice zrychlení uzlových bodů,  $K$  je matice tuhosti,  $F_n$  je matice působících sil. Pro modelování PU pěny lze využít viskoelastického modelu nebo hyperelastického modelu, který bude poskytovat obecnou schopnost elastomerních stlačitelných pěn konečných deformací. Modely nelineární elasticity platí pro velké deformace (zejména velké objemové změny). Model pro nízkohustotní pěny

v Abaqus/Explicit je nelineární viskoelastický model vhodný pro specifikaci strain rate sensitive chování (chování závislé na rychlosti deformace) pro pěny používané jako tlumiče nárazu. Model elastomerické pěny je izotropní nelineární, vhodný pro modelování buněčných materiálů, jejichž pórovitost dovoluje velmi velké objemové přetvoření. Umožňuje modelování disipace energie, může se pružně deformovat až do 90 %. Buněčné materiály jsou tvořeny propojením tuhých vzpěr nebo desek, které tvoří okraje a plochy buněk. Pěny jsou tvořeny mnohostěnnými buňkami uspořádanými do trojrozměrné struktury. Pro malé deformace pěny se naměřené Poissonovo číslo v obvykle pohybuje kolem hodnoty 0,33 jak při tahových zkouškách, tak při stlačování. Pro větší deformace při stlačování se hodnota v dostává k 0, průhyb buněčných stěn nemá za následek významnou boční deformaci testovaných vzorků. Nicméně pro velké deformace při tahové zkoušce je v nenulové, což je následkem vyrovnání prodloužení buněčných stěn. Díky technologii výroby pěnových materiálů jsou obvykle buňky nestejně velikosti. Tato tvarová anizotropie vede k rozdílným zatěžovacím charakteristikám v různých směrech. Existují dva hlavní typy materiálůvých modelů pěnových materiálů. Nelineární elastický model, kde je silová odezva počítána na základě deformační energie. Takové materiálůvé modely se nazývají hyperelastické [97] na rozdíl od lineárně elastických modelů. Alternativou jsou pak modely, které využívají konkrétních zatěžovacích charakteristik daného materiálu. Druhým typem jsou elasto-plastické modely, kde stlačování způsobuje trvalé deformace, používají se pro tuhé pěny. Tyto modely jsou platné pro izotropní materiály. Pěnové materiály jsou obvykle do určité míry anizotropní, což je dáno technologií výroby. U některých výrobků jako jsou například polystyrenové desky pro stavební účely je anizotropie žádoucí. Numerické modely anizotropních pěn neexistují, k modelování takových pěn se využívá aproximace [25]. Ačkoli pěnové materiály mají složitou strukturu na úrovni buněk, v makroskopickém měřítku je můžeme považovat za homogenní materiál. Numerické simulace přistupují k pěnovým materiálům jako ke kontinuu. Výpočet probíhá v konečněprvkové síti, jejíž elementy jsou obvykle řádově větší než jednotlivé buňky pěnového materiálu. Velké deformace pěnových materiálů nemohou být popsány lineárními elastickými modely, kde je napětí při stlačování úměrné modulu pružnosti. Takový materiál by byl deformovatelný do nulového objemu, čemuž by odpovídala nekonečně velká měrná hmotnost, což je fyzikálně nemožné. Proto vztah napětí a deformace pro jednoosé stlačování musí být nelineární, se sklonem zvyšujícím se s velikostí deformace. Takové pěny mohou být aproximovány jako hyperelastické látky,

pokud jsou brány v potaz jejich časově závislé mechanické vlastnosti a hystereze. Snaha odhalit elastickou odezvu PU pěny pod velkou deformací opakovaným zatěžováním a relaxací do rovnováhy nevedlo k úspěchu [98]. Jakýkoli elastický model je tedy pouhou aproximací. Mikromechanické modely mohou pomoci predikovat průběh deformace a napětí, ale nevedou přímo ke konkrétní funkci deformační energie. Parametry funkce deformační energie však mohou být nastaveny tak, aby odpovídaly těmto predikcím. Funkce deformační energie pro pěnové materiály může vycházet z funkce deformační energie pro pryžové materiály. Pryže se považují ve většině případů za nestlačitelné, takže Poissonovo číslo je uvažováno  $\nu = 0,5$ . Rivlin [99] navrhl funkci deformační energie  $U$ , vyjádřenou jako invariantní  $I$  prodloužení. Vybral tři invariantní funkce  $I$ , které jsou popsány celočíselnými mocninami prodloužení  $\lambda_i$ .

$$I_1 \equiv \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2, \quad I_2 \equiv \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2, \quad I_3 \equiv \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 \quad (4.8)$$

Pokud je  $I_3=1$  pro nestlačitelný materiál, pak  $U$  je funkcí  $I_1$  a  $I_2$ . Pro jednoosé prodloužení ve směru  $x$  do prodloužení  $\lambda$ , napětí  $\sigma_x$  je dáno vztahem:

$$\sigma_x = (\lambda^2 - \lambda^{-1}) \left[ \frac{\partial U}{\partial I_1} + \lambda^{-1} \frac{\partial U}{\partial I_2} \right] \quad (4.9)$$

U typických pryžových materiálů jsou parciální derivace v rovnici (4.10) téměř konstanty, označme je  $C_1$  a  $C_2$ . Pak  $C_1$  souvisí s hustotou zesíťovaných řetězců na jednotku objemu a  $C_2$  je vztažena k hustotě otevřených řetězců. Následně můžeme psát vztah tahového napětí zjednodušeně jako:

$$\sigma_x = C_1(\lambda^2 - \lambda^{-1}) + C_2(\lambda - \lambda^{-2}), \quad (4.10)$$

což je nazýváno Mooney-Rivlinovou rovnicí.

Ogden [100] navrhl funkci deformační energie, pro mírně stlačitelné pryže, obsahující neceločíselné mocniny deformačních invariantů. Následně byl tento vztah modifikován pro stlačitelné nízkohustotní pěny. V Abaqus [96] má funkce tvar podle rovnice (4.11).

$$U = \sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} \left[ \lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3 + \frac{1}{\beta_i} (J^{-\alpha_i \beta_i} - 1) \right] \quad (4.11)$$

V této komplexní rovnici, jsou  $\lambda_i$  hlavními prodlouženími, relativní objem pak je

$$J = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = \sqrt{I_3} \quad (4.12)$$

$\alpha_i$ ,  $\beta_i$ , a  $\mu_i$  jsou materiálové konstanty,  $N$  je celé číslo, exponenty  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$  nemusí být celočíselné. Konstanta  $\mu_i$  souvisí s počátečním modulem pružnosti ve smyku  $\mu_0$  jež je dán vztahem:

$$\mu_0 = \sum_{i=1, N} \mu_i \quad (4.13)$$

Mooney Rivlinova rovnice pro pryže je speciálním případem Ogdenovy rovnice s parametry  $N = 2$ ,  $\alpha_1 = 2$ ,  $\alpha_2 = -2$ ,  $\beta = \infty$ . Koeficient  $\beta_i$  který vyjadřuje stlačitelnost, souvisí s Poissonovým číslem a je dán vztahem:

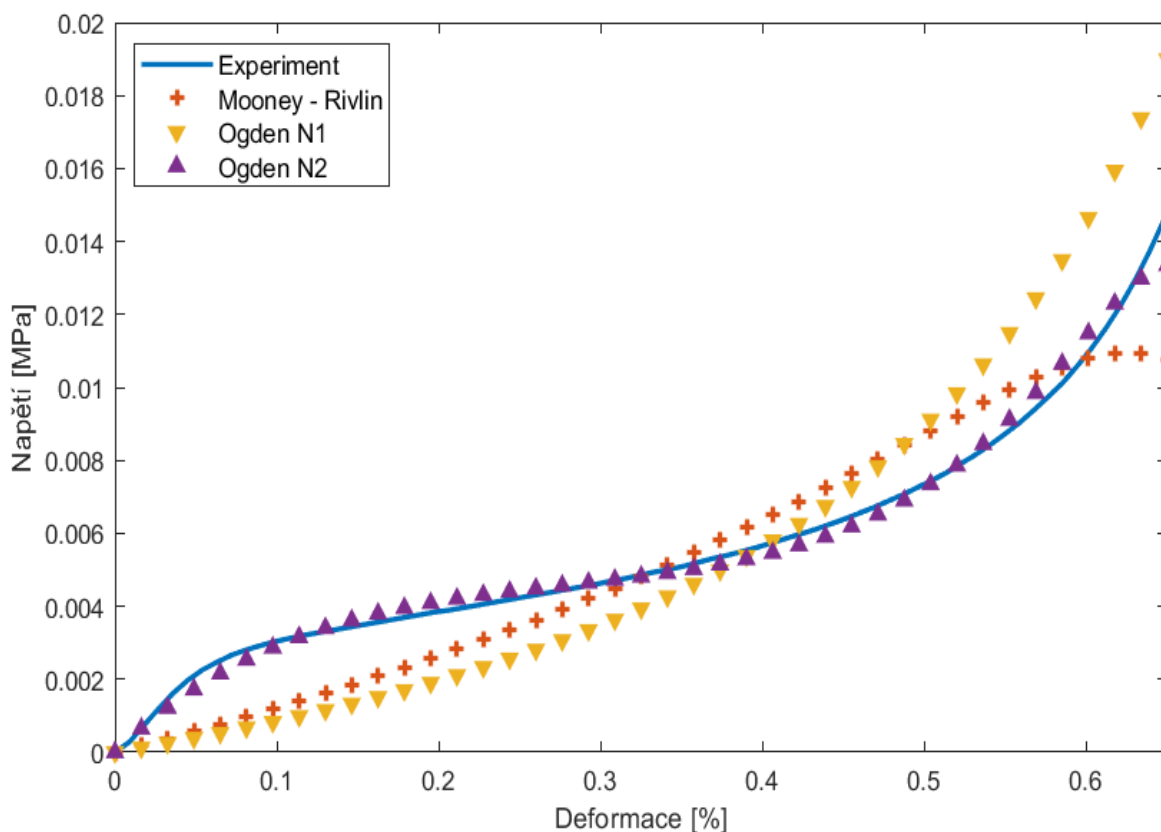
$$\beta_i = \frac{\nu_i}{1 - 2\nu_i} \quad (4.14)$$

Pokud je Poissonovo číslo nulové, pak i koeficient  $\beta_i$  je nulový. Počáteční modul objemové pružnosti  $B$  je dán vztahem:

$$B_0 = \sum_{i=1, N} 2\mu_i \left( \frac{1}{3} + \beta_i \right) \quad (4.15)$$

Parametry nemohou být snadno určeny z vlastností polymerního materiálu. Místo toho jsou vypočteny na základě experimentálně získaných křivek. Software Abaqus obsahuje nástroj umožňující aproximaci naměřených dat pomocí křivek určitých materiálových modelů. Na obr. 4.20 je zobrazena aproximace hodnot získaných stlačováním vzorku PU pěny, aproximace byly provedeny pomocí Mooney – Rivlinova modelu a Ogdenových modelů pro  $N = 1$  a  $2$ .

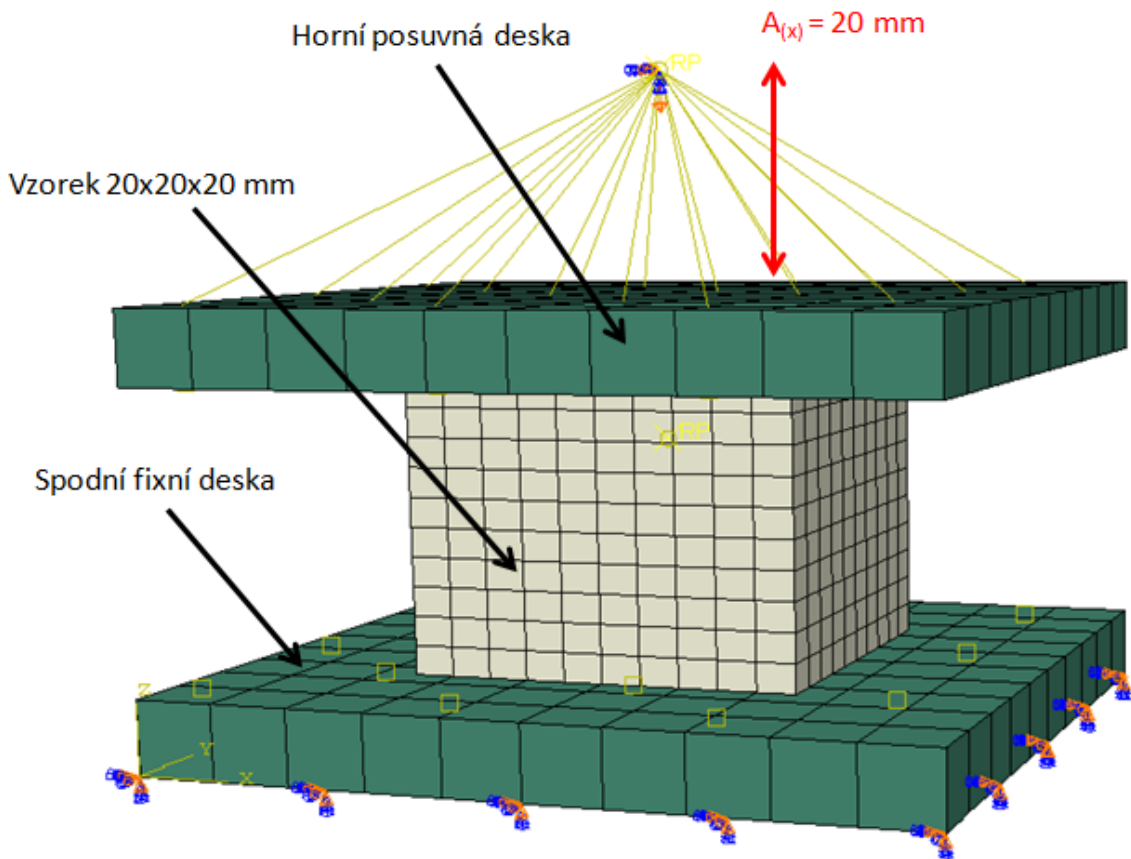




**Obr. 4.20** Aproximace křivek materiálového modelu na základě naměřených dat.

#### 4.4.1 MKP model polyuretanové pěny a pěny s vlákny

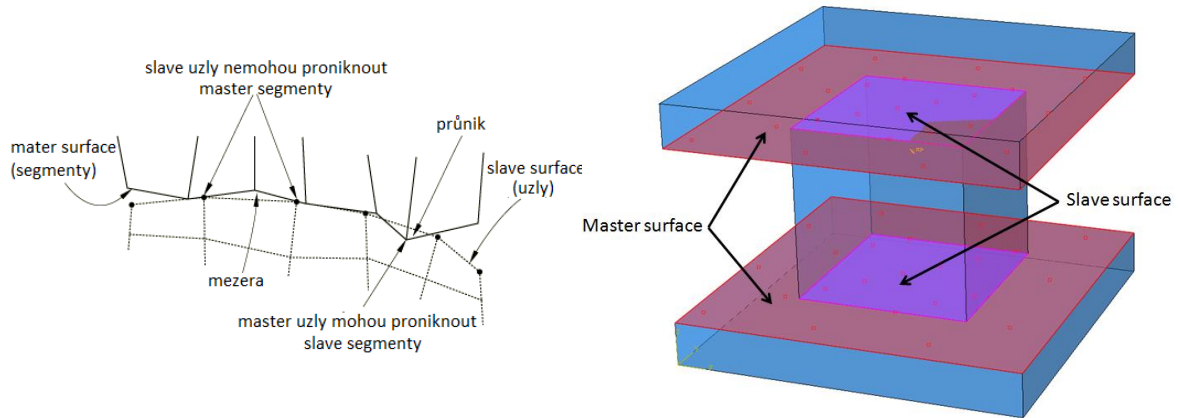
Numerický model byl vytvořen pro vzorek o rozměrech 20x20x20 mm. Nejprve byl vytvořen model pouze čisté pěny bez vlákenné výplně. Model stlačování se skládal ze dvou tuhých desek, mezi které byl umístěn testovaný vzorek obr. 4.21. Spodní deska je fixní, je jí zamezen pohyb ve všech směrech  $U_i = 0$ ,  $R_i = 0$ , horní desce je umožněn pohyb pouze ve vertikální ose, kde je zavedeno stlačování rychlostí 100 mm/min. V kontaktních plochách je zaveden koeficient tření 0,2. Materiál PU pěny byl definován jako hyperfoam z prostředí Abaqus, materiálové parametry byly určeny pomocí křivek získaných jednoosým stlačováním vzorků PU pěny. Na obr. 4.24 je znázorněn průběh stlačování vzorku čisté PU pěny v porovnání s numerickým modelem, odchylka dosahuje maximálně 5 %.



**Obr. 4.21** Numerický model stlačování vzorku PU pěny.

Kontakt může být definován jako kontakt dvou ploch, které na sebe vzájemně působí jako kontaktní páry nebo tzv. self kontakt, který interaguje sám se sebou. V případě statického stlačování vzorku se jedná o kontakt více těles. Abaqus umožňuje několik formulací kontaktů, podle způsobu diskretizace kontaktních ploch a podle klasifikace vzájemného pohybu kontaktních ploch. V tomto případě byla zvolena diskretizace typu plocha na plochu (surface to surface), princip kontaktu ukazuje obr. 4.22 a). Tento přístup uvažuje tvary obou ploch (master i slave) v regionu vazbových podmínek. Penetrace slave surface je možná uzly master surface k opaku, ale dojít nemůže. Kontaktní podmínky jsou uplatněny přes celou slave plochu. Přístup surface to surface poskytuje hladší rozložení napětí, výrazné penetrace se objevují zřídka, všeobecně poskytuje přesnější výsledky než algoritmus node to surface (uzel na plochu), nicméně je výpočetně náročnější. Nejprve je nutné určit řídicí plochu (master surface) a podřízenou plochu (slave surface), pro výběr master surface platí několik doporučení: mělo by se jednat o plochu větší, plochu s větší tuhostí a plochu s hrubší sítí elementů. V případě stlačování vzorku pěny byly jako master

plochy zvoleny plochy posuvné a pevné desky a slave surface horní a spodní plocha stlačovaného vzorku viz obr. 4.22 b).

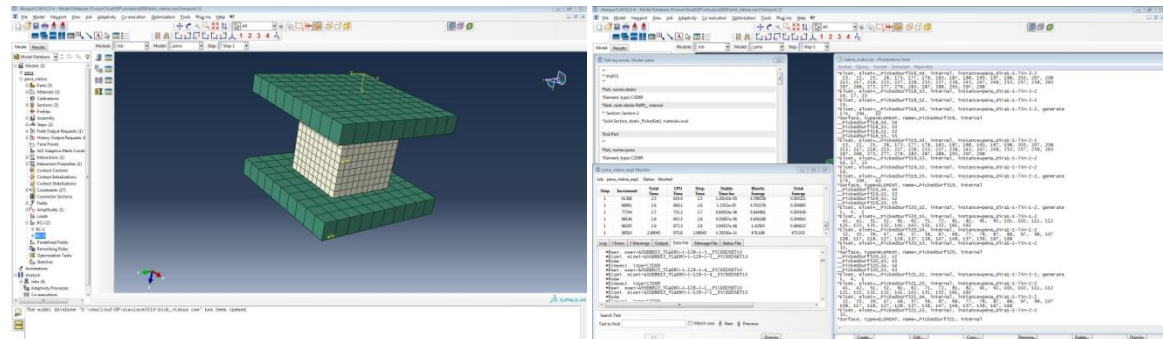


**Obr. 4.22** a) Princip kontaktu v modelových simulacích, b) výběr kontaktních ploch

**Tab. 4.4** MKP model stlačování vzorku

Model	Typ elementu	Velikost elementu [mm]	Počet elementů	Koeficient tření	Časový krok $\Delta t$ [s]
Podložka	C3D8R	4	100	0,2	$4,64 \cdot 10^{-7}$
PU pěna	C3D8R	1,5	4800	0,2	$4,42 \cdot 10^{-5}$
Vlákna	C3D8R	0,3	4416	0,2	$2,28 \cdot 10^{-7}$

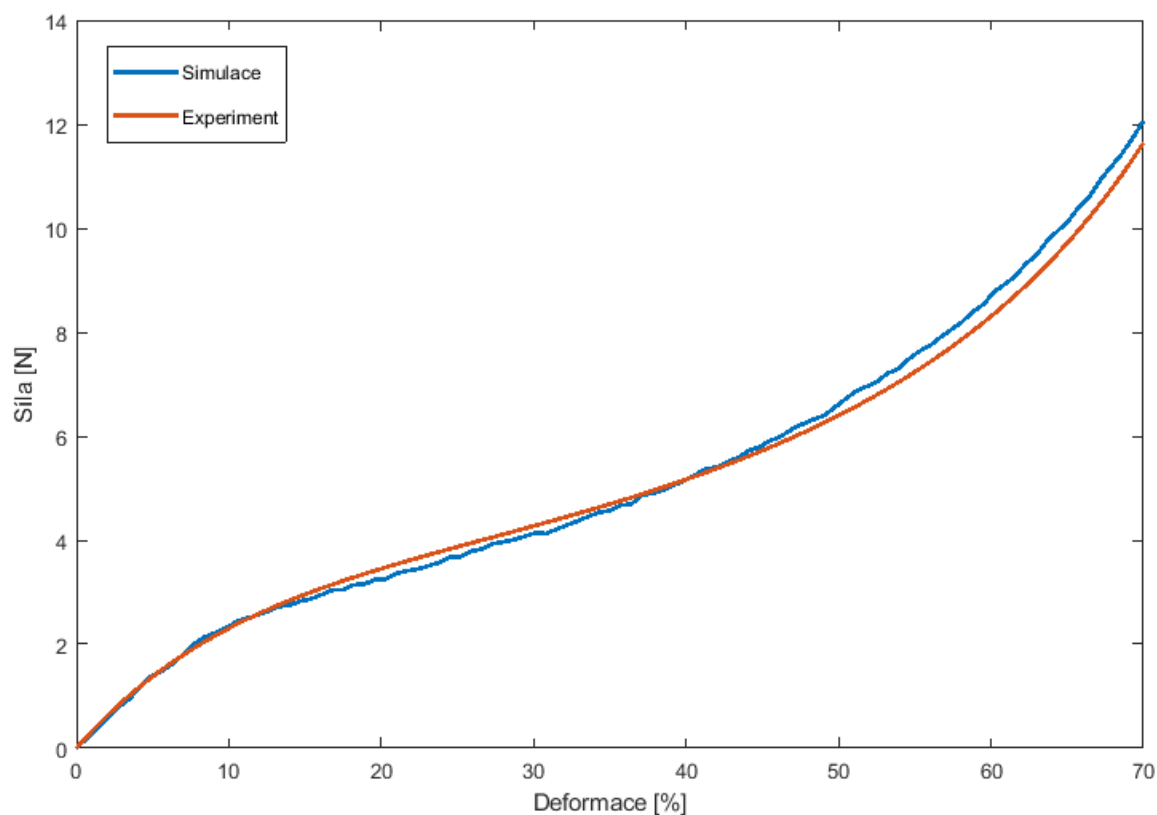
Použité typy a velikosti elementů, které ovlivňují výsledný časový krok  $\Delta t$  numerické simulace, jsou uvedeny v tab. 4.4. Celý MKP model, včetně materiálových modelů, konečněprvkové sítě i okrajových podmínek, byl vytvořen v prostředí Abaqus obr. 4.23. Vstupní materiálové parametry jsou uvedeny v tab. 4.5.



**Obr. 4.23** Prostředí softwaru ABAQUS interaktivní (vlevo), textové rozhraní (vpravo)

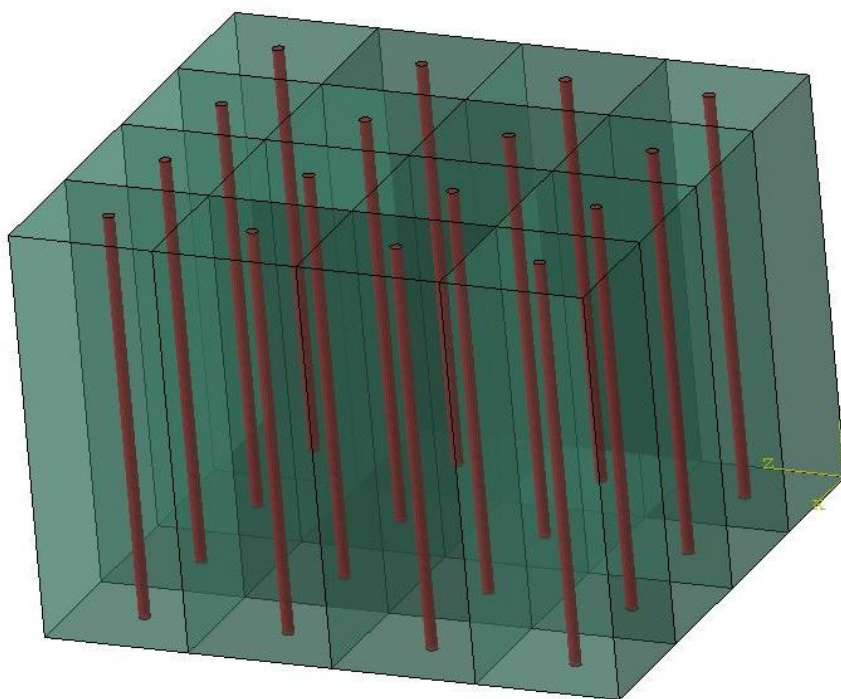
**Tab. 4.5** Vstupní materiálové vlastnosti MKP modelu

Model	Materiálový model	Měrná hmotnost [kg.m <sup>-3</sup> ]	Modul pružnosti [Mpa]	Poissonovo číslo
Podložka	Lineární elastický	7850	210 000	0,3
PU pěna	Hyperfoam	55	0,07	-
Vlákna	Lineární elastický	1450	4 000	0,2

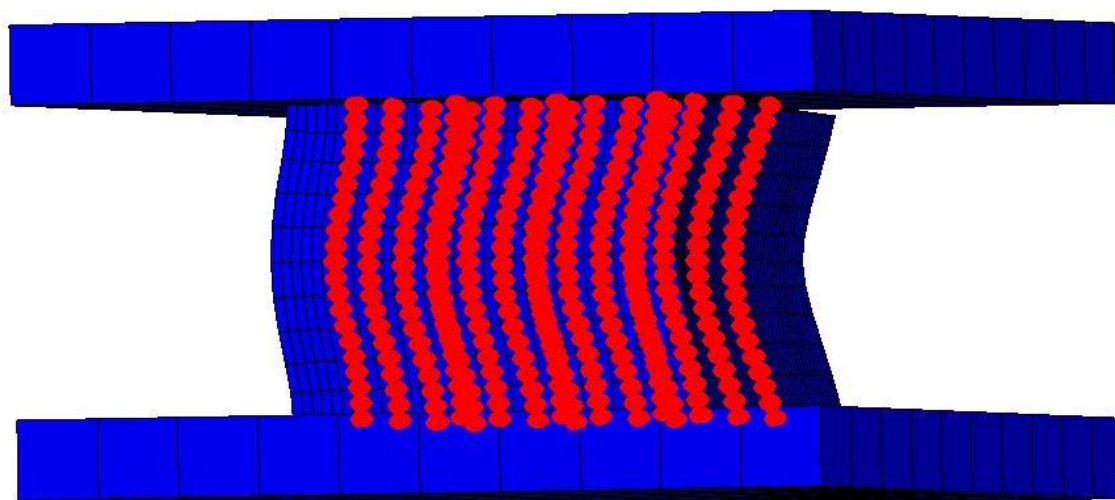
**Obr. 4.24** Průběh stlačení vzorku čisté PU pěny v porovnání se simulací

Kompozitní pěna byla v první fázi tvořena tak, že byl v modelu pěny vytvořen určitý počet svislých otvorů obr. 4.25. Do těchto otvorů byla vložena svislá vlákna průměru 0,4 mm a spojena s pěnou pomocí vazby TIE. Tato vazba zafixuje nejbližší uzly vybraných ploch tak, že se v průběhu simulace vzájemně neposunou ani nepootočí. Pro vlákna byl zvolen elastický materiálový model. Svislá vlákna se při stlačování chovají zpočátku jako nosníky namáhané tlakem a výrazně zvyšují tuhost kompozitu. Při zvětšující se deformaci dojde ke vzpěru, tedy vybočení vláken, vliv vláken na tuhost kompozitu se výrazně sníží. Při reálných experimentech se vzpěr projeví takřka okamžitě po začátku stlačování z důvodu

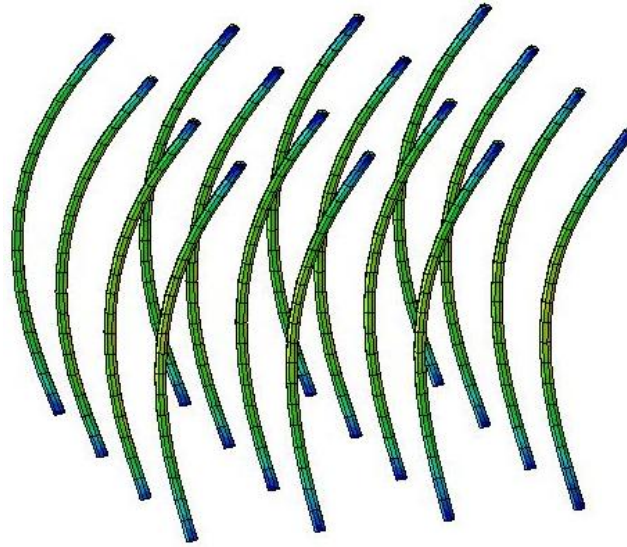
nehomogenit pěny i vláken a nerovnoměrného uspořádání vláken. V případě simulace nemusí ke vzpěru vůbec dojít z důvodu idealizace mnoha aspektů. V tomto případě v simulaci ke vzpěru došlo, což je zapříčiněno nastavením kontaktu, kdy dochází k určitým rázům, které iniciují deformaci. Následující obrázky obr. 4.26 a obr. 4.27 ukazují průběh stlačování modelu kompozitní pěny a tvar deformovaných výztužných vláken.



**Obr. 4.25** Model PU pěny s 16 svislými vlákny

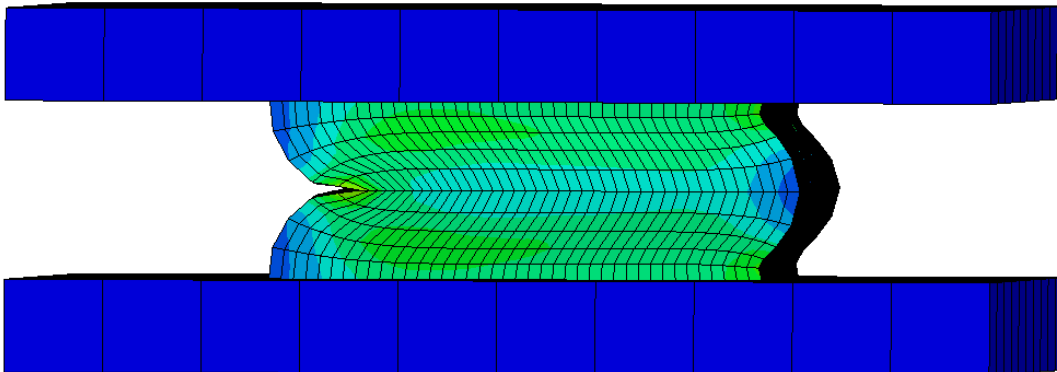


**Obr. 4.26** Průběh deformace PU pěny se svislými vlákny



**Obr. 4.27** Deformace svislých vláken v PU pěně

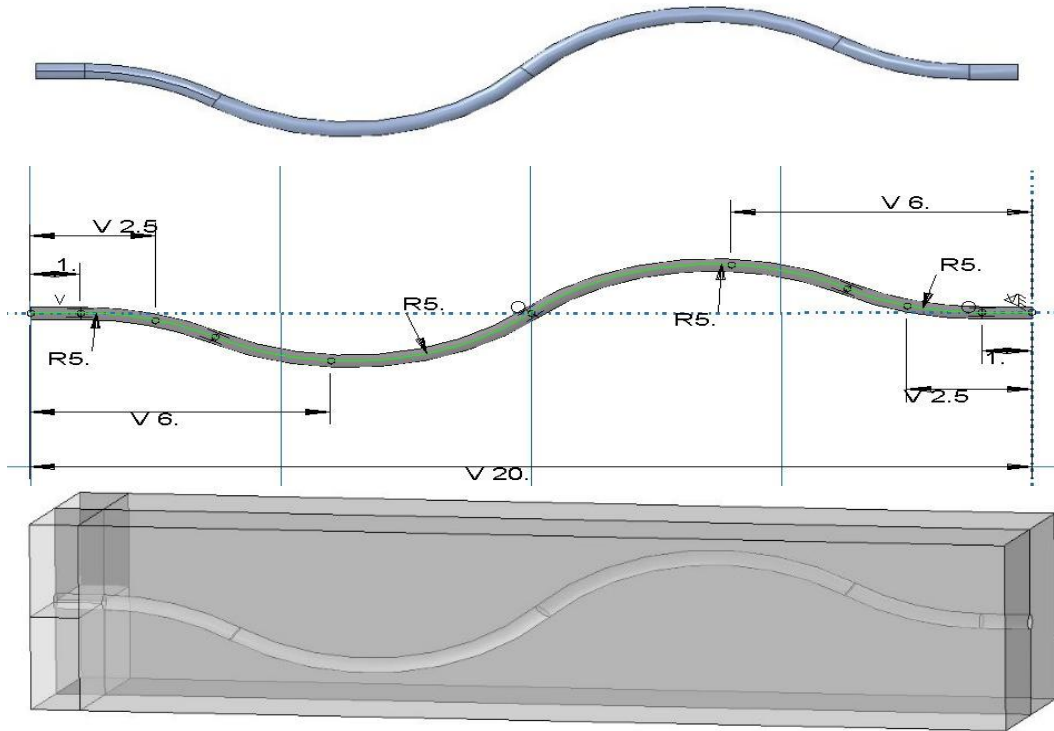
Jestliže budeme zvyšovat zaplnění svisle kladených vláken, bude docházet k větší tuhosti kompozitní pěny, která se projeví zvýšenou hodnotou silového zatížení a také nestandardní deformací. Deformace se bude projevovat „vyboulením na jedné straně“, jak je podle simulace uvedeno na obr. 4.28.



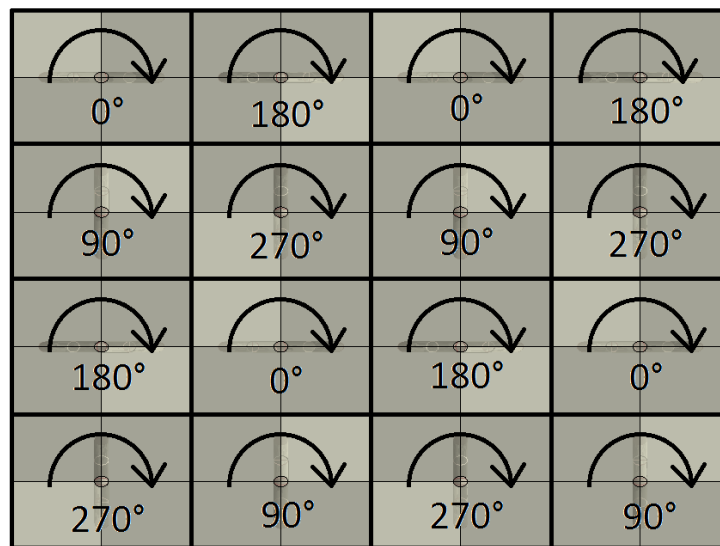
**Obr. 4.28** Deformace pěny se svisle kladenými vlákny

Svisle kladená tuhá vlákna nejsou vhodná jako výztuha pro flexibilní pěny, které jsou zpravidla zatěžovány ve svislém směru. Při počátku deformace je tuhost vláken příliš vysoká v porovnání s PU pěnou, což při opakovaném stlačování povede k vytrhávání vláken z PU pěny. Z těchto důvodů se jeví vhodnější použití vláken kladených zejména v horizontálním směru s určitým zakřivením jednotlivých vláken. Proto se přistoupilo k modelování vláken kladených horizontálně. Nejprve byla vytvořena geometrie jednotlivých vláken tak, aby se tvarem blížila vláknům v reálném kompozitním vzorku obr. 4.29. Následně byla vytvořena geometrie segmentu pěny s dutinou odpovídající geometrii vlákna. Pak byla vlákna spojena se segmenty pěny pomocí pevné vazby TIE, zajišťující

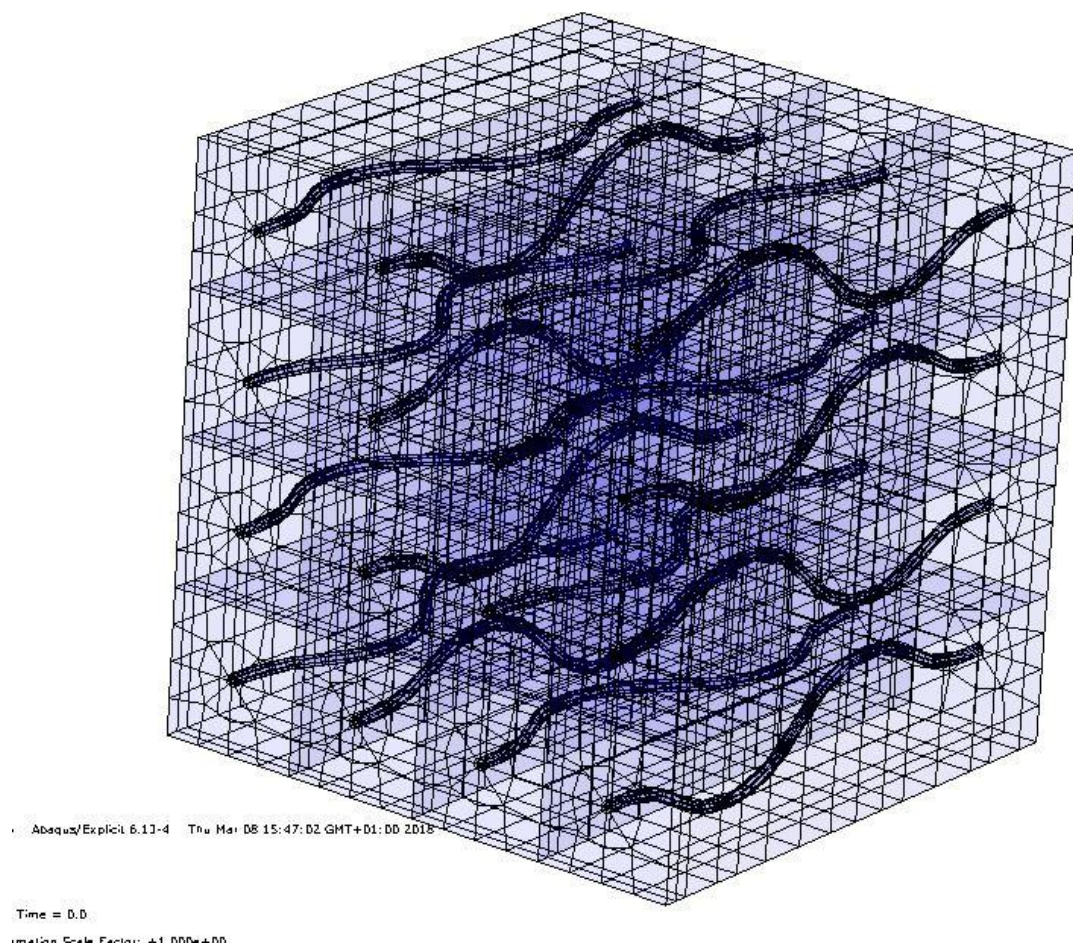
spojení jednotlivých uzlů vláken a segmentů pěny. Nakonec byly jednotlivé segmenty pěny s vláknem sestaveny do bloku. Každý segment pěny s vláknem byl natočen v různém úhlu podle podélné osy, jak je naznačeno na obr. 4.30, aby ohyby vláken směřovaly různým směrem. Nakonec byly jednotlivé segmenty spojeny vazbou TIE do bloku kompozitní pěny, uspořádání vláken v celém bloku kompozitní pěny je znázorněno na obr. 4.31 a deformace vláken při stlačení kompozitní pěny je uvedena na obr. 4.32.



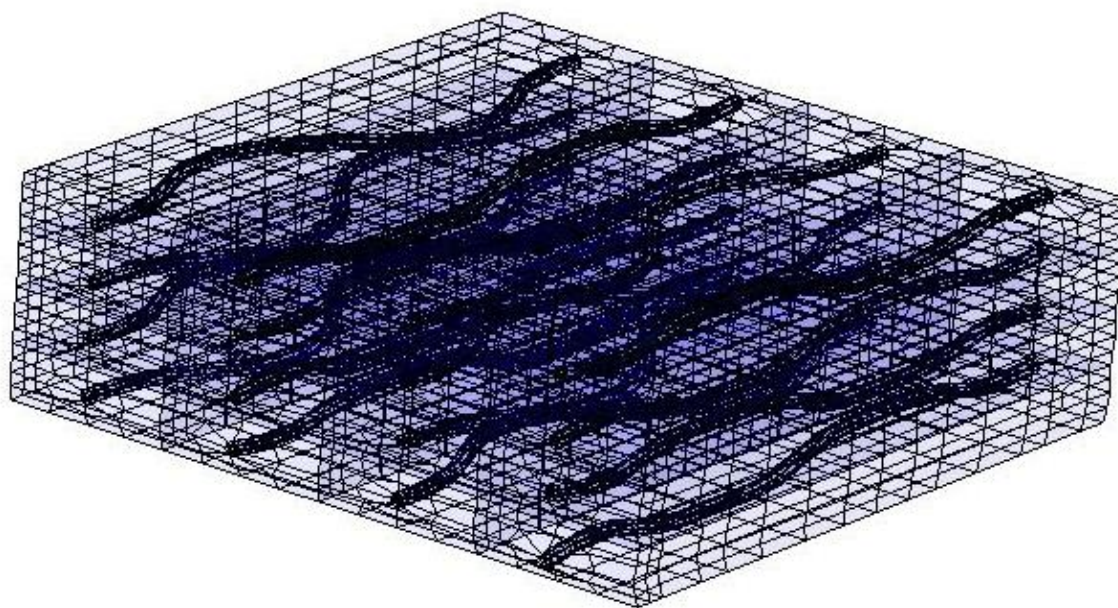
**Obr. 4.29** Geometrie vlákna, geometrie segmentu pěny



**Obr. 4.30** Natočení jednotlivých segmentů kompozitní PU pěny



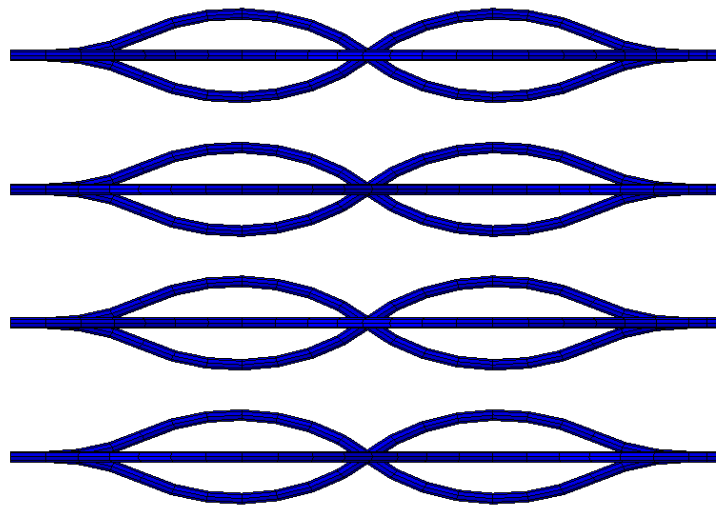
**Obr. 4.31** Uspořádání jednotlivých segmentů s vlákny do bloku kompozitní PU pěny



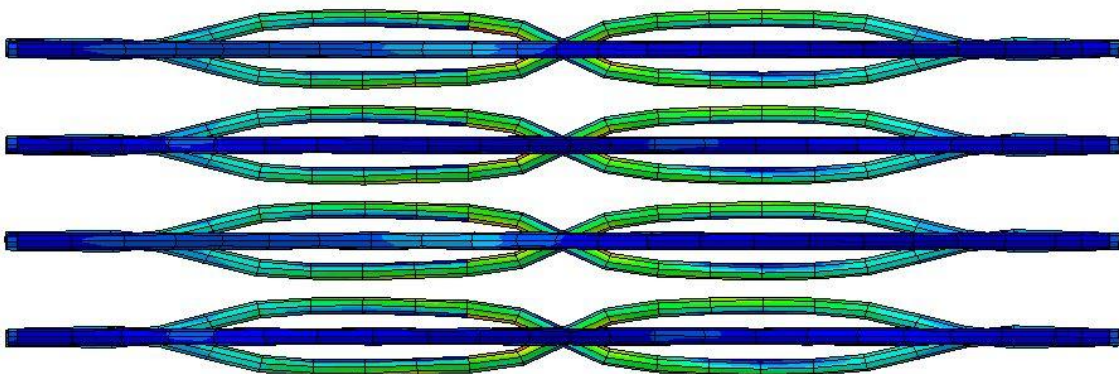
**Obr. 4.32** Deformace jednotlivých vláken při stlačení kompozitní pěny



Na obr. 4.33 je znázorněn boční pohled na uspořádaná vlákna v bloku nedeformované kompozitní pěny o rozměrech 20x20x20 mm. Z obrázku uspořádání je patrné, že mezi jednotlivými vlákny jsou dané minimální mezery vyplněné PU pěnou. Z počátku stlačování dochází zejména k deformaci PU pěny a vliv vláken není významný. Při stlačování se od 20 % začíná postupně projevovat vyztužující vliv vláken. Při dalším stlačování mají zvlněná vlákna tendenci se narovnávat, čemuž, do jisté míry brání pevné spojení vláken s PU pěnou. Vlákna jsou tedy namáhána krutem i ohybem a pěna je lokálně výrazně deformována, což se projevuje zvýšenou tuhostí kompozitní pěny. Při další deformaci se tento vliv nadále zvětšuje, dochází téměř ke kontaktu jednotlivých vláken, kdy je PU pěna mezi nimi stlačena na vysokou úroveň a chová se téměř jako dokonale tuhá. Na obr. 4.34 je uveden výsledek simulace zdeformovaných vláken při 70 % stlačení kompozitní pěny.

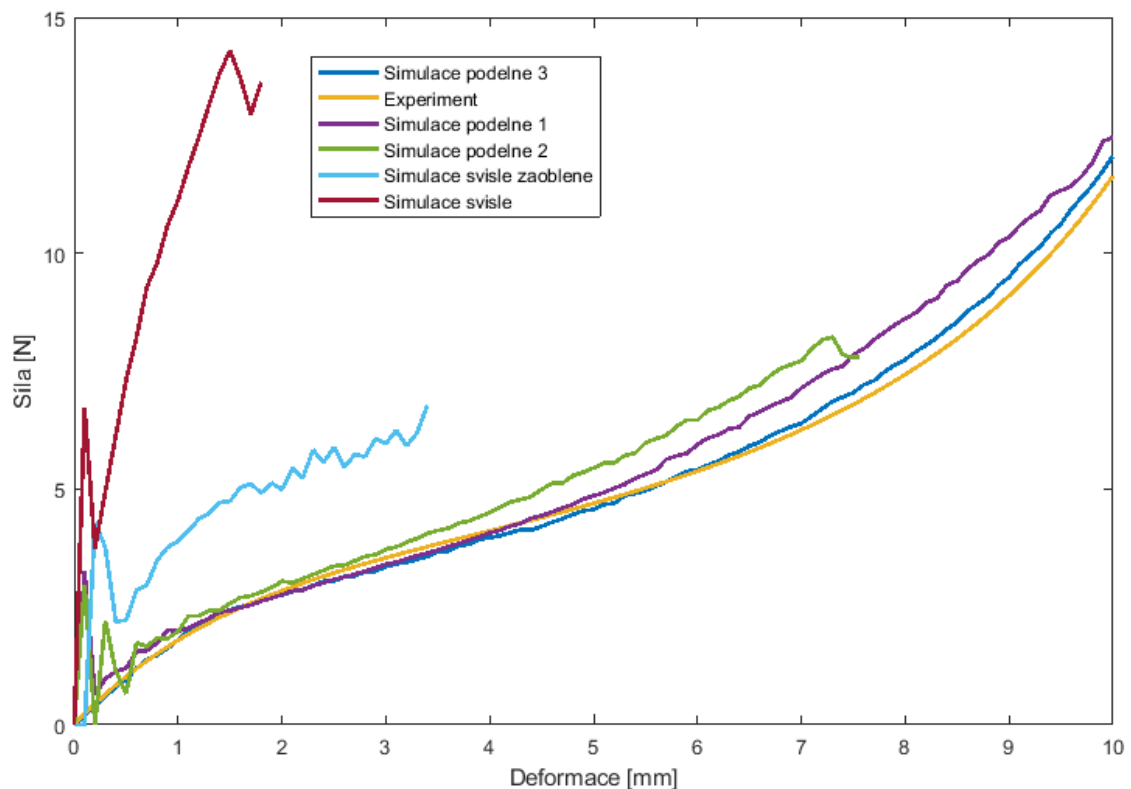


**Obr. 4.33** Uspořádání vláken z bočního pohledu



**Obr. 4.34** Deformovaná vlákna při 70 % stlačení pěny

V grafu obr. 4.35 jsou znázorněny průběhy stlačování vzorku kompozitní pěny. Křivka *simulace svisle* ukazuje průběh simulace se svisle uspořádanými rovnými vlákny, počáteční tuhost je výrazná, dochází k namáhání vláken tlakem, později dojde ke vzpěru vláken, dále již simulace nepokračovala z důvodu nestability. Křivka *simulace svisle zaoblene* ukazuje průběh simulace se zaoblenými svisle uspořádanými vlákny. Navýšení tuhosti je zde menší, při deformaci cca 3 mm došlo k ukončení simulace. Křivky *simulace podelne 1–3* ukazují průběhy simulací s podélnými vlákny s různými nastaveními vstupních parametrů, křivka *simulace podelne 3* ukazuje průběh simulace se vstupními parametry, jak uvádí tab. 4.4 a tab. 4.5. Křivka *experiment* ukazuje průběh síly v závislosti na stlačení získané z experimentu.

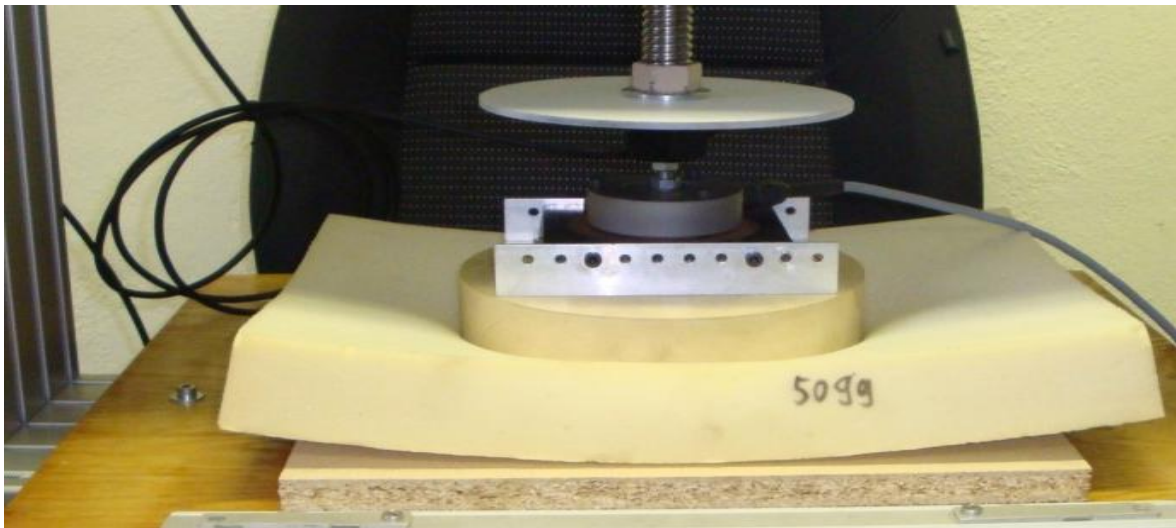


**Obr. 4.35** Porovnání výsledných průběhů stlačení simulací s experimentem

#### 4.5 Porovnání a verifikace MKP modelu na velkém vzorku

Pro kvalitativní posouzení materiálu byly vytvořeny větší vzorky čisté pěny (PU pěna) i kompozitní pěny s kokosovými vlákny (PUK pěna) o rozměrech 410x295x50 mm (rozměr je dán výrobními možnostmi), které více přibližují reálnou výplň komfortní vrstvy automobilové sedačky. Na těchto vzorcích byla provedena kvazistatická měření pro

verifikaci numerického modelu (obr. 4.36). Bylo provedeno stlačování vzorků válcovým indentorem o průměru 200 mm. Průběh zatěžování byl zvolen stejně jako při testování malých vzorků, stlačování probíhalo rychlostí 100 mm/min do 70 % deformace. Uspořádání experimentu je ukázáno na obr. 4.36. Následně byly vytvořeny numerické simulace odpovídající těmto měřením, přičemž okrajové a počáteční podmínky sestavené simulace byly provedeny obdobně, jako v případě malých vzorků. V tomto případě byl sestaven zjednodušený čtvrtinový model (symetrický model v hlavních rovinách symetrie), spodní pevná podložka a posuvný indenter byly modelovány jako nepružná tělesa (rigid body) pomocí shell elementů. Model pěny byl vytvořen jako plný blok z 3D elementů, z důvodu vysoké výpočetní náročnosti do modelu nebyla vkládána jednotlivá vlákna. Vliv vláken v kompozitu byl zohledněn zavedením odpovídající zatěžovací křivky z výsledků uvedených na obr. 4.35. Použité typy a velikosti elementů ovlivňující výsledný časový krok  $\Delta t$  simulace jsou uvedeny v tab. 4.6.

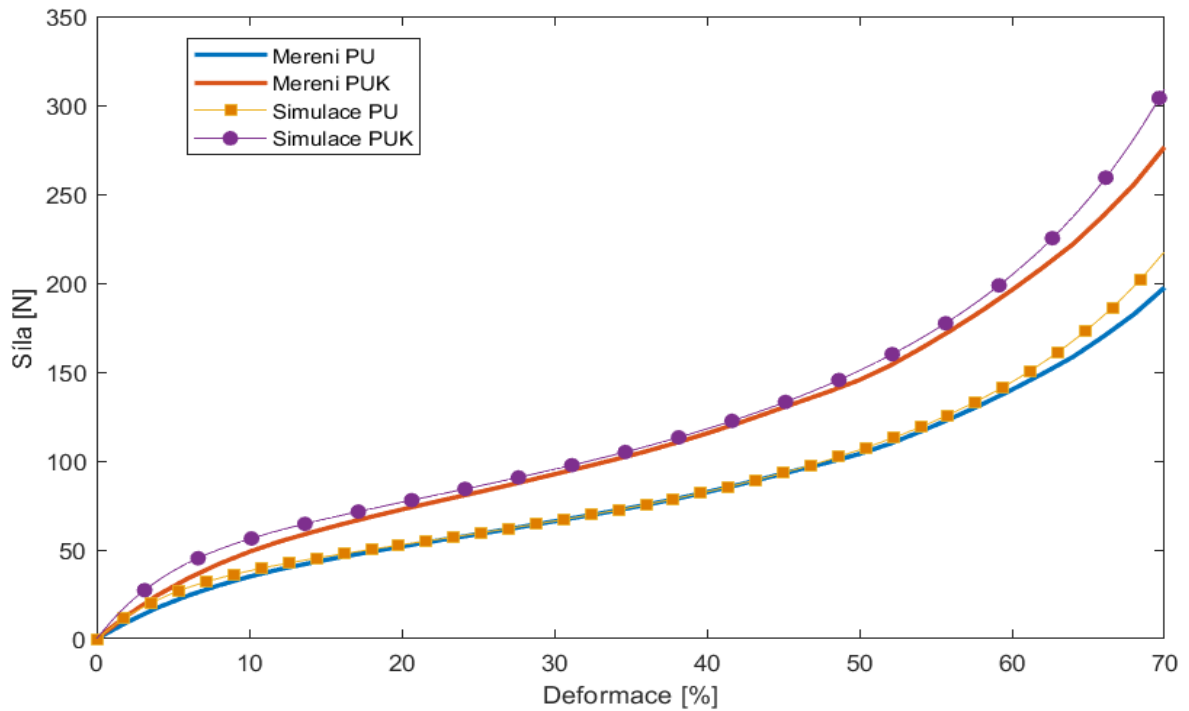


**Obr. 4.36** Uspořádání experimentu stlačování vzorku PU pěny kruhovým indentorem

**Tab. 4.6** MKP model stlačování bloku pěny

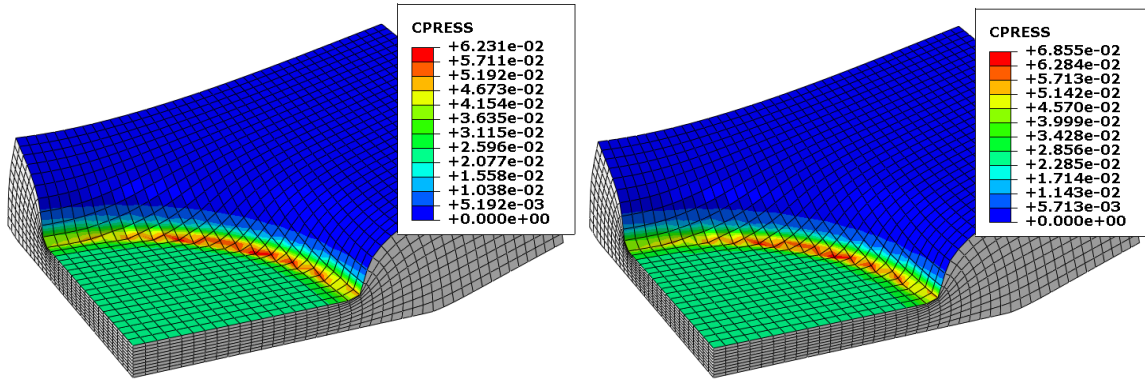
Model	Typ elementu	Velikost elementu [mm]	Počet elementů	Koeficient tření	Časový krok $\Delta t$ [s]
Podložka	S4R	5	1936	0,2	$7,26 \cdot 10^{-7}$
Indentor	S4R	2	2200	0,2	$1,62 \cdot 10^{-7}$
PU pěna	C3D8R	5	11890	0,2	$2,3 \cdot 10^{-6}$
PUK pěna	C3D8R	5	11890	0,2	$2,6 \cdot 10^{-6}$

Na obr. 4.37 jsou uvedeny výsledky průběhu síly při deformaci získaných z modelových simulací PU pěny a PU pěny + kokos v porovnání s experimenty. Výsledky modelu velmi dobře korespondují s experimenty a jsou statisticky významné s hodnotou koeficientu determinace  $R^2=0,991$  pro PU a  $R^2=0,983$  pro PUK.

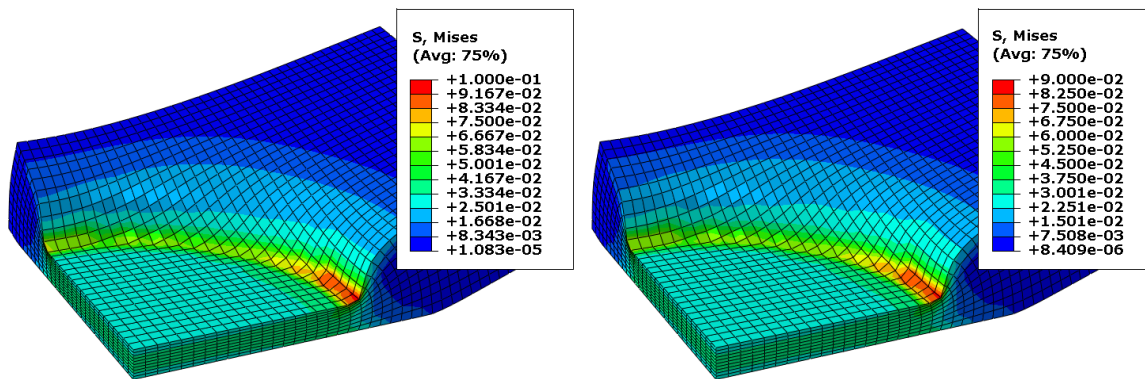


**Obr. 4.37** Porovnání průběhu stlačování bloku pěny experiment a MKP simulace

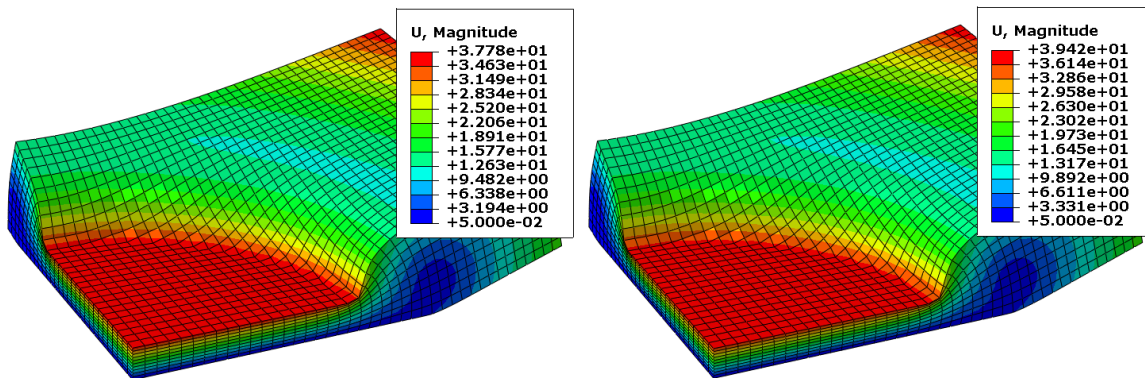
Pro posouzení kvality komfortní výplně automobilové sedačky je důležitým parametrem rozložení kontaktního tlaku mezi indentorem a vzorkem (obr. 4.38). Proto tento parametr byl porovnáván. Z výsledků uvedených na obr. 4.38 je patrné homogenní rozložení kontaktního tlaku. Což je rozdílné v porovnání s vláknovými recyklovatelnými kompozitními materiály jak uvádí [12], ale naopak podobné jako u běžných polyuretanových pěn. Z toho je patrné, že kontaktní tlak je ovlivněn typem povrchu, který má u kompozitních pěn buněčnou strukturu. Na obr. 4.39 a obr. 4.40 jsou ukázány výsledky rozložení napětí a deformace získaných z modelových simulací. Z výsledků je patrné, že vzorek kompozitní pěny se při stlačení výrazně deformuje a přetváří, což se projevuje prohnutím (vytlačení) struktury. Struktura se tedy přetváří rozdílně než u běžných polyuretanových pěn (bez plniv) [101]. Toto přetváření struktury vzorku bylo patrné i u experimentů.



**Obr. 4.38** Rozložení kontaktního tlaku a) v bloku čisté pěny b) v bloku kompozitní pěny



**Obr. 4.39** Rozložení napětí a) v bloku čisté pěny b) v bloku kompozitní pěny



**Obr. 4.40** Zobrazení celkového posunutí a) v bloku čisté pěny b) v bloku kompozitní pěny

## 4.6 Závěr kapitoly

Kapitola 4 se věnovala stanovení vybraných mechanických vlastností vyrobených zkušebních vzorků nízkohustotních kompozitních pěn s přírodními vlákny prostřednictvím měření a modelových simulací. Byly stanovovány parametry, které jsou důležité pro návrh a výběr materiálu pro konstrukci sedáku komfortní výplně automobilové sedačky. Nejprve byly sestaveny a realizovány měření vzorků pro studie odporu vůči cyklickému stlačení a relaxaci materiálu (kap. 4.2.1 a 4.2.2). Z výsledků plyne, že vzorek čisté polyuretanové

pěny při kvazistatickém stlačování a odlehčování vykazuje nelineární průběh zatěžující síly při stlačení. Při cyklickém stlačování můžeme pozorovat výrazně odlišný průběh síly při prvním zatěžovacím cyklu v porovnání s dalšími cykly (obr. 4.12), což je obdobné chování jako Mullinsův jev u pryžových materiálů. U pěnových materiálů je toto chování dáno tím, že se struktura materiálu nestihne vrátit do původního stavu. Porovnáním s pěnou s přírodními vlákny je patrné, že čistá polyuretanová pěna má nižší silovou odezvu při stlačení. Tedy pěna s přírodními vlákny má větší tuhost charakteristickou obdobným nelineárním průběhem při stlačování jako u PU pěny (obr. 4.16). Měření relaxace materiálu bylo provedeno na stejných vzorcích jako statické stlačování. Vzorek byl zatížen tuhou deskou do konstantní hodnoty deformace 70 %, kde byla po dobu 120 s měřena silová odezva materiálu. U všech testovaných vzorků se projevil výrazný pokles napětí na počátku měření, jak je uvedeno na obr. 4.17. Výsledky stanovily, že hodnota relaxace u vzorku čisté PU pěny je 37,9 N, u vzorků kompozitních pěn je hodnota relaxace téměř dvojnásobná 64,9 N (u PU pěny s kokosovými vlákny) a 68,5 N u PU pěny s vlákny africké trávy. Pomocí modelové simulace metodou konečných prvků byly vytvořeny strukturální modely umožňující studovat a vizualizovat rozložení napětí mezi vlákny a strukturou PU pěny. Numerické modely byly vytvořeny jak pro vertikálně stavěná vlákna, tak pro horizontálně kladená vlákna. Z výsledků bylo patrné, že svislá vlákna se při stlačování chovají zpočátku jako nosníky namáhané tlakem a výrazně zvyšují tuhost kompozitu. Při zvětšující se deformaci dojde ke vzpěru, tedy vybočení vláken, což se projeví sníženou tuhostí výsledné kompozitní pěny. To bylo porovnáno s experimenty, kde se vzpěr projeví takřka okamžitě po začátku stlačování z důvodu nehomogenit pěny i vláken a nerovnoměrného uspořádání vláken. Simulace nízkohustotní pěny s horizontálně kladenými vlákny ukázaly, že při stlačování se od 20 % začíná postupně projevovat vyztužující vliv vláken. Při dalším stlačování mají zvlněná vlákna tendenci se narovnávat, čemuž, do jisté míry brání pevné spojení vláken s PU pěnou. Vlákna jsou tedy namáhána krutem i ohybem a pěna je lokálně výrazně deformována, což se projevuje zvýšenou tuhostí kompozitní pěny (obr. 4.35). Také byly porovnány velikosti rozložení kontaktního tlaku mezi indentorem a vzorkem. Z výsledků uvedených na obr. 4.38 je patrné homogenní rozložení kontaktního tlaku. Což je rozdílné v porovnání s vláknovými recyklovatelnými kompozitními materiály [12]. Z toho je patrné, že kontaktní tlak je ovlivněn typem povrchu, který má u kompozitních pěn buněčnou strukturu. Stanovené výsledky přispěly k výběru materiálu pro konstrukci výplně komfortní vrstvy sedáku automobilové sedačky.

## **5. Konstrukční návrh výplně automobilové sedačky z kompozitní nízkohustotní pěny s přírodními vlákny**

Obsahem této kapitoly je konstrukční návrh a testování výplně automobilové sedačky z kompozitní nízkohustotní pěny vyplněné kokosovými vlákny. V úvodu jsou uvedeny sestavené MKP simulace pro studii a porovnání mechanických vlastností konstrukce sedáku z PU pěny a z kompozitní nízkohustotní pěny vyplněné kokosovými vlákny. Následně byla provedena realizace konstrukčního návrhu funkčního vzorku výplně automobilové sedačky. Závěrem byly navrženy a sestaveny experimentální zařízení pro testování výplní i celých sedaček s ohledem na energetickou náročnost provozu zařízení a byly porovnány staticky i dynamicky komfortní vlastnosti referenčního vzorku sedáku z PU pěny a funkčního vzorku sedáku automobilové sedačky z kompozitní nízkohustotní pěny vyplněné kokosovými vlákny.

### **5.1 Konstrukční návrh a realizace funkčního vzorku výplně automobilové sedačky**

Analýzy a měření vzorků uvedené v kap. 4 vedly k výběru nízkohustotní pěny s kokosovými vlákny, která se jeví jako vhodná pro návrh a realizaci konstrukce funkčního modelu sedáku komfortní výplně. Pro konstrukční návrh a optimalizace funkčního vzorku výplně automobilové sedačky z kompozitní nízkohustotní pěny s přírodními vlákny byly nejprve sestaveny modelové simulace pomocí metody konečných prvků.

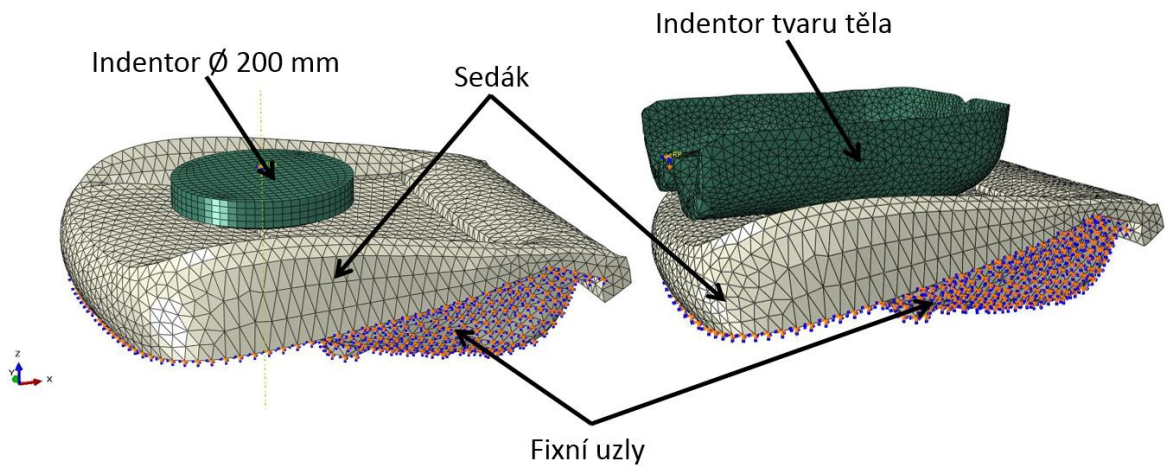
#### **5.1.1 MKP simulace vzorku výplně automobilové sedačky z kompozitní nízkohustotní pěny s přírodními vlákny**

Provedly se modelové simulace vybraného materiálu kompozitní nízkohustotní pěny s přírodními vlákny konkrétně s kokosovými vlákny. Numerický model funkčního vzorku výplně automobilové sedačky byl vytvořen na základě reálné geometrie sedáku v následujících krocích:

- sestavení kontaktní úlohy pro studii mechanických vlastností sedáku při stlačování indentorem (kruhový indentor, indentor tvaru těla),
- vytvoření odpovídající konstrukce sítě konečných prvků výpočetního modelu v preprocesoru s importováním datového souboru do prostředí softwaru Abaqus,

- definování odpovídajících počátečních a okrajových podmínek,
- vyhodnocení a porovnání výsledků modelových simulací v postprocesoru.

Samotná síť konečných prvků sedáku byla vytvořena z 3D prvků tetrahedronů. Konstrukce sítě výpočetního modelu je uvedena na obr. 5.1. Kruhový indentor byl vytvořen z 3D prvků hexahedronů a indentor tvaru těla z 2D Shell elementů. Označení a velikost elementů jsou uvedeny v tab. 5.1.



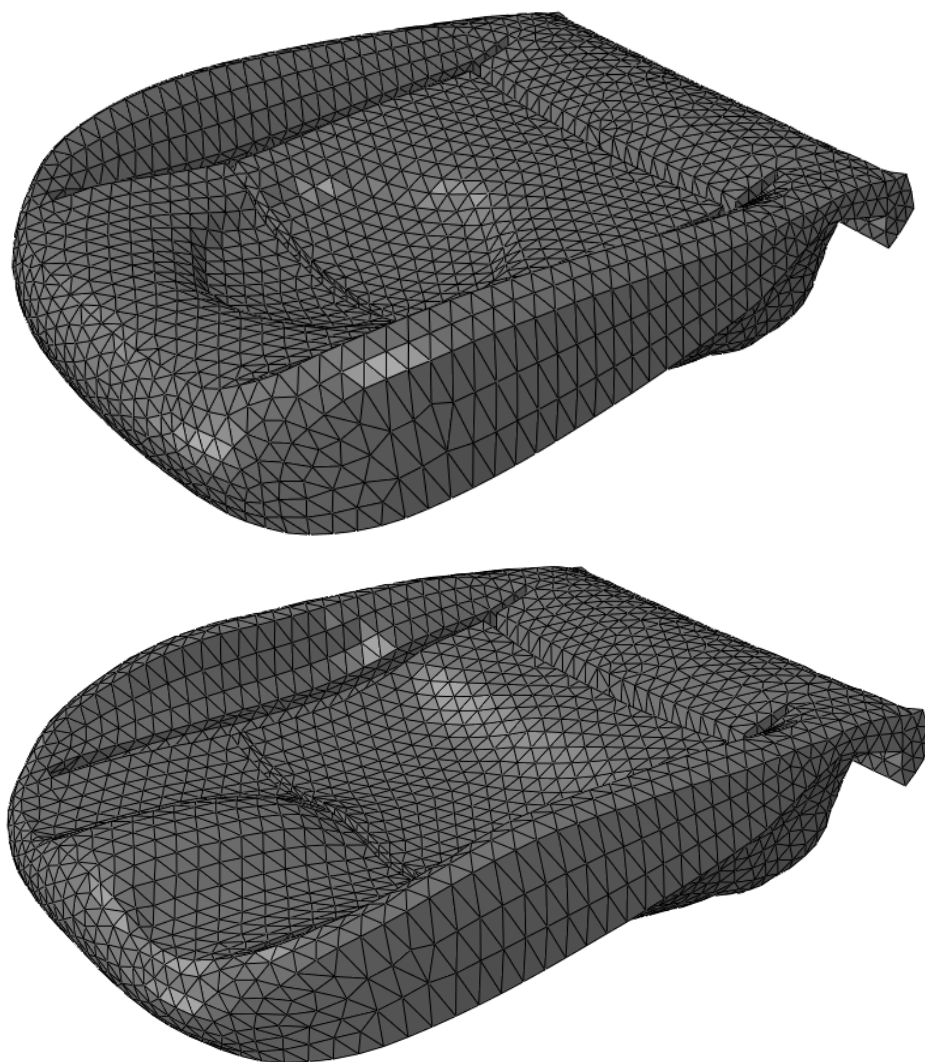
**Obr. 5.1** MKP model stlačování sedáku kruhovým indentorem a indentorem tvaru dolních končetin

**Tab. 5.1** MKP model stlačování sedáku kruhovým indentorem a indentorem tvaru dolních končetin

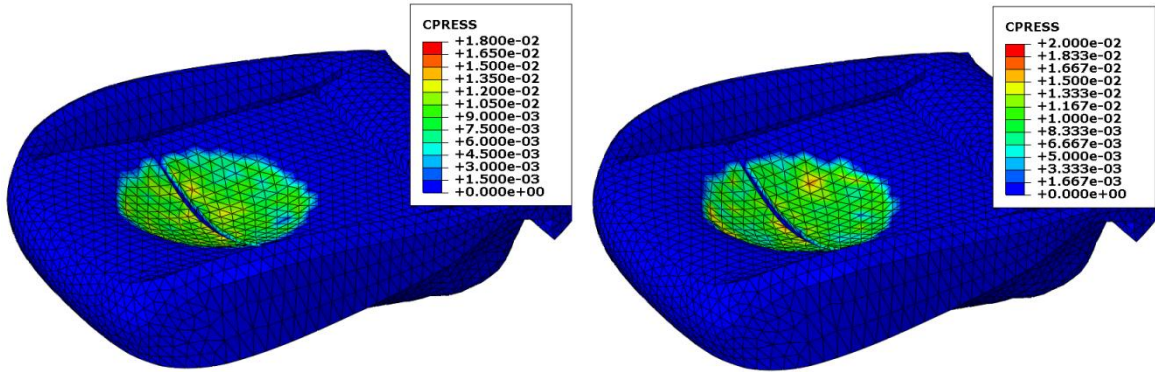
Model	Typ elementu	Velikost elementu [mm]	Počet elementů	Koeficient tření	Časový krok $\Delta t$ [s]
Kruhový indentor	C3D8R	10	536	0,2	$9,41 \cdot 10^{-7}$
Tvarovaný indentor	S3R	5	5208	0,2	$6,53 \cdot 10^{-7}$
Sedák s PUK	C3D4	8	20295	0,2	$6,82 \cdot 10^{-6}$
Sedák s PU	C3D4	8	20295	0,2	$7,12 \cdot 10^{-6}$



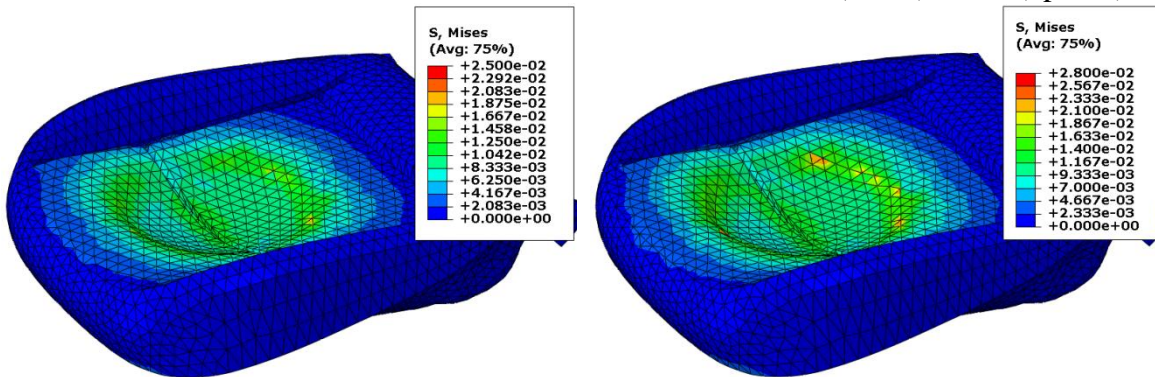
Okrajové podmínky byly definovány tak, že na uzly spodní části výplně sedáku, která se opírá o konstrukci sedačky, byla aplikována fixní vazba  $U_i = 0$ ,  $R_i = 0$ . Do výplně byl kontaktně vtlačován válcový indentor a indentor vycházející z tvarů lidského těla. Mezi sedák a indentor byl aplikován kontakt s koeficientem tření 0,2. Vzhledem k nerovnoměrné výšce výplňového materiálu, která se pohybuje v rozmezí od 50 do 80 mm, byla zvolena hloubka vtlačování indentoru 35 mm, což odpovídá 70 % výšky výplně v nejnižším místě. Deformace sedáku s PUK od indentorů je uvedena na obr. 5.2. Na následujících obrázcích (obr. 5.3 – obr. 5.7) jsou uvedeny výsledky rozložení kontaktních tlaků, napětí a deformace od obou indentorů, které byly porovnány se sedákem z PU pěny.



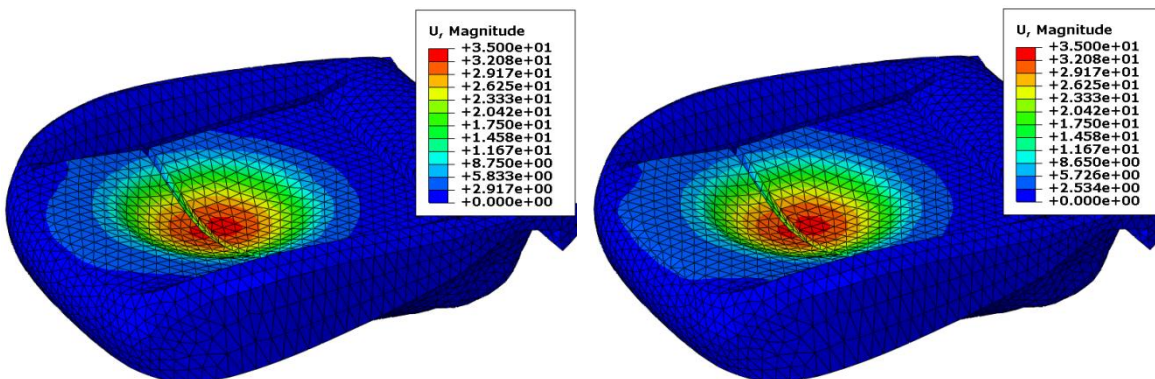
**Obr. 5.2** Rozložení deformace v sedáku s PUK zatěžovaném kruhovým indentorem (nahore) a indentorem tvaru těla (dole)



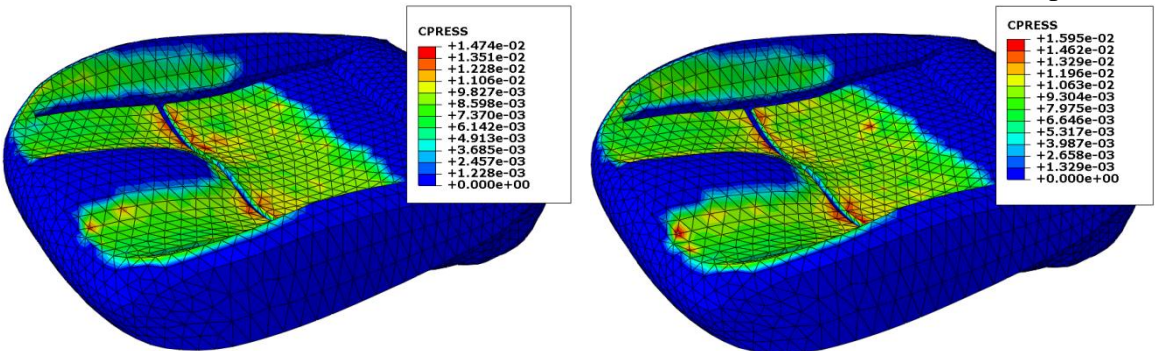
Obr. 5.3 Rozložení kontaktního tlaku od kruh. indentoru: PU (vlevo), PUK (vpravo)



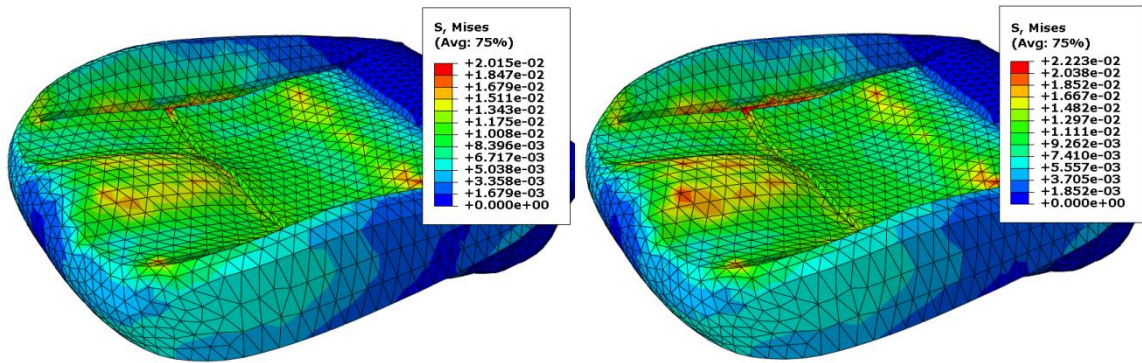
Obr. 5.4 Rozložení napětí od kruh. indentoru: PU (vlevo), PUK (vpravo)



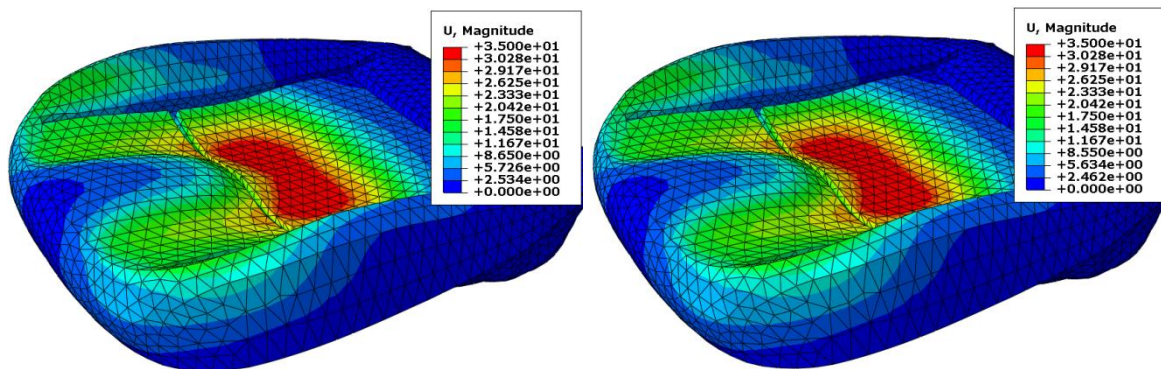
Obr. 5.5 Zobrazení celkového stlačení od kruh. indentoru: PU (vlevo), PUK (vpravo)



Obr. 5.6 Rozložení kontaktního tlaku od indentoru tvaru dolních končetin: PU (vlevo), PUK (vpravo)



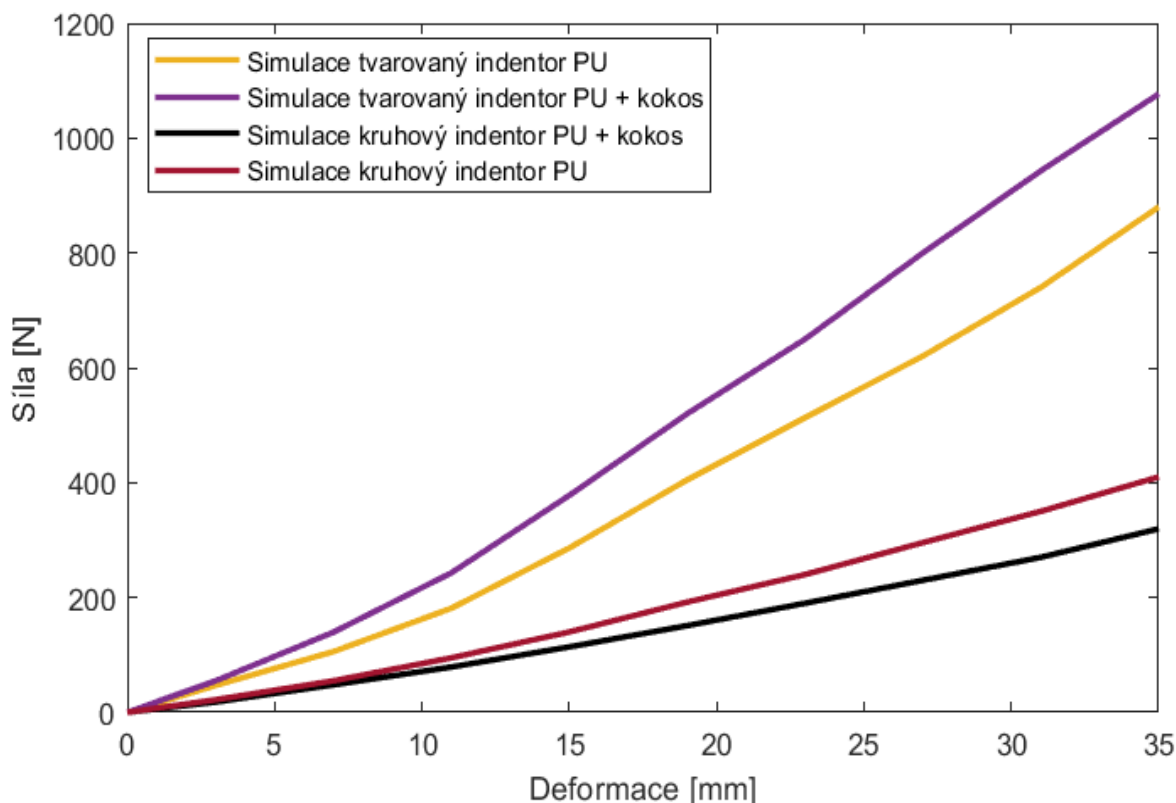
**Obr. 5.7** Rozložení napětí od indentoru tvaru dolních končetin: PU (vlevo), PUK (vpravo)



**Obr. 5.8** Zobrazení celkového stlačení indentorem tvaru dolních končetin: PU (vlevo), PUK (vpravo)

Z výsledků modelových simulací při celkovém stlačení indentoru do 35 mm je patrné, že přetvoření pěny ve směrech kolmých na směr stlačení vede k rovnoměrné distribuci kontaktního tlaku (obr. 5.3 a obr. 5.6). To se projeví i téměř rovnoměrným rozložením napětí jak u vzorku sedáku z PU pěny, tak i z PUK pěny. Kontaktní tlak od kruhového indentoru u vzorku sedáku z čisté pěny dosahuje hodnoty 18 kPa, zatímco u PUK pěny je to cca o 11 % vyšší, tedy 20 kPa. V případě indentoru tvaru dolních končetin dosahuje kontaktní tlak u vzorku sedáku z čisté pěny hodnoty 14,74 kPa, zatímco u PUK pěny je to cca o 8 % vyšší, tedy 15,95 kPa, přesto se jedná o nižší hodnotu v porovnání s kruhovým indentorem. Napětí vyhodnocené podle hypotézy HMM (Huber-Mises-Hencky) zobrazuje hodnotu 25 kPa pro PU pěnu a 28 kPa pro PUK od zatížení kruhovým indentorem a při zatížení od indentoru spodních končetin byla hodnota 20,1 kPa pro PU pěnu a 22,2 kPa pro PUK. Z toho plyne, že rozložení a velikost kontaktního tlaku je ovlivněno tvarem geometrie zátěže a charakteristickou tuhostí materiálové struktury. To je patrné na obr. 5.9, kde je uvedeno porovnání síly na deformaci od daného indentoru. Z průběhů síly je

charakteristický nelineární průběh, přičemž větší silovou odezvu má PUK pěna, a tedy PUK pěna bude mírně tužší. To však z hlediska komfortu sezení nemusí být v této velikosti tuhosti problém, a proto je důležité navrhnout funkční model konstrukce sedáku z kompozitní nízkohustotní pěny vyztužené 5 % přírodními kokosovými vlákny pro ověření jednak modelu a jednak reálných komfortních vlastností.



**Obr. 5.9** Výsledné průběhy síly získané z MKP simulací

### 5.1.2 Realizace funkčního vzorku výplně automobilové sedačky z kompozitní nízkohustotní pěny s kokosovými vlákny

Realizace funkčního vzorku výplně automobilové sedačky z kompozitní nízkohustotní pěny s kokosovými vlákny se provedla za účelem splnění cíle disertační práce a také k získání ucelených informací o mechanických vlastnostech. Byl vyroben funkční vzorek kompletního sedáku automobilové sedačky vozu Škoda Fabia. Při výrobě funkčního vzorku byl kladen důraz také na způsob a možnosti výroby nejen v laboratorních podmínkách, ale také pro průmyslové podmínky. Neboť problémem zejména průmyslové výroby (hromadné) je zařazení další operace – vložení vlákenné

výztuže. Průmyslová výroba sedaček z polyuretanové pěny je realizována pomocí stroje, na kterém jsou umístěny uzavíratelné formy pro sedáky a opěráky, popř. jsou-li sedák a opěra spojeny v jeden celek, je zde pouze jedna párová forma. Formy se pohybují po uzavřené křivce obvykle ve tvaru oválu. Výrobní cyklus se skládá z následujících operací. Nejprve je forma očištěna od zbytků pěny. Poté je do formy nanesen separátor, který sníží adhezi pěny k povrchu formy, zamezí jejímu nalepení a umožní snadné vyjmutí výrobku. Separátor se aplikuje nástřikem pomocí nízkotlaké stříkací pistole nesené robotem. Pokud je tvar formy příliš komplikovaný a počet stupňů volnosti robota by neumožnil dokonalé pokrytí vnitřního povrchu formy separátorem, je na problematická místa separátor nanesen ručně. Poté se do formy vloží přichytky potahů. Jsou ve formě ocelových či jiných pružných drátů, které se zapění. Požadovanou vzdálenost zajišťují vhodně řešené distanční vložky, které zároveň vytvoří v pěně volný prostor umožňující v požadovaných místech volný přístup k drátu při upevňování potahu. Důvodem tohoto řešení je zajištění pevného ukotvení potahu nejen po okrajích sedačky, ale také v ploše. To zajistí, že při zrychlení nedochází ke shrnování potahu a po odlehčení sedačky se na potahu nevytvoří vrásky, které jsou nejen neestetické, ale také nekomfortní. V opačném případě by byl drát zapněn těsně pod povrchem pěny a při namáhání by mohlo dojít k jeho snadnému vytržení a destrukci výrobku. Další operací je vložení textilní výztuže. Ta je nejčastěji v podobě netkané textilie vyrobené vpichováním nebo technologií spunbond. Cílem je vyztužit ta místa, kde lze předpokládat tahová napětí, které PU pěna přenáší jen velmi omezeně. Vyztužení je pouze na povrchu pěny. **V této fázi je možné vkládat materiál, který vyztuží pěnu v jejím objemu.** Při návrhu uspořádání vrstvy je třeba vycházet ze skutečnosti, že výsledného objemu výrobku z polyuretanové pěny je docíleno pomocí nadouvadla. Tím je v případě polyuretanu oxid uhličitý, který vzniká reakcí izokyanátu s vodou. Jedná se tedy o chemické nadouvadlo. Ve formě pěna nabude zhruba patnáctinásobně. Přestože vlákenné výztuže bude vloženo pouze 5 % hm., pro tvořící se pěnu toto množství může znamenat změnu objemové hmotnosti a tím i vlastností pěny. Proto bude i množství vstupních surovin sníženo o 5 % hm. **V závislosti na způsobu orientace vláken lze připravit víceméně homogenní uspořádání nebo uspořádání, ve kterém převládá orientace vláken pouze v jednom směru.** Druhý zmíněný způsob byl vybrán pro realizaci funkčního vzorku. Vlákenná vrstva byla připravena mykáním na laboratorním válcovém mykacím stroji ve spolupráci s Katedrou netkaných a nanovlákných materiálů Fakulty textilní, který zajistí sjednocení vláken a jejich paralelní uspořádání. Připravená vlákenná

výztuž byla navrstvena v takovém počtu, aby bylo dosaženo požadované hmotnosti. Takto připravená vrstva byla vložena do formy a následně byla nadávkována směs pro výrobu PU pěny. Forma byla uzavřena a takto ponechána 120 sekund, aby došlo k napěnění na požadovaný objem. Po otevření formy byl sedák vyjmut a ponechán ve volném stavu 48 hodin k dozrání. Na obr. 5.10 je uveden vyrobený funkční vzorek výplně automobilové sedačky z kompozitní nízkohustotní pěny s kokosovými vlákny.

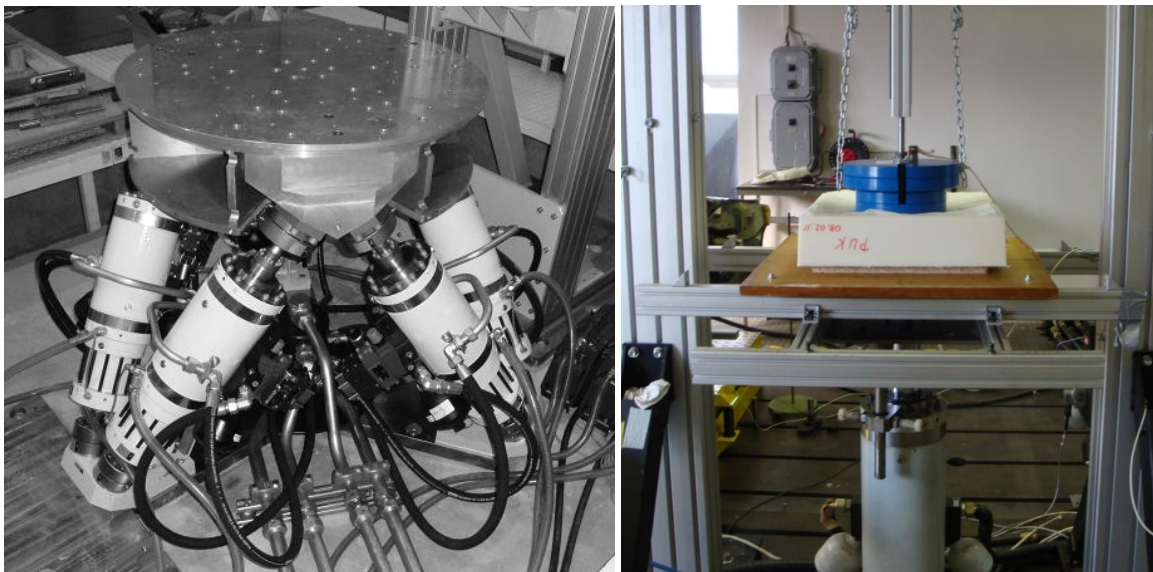


**Obr. 5.10** Funkční vzorek výplně automobilové sedačky z kompozitní nízkohustotní pěny s kokosovými vlákny

Je nutné zmínit, že převážná část výrobních operací se odehrává přibližně jen v jedné třetině dráhy zařízení, zbytek je využit pro dokonalé vypěnění celého prostoru formy. Délka a rychlost pohybu určuje také počet forem, které lze použít a tím i počet vyrobených kusů, resp. čas výroby (takt). V případě, že kompozitní pěna vyztužená rostlinnými vlákny se ukáže jako výhodná pro použití, bylo tímto experimentem potvrzeno reálné začlenění procesu vkládání vyztužné vlákenné vrstvy i samotné vyrobiteľnosti takto vyztužené pěny.

## 5.2 Experimentální testování funkčního vzorku výplně automobilové sedačky

Pro měření vlastností vzorků i celých automobilových sedaček byla navržena experimentální zařízení pro statické a dynamické testování. Hlavním důvodem konstrukce měřících zařízení bylo rozšíření a modernizování funkčních měřících systémů pro měření automobilových sedaček, které v minulosti [12], [20] byly navrhovány s ohledem na možnosti hydrodynamické laboratoře TUL (HDL). Konstrukce nových měřících zařízení se navrhovala s ohledem na možnosti měření nezávisle na současných hydromotorech v HDL. Hydromotory instalované v HDL jsou využívány zejména na testování větších konstrukčních celků (např. celých automobilových sedaček, rámu karoserie, atd.), kde je zatěžování poměrně velkými silami (obr. 5.11). Také lze konstatovat, že prostřednictvím nových zařízení pro testování můžeme docílit snížení vysoké energetické náročnosti hydromotorů. Zejména se to projeví pro testování malých vzorků jako mohou být PU pěny do velikostí řádově 500 x 500 x 100 mm.

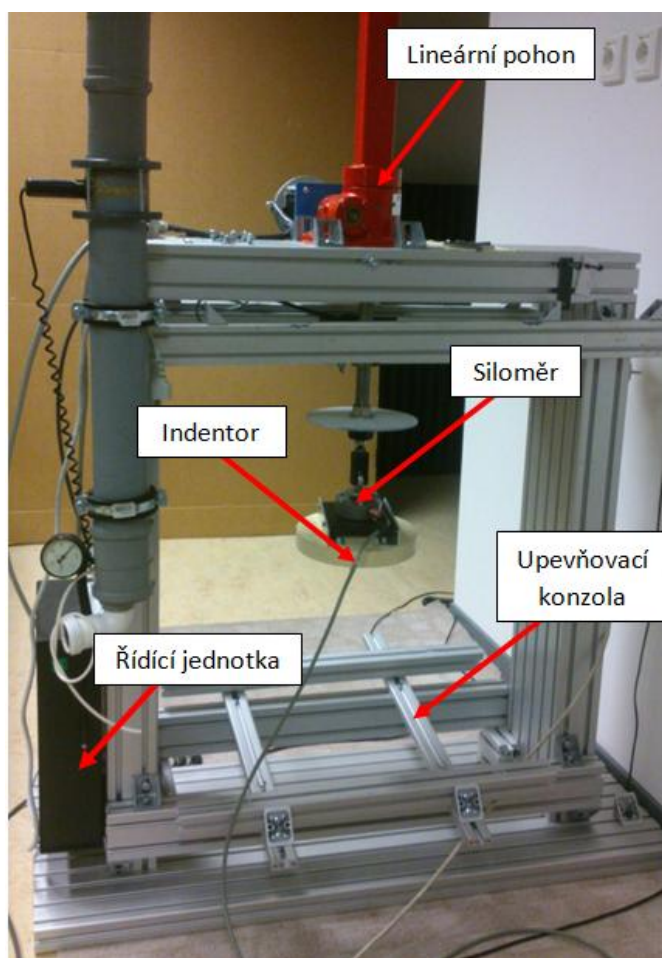


Obr. 5.11 Plošina se šesti stupni volnosti, hydromotor

### 5.2.1 Statické testování funkčních vzorků výplně

Nejprve bylo navrženo a zkonstruováno zařízení pro statické testování funkčních vzorků výplně, které je uvedeno na obr. 5.12. Zařízení je určeno k měření statických nebo kvazi-statických mechanických vlastností komfortní výplně sedaček. Na zkonstruovaném zařízení lze měřit vzorky různé velikosti nebo na celé výplně sedačky. Samotná konstrukce je tvořena montovaným rámem ze standardních hliníkových profilů. Ve spodní části se nachází konzole přizpůsobená pro upevnění různých typů automobilových sedaček nebo

přípravků pro testování různých vzorků. Na horní části rámu je umístěn šroubový aktuátor, který převádí rotační pohyb na lineární pohyb, 6 otáček vstupního hřídele, představuje 5 mm lineárního posuvu. Pohon je zajišťován krokovým motorem Microcon SX34-2740. Pro testování creepu a relaxace napětí je motor vybaven elektromechanickou brzdou. Krokový motor je ovládán řídicí jednotkou, která je umístěna na boku základního rámu. Motor je ovládán pomocí PC prostřednictvím protokolu RS485. Sběr měřených dat je zajištěn pomocí PC prostřednictvím DAQ od firmy National Instruments připojené pomocí USB. Na posuvném konci šroubového aktuátoru je přes kloub umístěna příruba se snímačem síly, na přírubu lze umístit impaktory různých tvarů.



**Obr. 5.12** Experimentální statické zařízení funkčních vzorků výplně

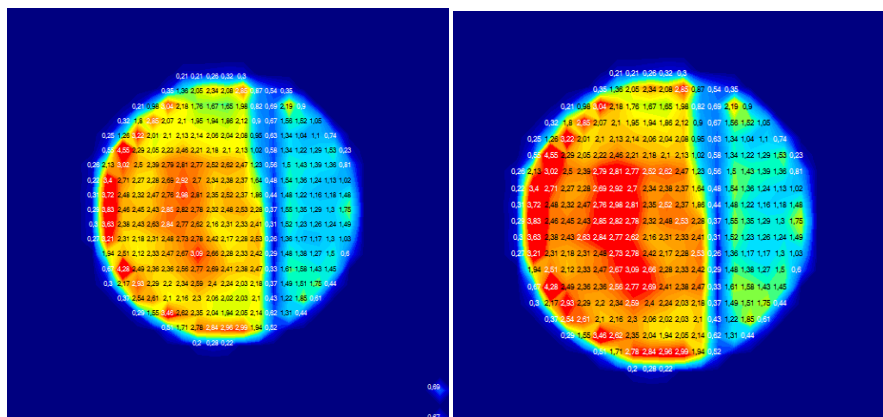
Pro porovnání funkčního vzorku výplně nízkohustotní kompozitní pěny vyztužené přírodními vlákny se vzorkem výplně PU pěny byly na testovacím zařízení provedeny měření rozložení kontaktního tlaku od indentoru kruhového tvaru a tvaru dolních končetin (stejný tvar a zatížení, jako bylo provedeno v MKP simulacích v kap. 5.1.1). Pro měření kontaktního tlaku byl využit X-Senzor (obr. 5.13). Z výsledků je patrné, že nejvyšší



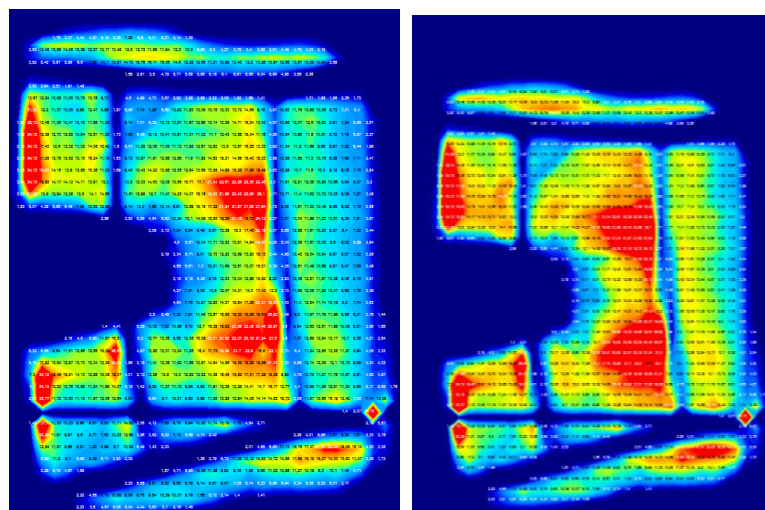
průměrné hodnoty kontaktního tlaku u výplně z PU pěny stlačované kruhovým indentorem respektive indentorem tvaru dolních končetin byly 11,1 kPa a 12,6 kPa. V případě pěny s kokosovými vlákny byly zjištěné hodnoty 12,5 kPa a 15,8 kPa, což znamená nárůst o 12,6 % a 25,4 % v porovnání s čistou PU pěnou.



Obr. 5.13 X-senzor pro měření rozložení kontaktního tlaku

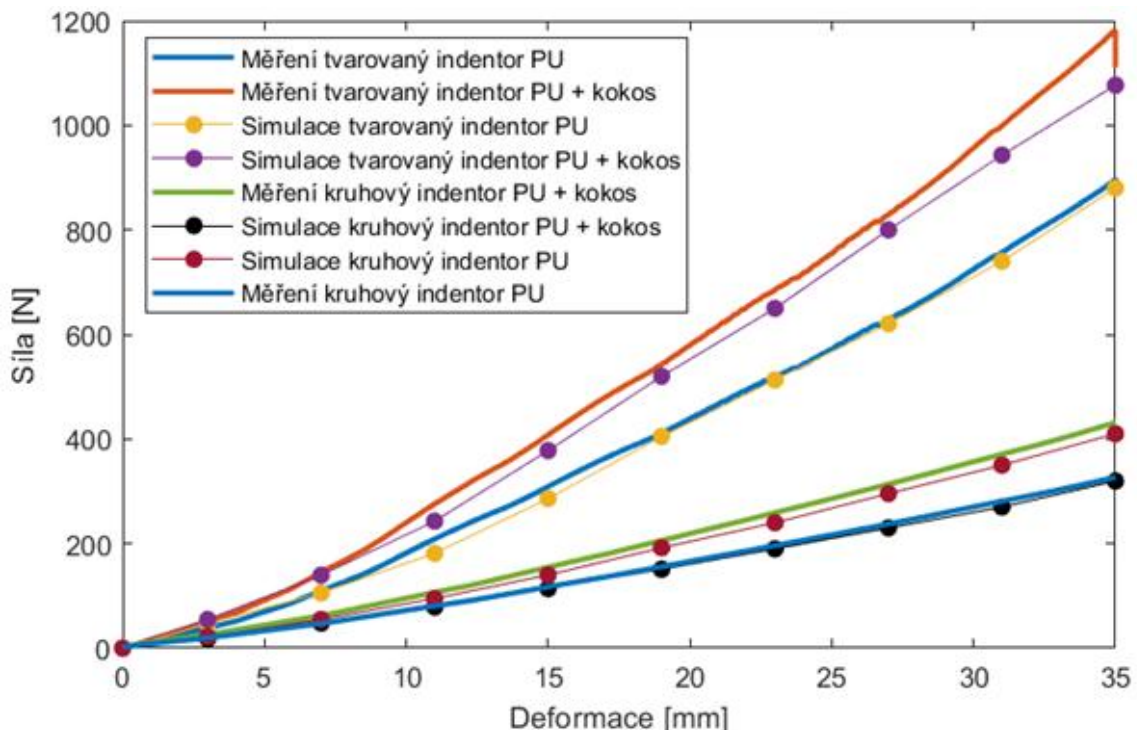


Obr. 5.14 Rozložení kontaktního tlaku – kruhový indenter (PU pěna vlevo, PUK vpravo)

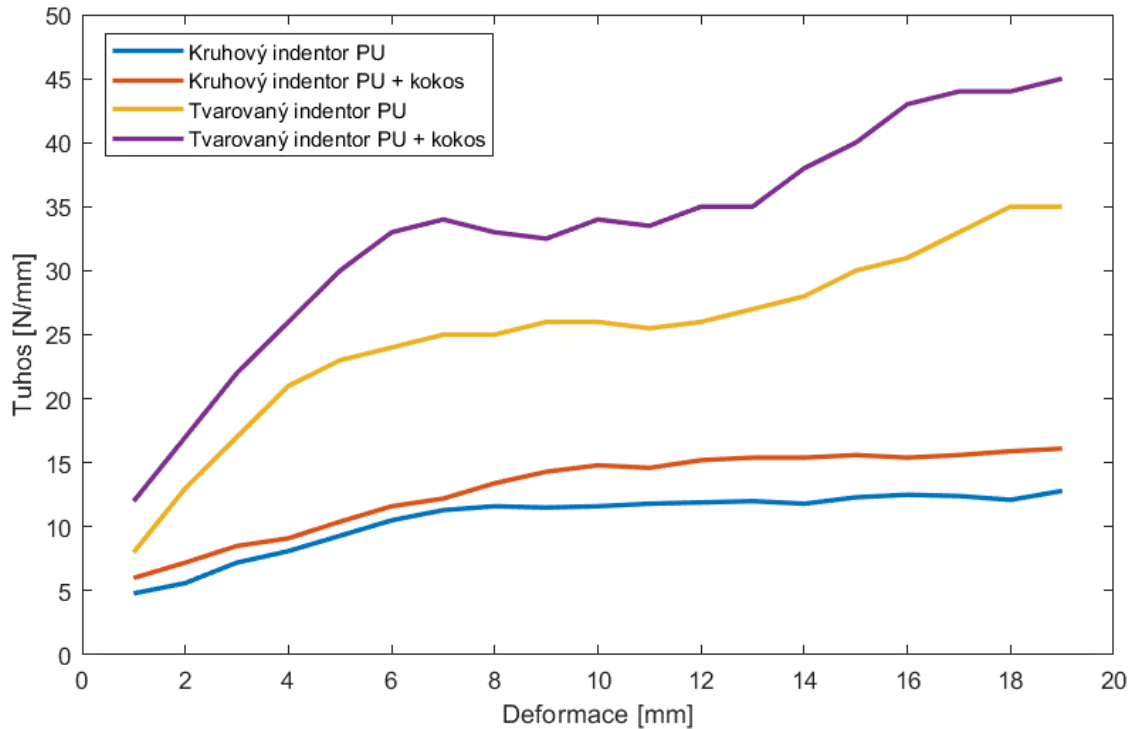


Obr. 5.15 Rozložení kontaktního tlaku – indenter tvaru dolních končetin (PU pěna vlevo, PUK vpravo)

V porovnání s MKP simulacemi uvedenými na obr. 5.3 a obr. 5.6 je patrné, že reálné vzorky mají hodnoty kontaktních tlaků téměř stejné, což odpovídá velmi dobré shodě výsledků porovnání síly na deformaci (obr. 5.16). V případě PU pěny byla síla 312 N při deformaci 35 mm kruhovým indentorem a 837 N při deformaci 35 mm tvarovým indentorem. V případě pěny s kokosovými vlákny byly zjištěné hodnoty 398 N při deformaci 35 mm kruhovým indentorem a 1189 N při deformaci 35 mm tvarovým indentorem, což znamená že pěna s kokosovými vlákny má větší silový odpor vůči statickému stlačení v porovnání s čistou PU pěnou. To charakterizuje průběh tuhosti při stlačení, který je uveden na obr. 5.17. Z průběhu tuhosti je patrné, že tuhost má rozdílný tvar oproti stlačování standardizovaného vzorku, jak bylo uvedeno na obr. 2.14, kap. 2. Je to dáno geometrickou plochou, která stlačuje pěnu. V případě kontaktu daného plochou tvarovkou dochází k výrazné nelinearitě projevující se viskoelastickým průběhem tzv. platem, tak při geometricky členité tvarovce je to spíše průběh blížící se lineární závislosti. Tedy lze konstatovat, že tuhost je mechanickým parametrem komfortu sezení, jenž je ovlivněna nejen strukturou stlačovaného materiálu, ale také typem indentoru resp. velikostí zatěžující kontaktní plochy.



**Obr. 5.16** Porovnání průběhů síly v závislosti na deformaci experiment a MKP simulace při stlačování kruhovým a tvarovým indentorem



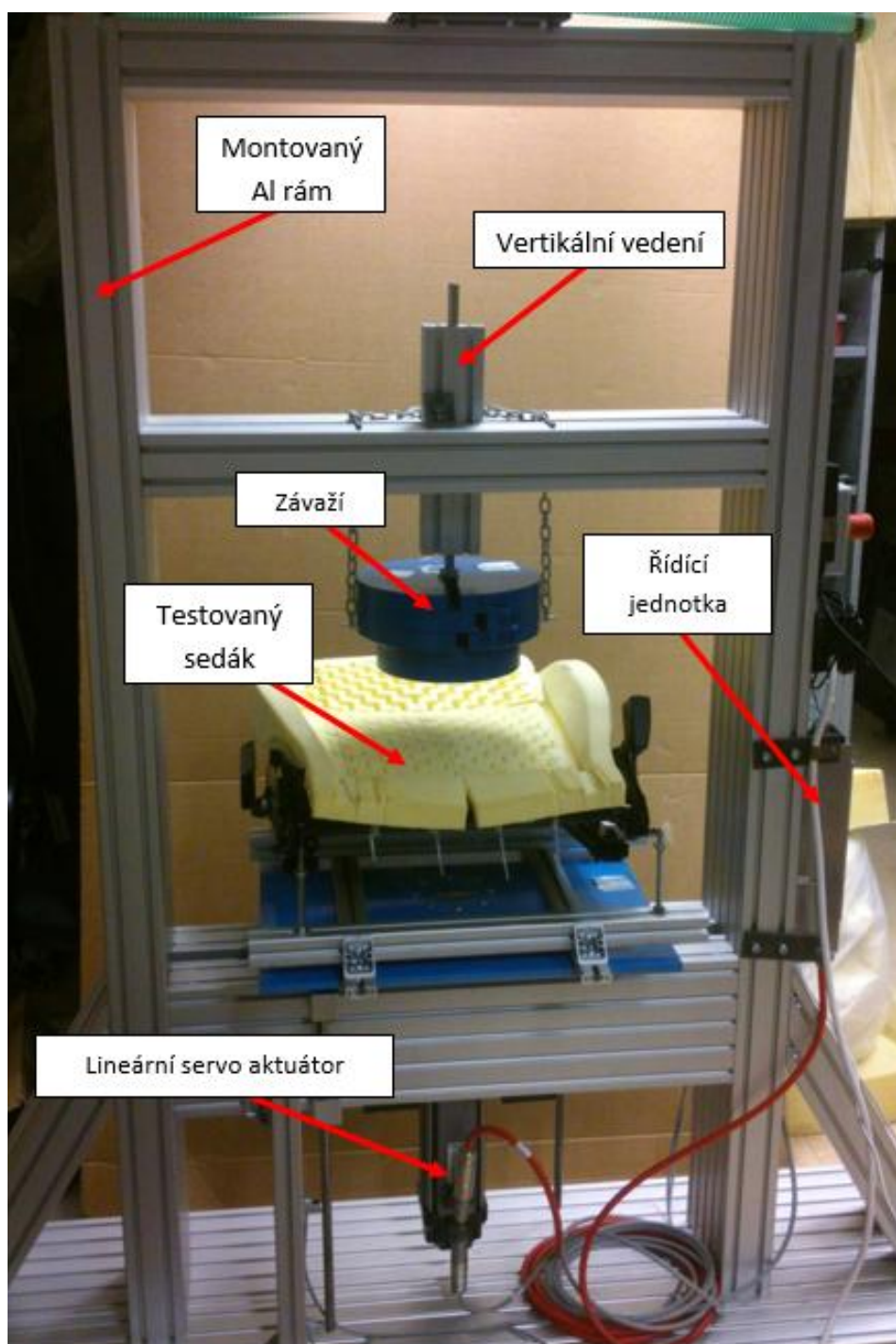
**Obr. 5.17** Průběhy tuhosti PU a PUK pěny získané z naměřených dat při stlačování kruhovým a tvarovým indentorem

### 5.2.1 Dynamické testování funkčních vzorků výplně pro krátkodobé cykly

Po statickém testování byl proveden konstrukční návrh a realizace zařízení pro dynamické testování funkčních vzorků výplně. Analýza dynamických vlastností komfortní vrstvy sedaček je velmi důležitá z hlediska dlouhodobého komfortu sezení, při prudkých přejezdech překážek, bezpečnosti atd. Pro analýzu těchto vlastností bylo sestaveno dynamické testovací zařízení, které je uvedeno na obr. 5.18. Základní částí dynamického testovacího zařízení je rám z hliníkových profilů. Ve střední části je umístěna lineární pohonná jednotka GSM30, jedná se o servoaktuátor založený na principu válečkového šroubu. Aktuátor umožňuje zdvih 150 mm rychlostí až  $250 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  při maximálním zatížení 1800 N. K výstupní tyči aktuátoru je připevněna příruba, která umožňuje upevnění celé sedačky nebo různých testovacích přípravků pro měření vzorků. Na sedačce (vzorku) je umístěno vertikálně vedené závaží. Zařízení je opatřeno dvěma akcelerometry, které snímají zrychlení na vstupu (příruba pro upevnění vzorků) a na výstupu (závaží). Pro toto dynamické experimentální zařízení byl vytvořen řídicí software v prostředí Matlab. Do řídicího softwaru byl pro testování implementován stacionární periodický signál. Tento signál je podle [42] vhodný pro laboratorní experimenty, při jeho použití je frekvenční

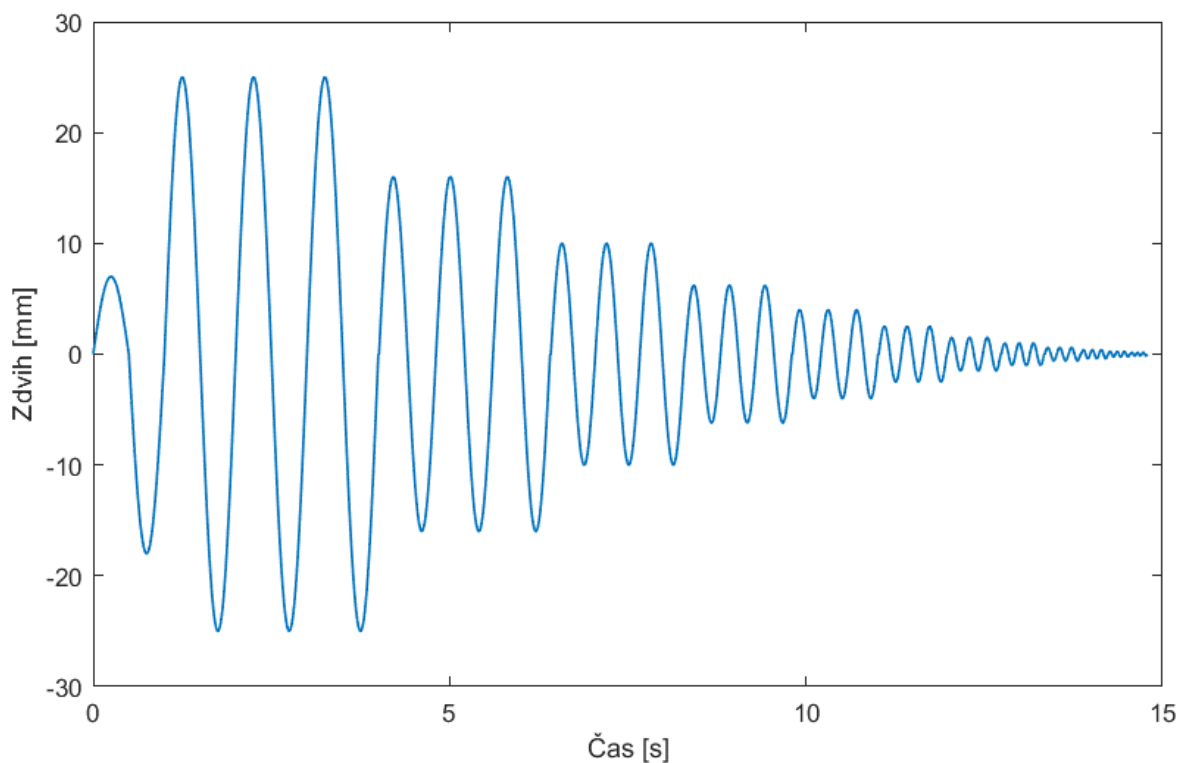
analýza nejjednodušší. Tento signál je vhodný i v případě testování na lidech [102], jelikož lze využít maximální hodnoty zrychlení na dané frekvenci a lze využít největší amplitudy sinusového signálu. Signál popisuje rovnice (5.1), kde  $z$  je zdvih,  $A$  amplituda,  $f$  frekvence,  $t$  čas.

$$z = A \sin(2\pi ft) \quad (5.1)$$



**Obr. 5.18** Experimentální dynamické zařízení funkčních vzorků výplně

Řídicí software umožňuje nastavení velikosti požadovaného zrychlení, velikost frekvenčního kroku a počet opakujících se period pro každou frekvenci. Následně je vygenerován signál obr. 5.19 obsahující daný počet frekvencí dle zadané maximální frekvence a frekvenčního kroku. Tento signál je, vzhledem k viskoelastickému chování testovaného materiálu, kdy dochází k fázovému posunu, vhodnější než spojitě laděný signál, u kterého by mohlo při vyhodnocování docházet ke ztrátě některých informací.



**Obr. 5.19** Stacionární periodický signál

V průběhu měření jsou ukládány hodnoty zrychlení na vstupu  $a_1(t)$  a hodnoty zrychlení na výstupu  $a_2(t)$ . Pro získání přenosových charakteristik je nutné provést analýzu naměřených zrychlení  $a_1(t)$  a  $a_2(t)$ . Výkonová spektrální hustota signálu (PSD) charakterizuje rozdělení výkonu signálu v závislosti na frekvenci. Jde o limitu podílu výkonu připadajícího na interval kmitočtů k délce tohoto intervalu. Odhad výkonové spektrální hustoty lze určit pomocí rychlé Fourierovy transformace (FFT) [103], podle rovnice (5.2).

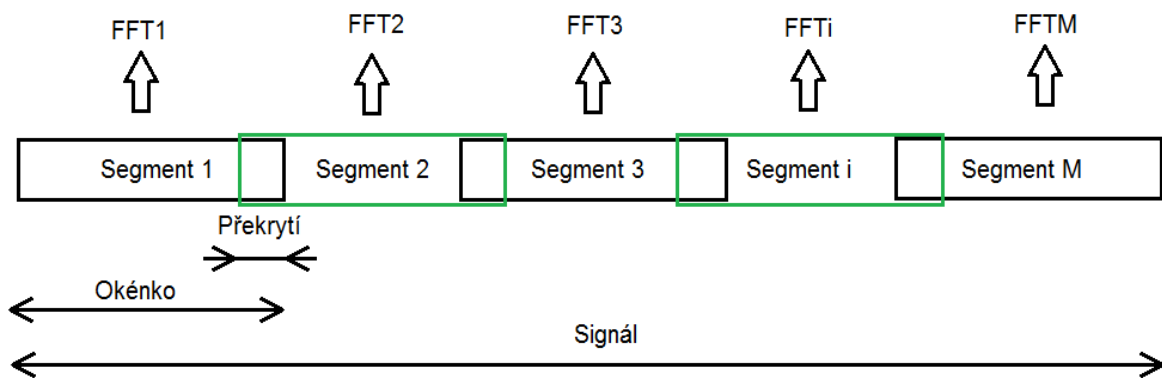
$$PSD = \frac{[FFT(x, N_s)]^2}{N} \quad (5.2)$$

Kde  $x$  je analyzovaný signál,  $N_s$  je počet bodů FFT,  $N$  je počet vzorků signálu  $x$ . Je-li počet vzorků  $N$  příliš velký, dochází k rozptýlení frekvenčního spektra. Aby bylo tomuto

rozptylu zamezeno, je možné využít Welchovy metody (5.3), kde je využito metodiky rozdělení signálu do jednotlivých segmentů s použitím okének s překrytím [42].

$$PSD = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \frac{[w(Ns_i) \cdot FFT_i(x_i, Ns_i)]^2}{L} \quad (5.3)$$

Kde  $M$  je počet segmentů,  $w$  je definice okénka,  $Ns_i$  je počet bodů FFT  $i$ -tého signálu,  $x_i$  je  $i$ -tý segment analyzovaného signálu a  $L$  je počet vzorků signálu  $x_i$ . Schéma výpočtu PSD Welchovou metodou je znázorněno na obr. 5.20.

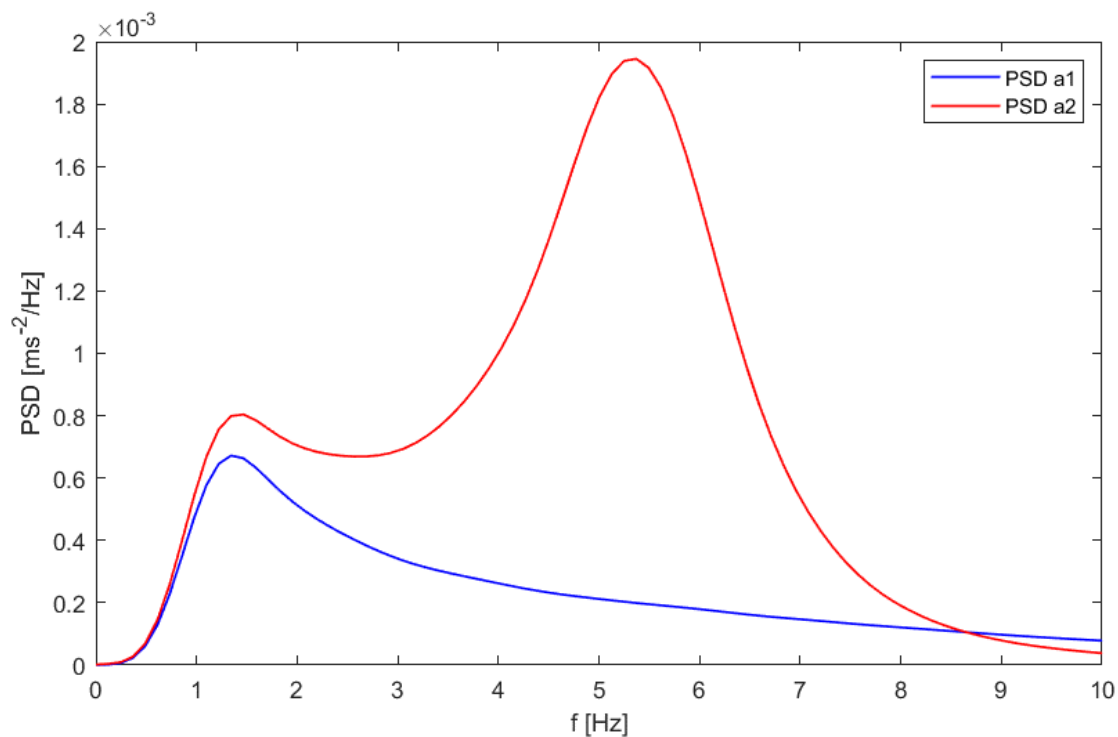


**Obr. 5.20** Schéma výpočtu PSD Welchovou metodou

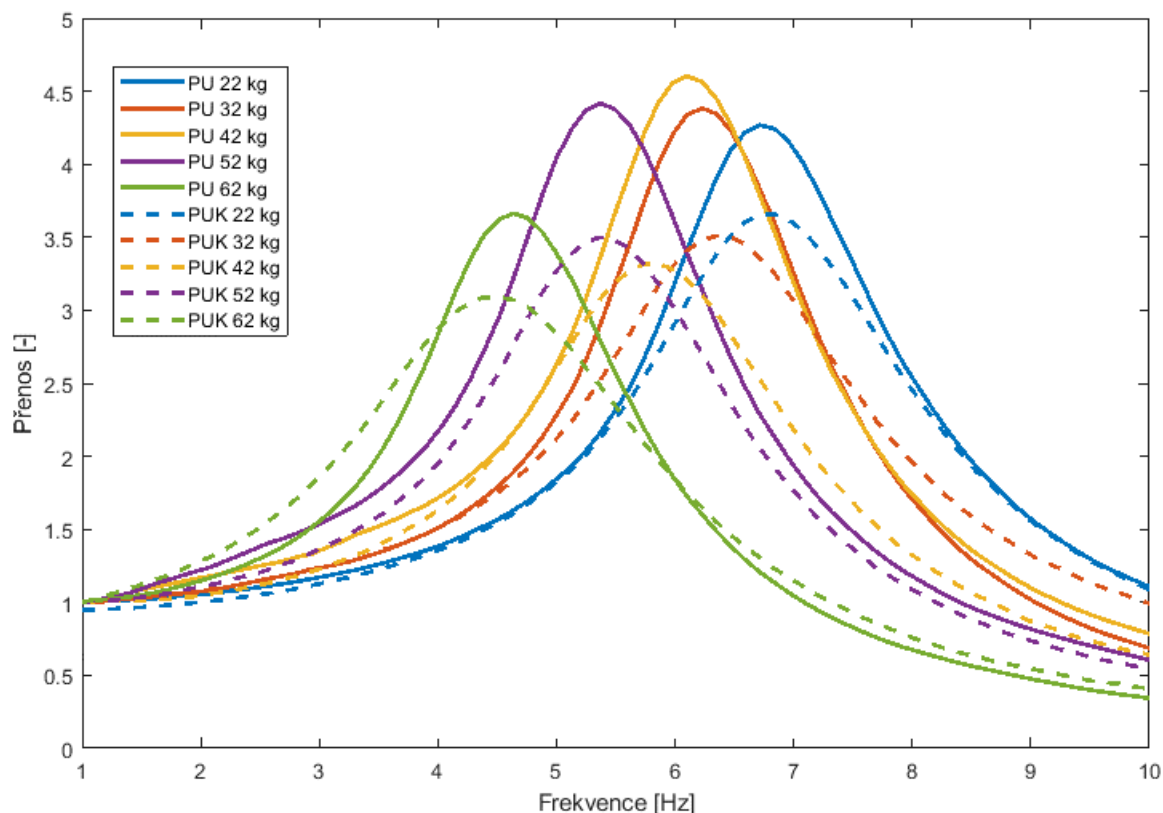
Po získání PSD vstupního a výstupního průběhu zrychlení obr. 5.21, pomocí Welchovy metody (funkce „pwelch“ v Matlab), je možné určit amplitudovou přenosovou charakteristiku  $H$  podle vztahu (5.4)

$$H = \sqrt{\frac{PSD_{a_2}}{PSD_{a_1}}} \quad (5.4)$$

Výsledné průběhy přenosových charakteristik získaných při testování referenčního sedáku z PU pěny v porovnání se sedákem z kompozitní pěny, pro hmotnosti zátěže 22–62 kg jsou uvedeny na obr. 5.22. Z výsledků je patrné, že pro všechny testované hmotnosti zátěže byly zaznamenány nižší hodnoty přenosu přibližně o 24 %. Rezonanční frekvence vykazují mírný posun o cca 0,25 Hz k nižším hodnotám. Tedy výplň PU pěny kokosovými vlákny sice snížila nepatrně statický komfort nárůstem tuhosti, ale naopak zlepšila dynamický komfort daný velikostí přenosové charakteristiky pro danou frekvenci.



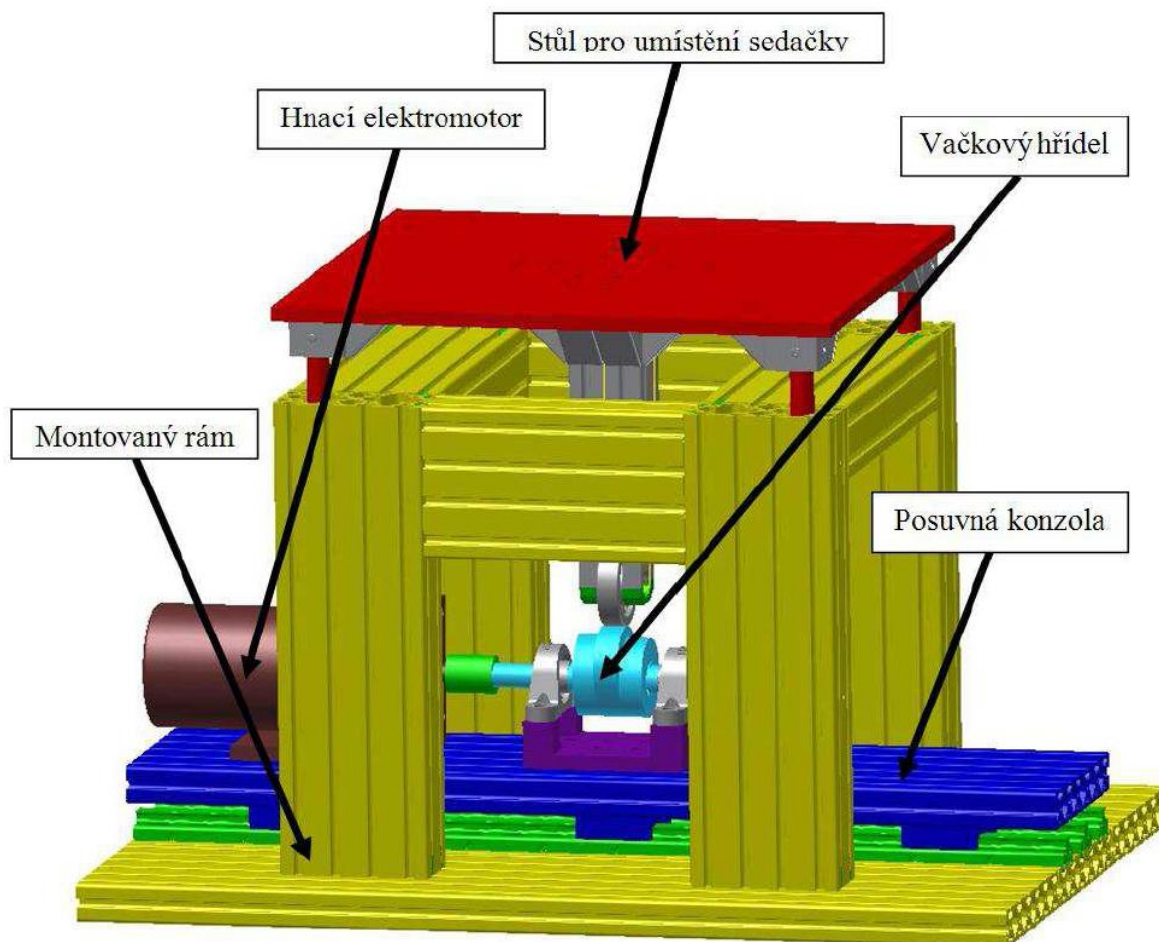
**Obr. 5.21** Výkonová spektrální hustota



**Obr. 5.22** Porovnání průběhů přenosových charakteristik čisté PU pěny a kompozitní pěny pro různé hmotnosti

### 5.2.1 Experimentální zařízení pro dlouhodobé zkoušky

Z důvodu potřeby životnostního testování automobilových sedaček bylo navrženo zařízení pro dlouhodobé testování automobilových sedaček obr. 5.23.

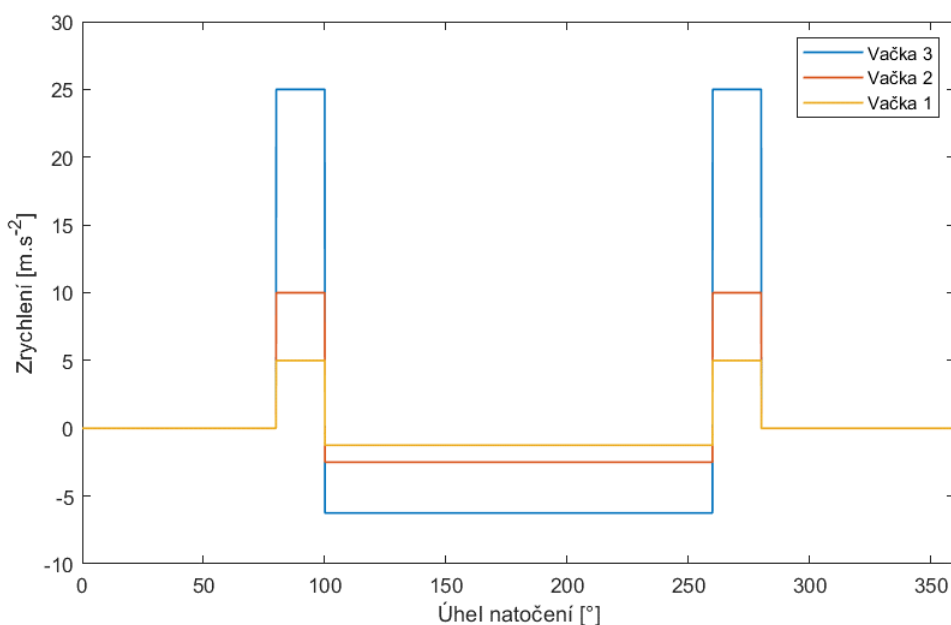


**Obr. 5.23** Návrh zařízení pro dlouhodobé zkoušky

Zařízení je navrženo tak, aby simulovalo zatížení sedadla během jízdy automobilu za různých podmínek. Zařízení může pracovat nepřetržitě po dobu několika dní. Dlouhodobé testování je užitečné pro získání informací o opotřebení zejména komfortní vrstvy, ale i dalších částí sedačky. Základní částí zkonstruovaného dlouhodobého testovacího zařízení je montovaný rám tvořený hliníkovými profily. Na základně rámu je umístěna posuvná konzole s dvojicí krokových elektromotorů, které jsou pomocí pružné spojky spojeny s vačkovým hřídelem. Vačkový hřídel je osazen třemi vyměnitelnými vačkami. Do rámu je vložen vertikálně posuvný stůl, vedený na čtyřech lineárních vedeních. Uprostřed stolu je umístěna podpora s kladkovým zvedákem, přenášejícím rotační pohyb vačky na vratný posuvný pohyb stolu. Na pohyblivém stole je umístěno nastavitelné kotvení pro celou



sedačku. Na sedačce je umístěno závaží, které je horizontálně vedeno. Pohon zajišťuje dvojice třífázových krokových motorů YK31328 zapojených do tandemu. Zařízení je osazeno dvěma snímači polohy (sedačka, zátěž), řízení a sběr dat je zajištěno pomocí PC. Zařízení je schopno vyvozovat kmity o zrychlení až  $25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$  s frekvencí 15 Hz s hmotností zátěže 80 kg. Konstrukce zdvihového mechanismu se postupně vyvíjela. Původně bylo předpokládáno, že zařízení bude dosahovat zrychlení  $25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$  pro celou škálu frekvencí od 1 do 15 Hz. V průběhu navrhování zdvihového mechanismu a po zvážení několika variant, bylo usouzeno, že pro vyvození zrychlení  $25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$  při frekvenci 1 Hz by bylo za potřeby vačky o průměru řádově stovek mm, přičemž rám zařízení by musel být velice masivní a požadavky na výkon motoru by byly nepřiměřeně vysoké. Z těchto důvodů byly přehodnoceny požadavky a bylo navrženo kompromisní řešení, kdy bude použito tři vaček pro tři frekvenční pásma. V tomto návrhu je dosahováno původně požadovaného zrychlení  $25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$  pouze při frekvenci 15 Hz, ale požadavky na velikost zařízení a výkon motoru jsou akceptovatelné. Detailní návrh zdvihového mechanismu byl proveden tak, aby nejvyšší hodnota zrychlení byla dodržena po co nejdelší dobu. Toho bylo dosaženo navržením obdelníkového průběhu zrychlení.



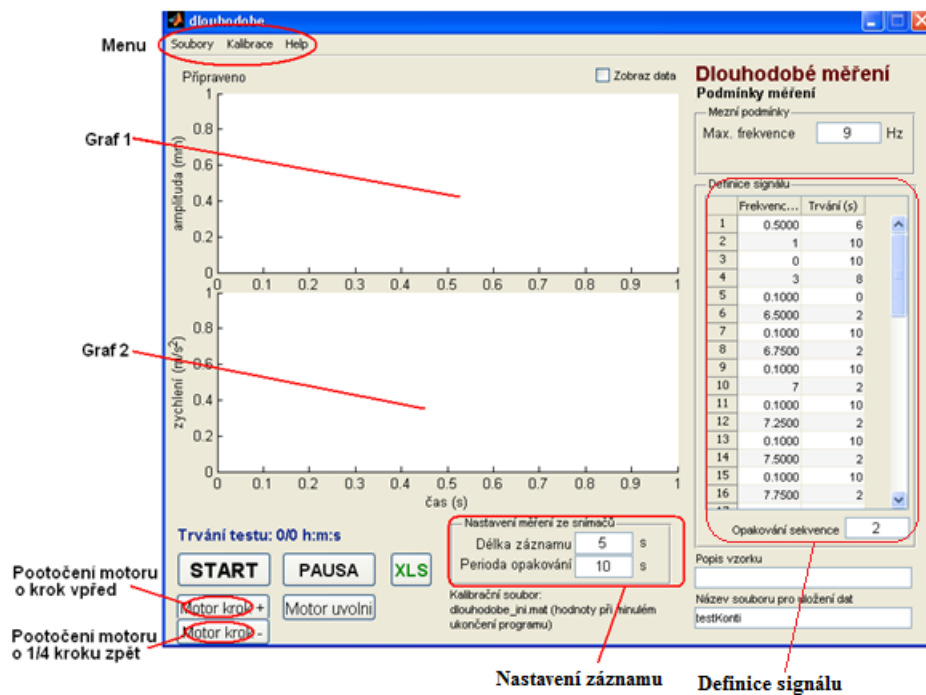
**Obr. 5.24** Průběh zrychlení na jednotlivých vačkách

Na obr. 5.24 je znázorněn navržený průběh zrychlení na vačkách v průběhu jedné otáčky. Průběh je symetrický a navržený tak, aby na jednu otáčku připadaly dva pulzy kladného zrychlení. Nevýhodou je poměrně dlouhý úsek negativního zrychlení, kde hodnota tohoto negativního zrychlení je výrazně nižší než hodnota požadovaného kladného zrychlení a

také nižší než hodnota gravitačního zrychlení. Vzhledem k účelu testovacího zařízení je toto negativní zrychlení považováno za přijatelné. V tab. 5.2 jsou uvedeny použitelné frekvenční rozsahy spolu s odpovídajícími zrychleními pro tři navržené vačky.

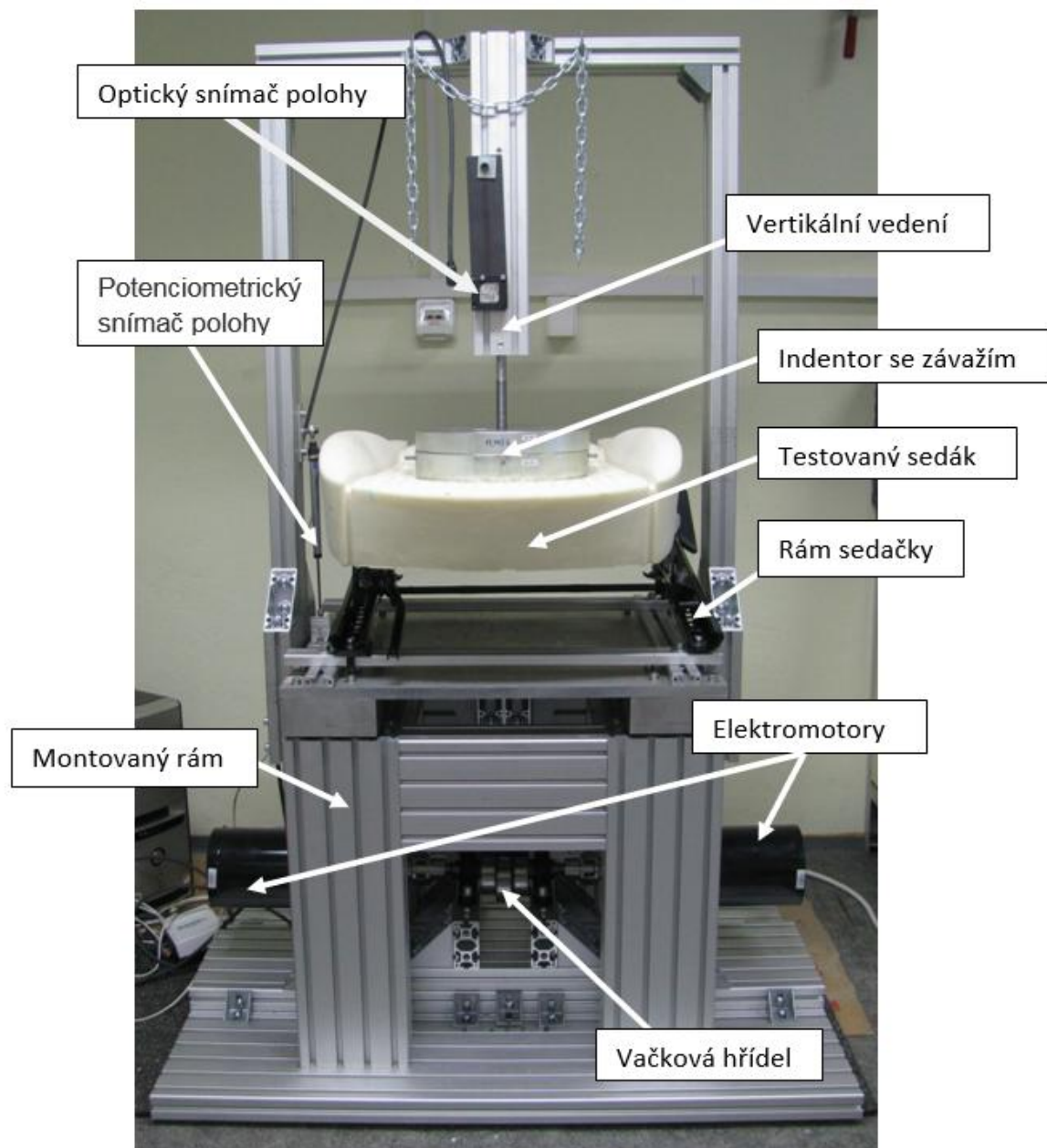
**Tab. 5.2** Parametry jednotlivých vaček

	Frekvence [Hz]	Otáčky [min <sup>-1</sup> ]	Maximální zrychlení [m.s <sup>-2</sup> ]
Vačka 1	1	30	0,6
	2	60	2,2
	3	90	5
Vačka 2	4	120	3,3
	5	150	5,2
	6	180	7,5
	7	210	10
	8	240	13,2
Vačka 3	9	270	9
	10	300	11
	11	330	13,4
	12	360	16
	13	390	18,8
	14	420	21,8
	15	450	25



**Obr. 5.25** Náhled okna ovládacího softwaru

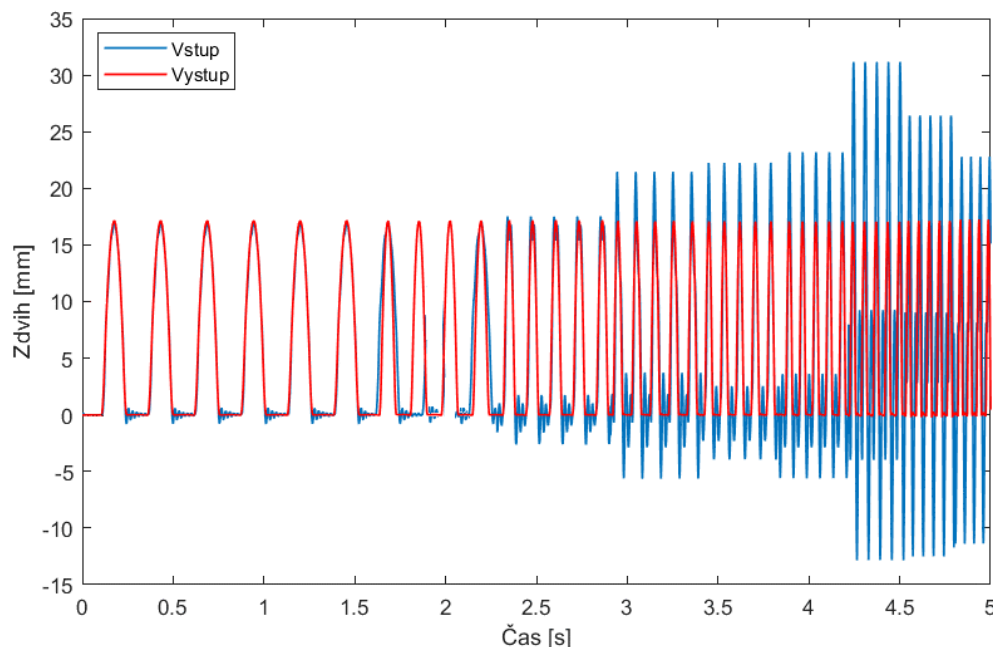
Pro všechna zařízení byl vytvořen ovládací software Matlab viz obr. 5.25. Prostřednictvím ovládacího softwaru lze zařízení řídit, zobrazovat aktuální měřená data, zaznamenávat a exportovat naměřená data atd. Na obr. 5.26 je ukázána finální konstrukce testovacího zařízení. Oproti návrhu uvedeném na obr. 5.22 byl doplněn horní rám s vertikálním vedením sloužící k upevnění zatěžovacího tělesa. Dále je k vedení připevněn laserový snímač polohy zátěže.



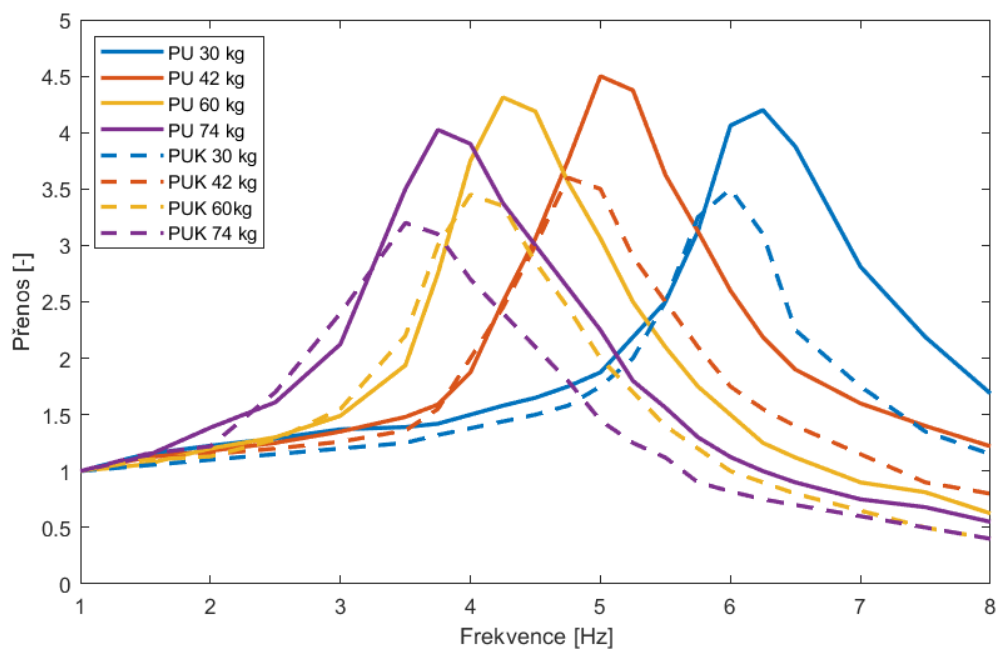
**Obr. 5.26** Realizace zařízení pro dlouhodobé zkoušky

Pomocí zařízení pro dlouhodobé testování lze získat mimo jiné i průběhy přenosových charakteristik. Pro měření přenosových charakteristik bylo využito vačky o zdvihu

17,1 mm, frekvenční rozsah byl zvolen od 0,25 Hz do 12 Hz, s frekvenčním krokem 0,25 Hz, měření bylo provedeno se čtyřmi zátěžemi (30, 42, 60 a 74 kg). Naměřený signál zdvihu pro zátěž 30 kg je zobrazen na obr. 5.27.



**Obr. 5.27** Vstupní a výstupní průběh zdvihu testu přenosových charakteristik 30 kg



**Obr. 5.28** Porovnání průběhů přenosových charakteristik naměřených zařízením pro dlouhodobé testování sedaček

Porovnání výsledných průběhů přenosových charakteristik získaných při testování referenčního sedáku z PU pěny a sedáku z kompozitní pěny, pro hmotnosti

zátěže 30–74 kg jsou uvedeny na obr. 5.28. Z výsledků je patrné, že pro všechny testované hmotnosti zátěže byly zaznamenány nižší hodnoty přenosu přibližně o 28 %. Rezonanční frekvence vykazují mírný posun o cca 0,25 Hz k nižším hodnotám.

### 5.3 Závěr

Kapitola 5 se věnovala konstrukčnímu návrhu funkčního vzorku automobilové sedačky z nízkohustotní kompozitní pěnou s kokosovými vlákny, která je řešením disertační práce vedoucí k zlepšení mechanických vibrací přenášených sedákem automobilové sedačky na člověka. V kap. 5.1 byly provedeny pokročilé MKP simulace pro studii a porovnání mechanických vlastností mezi PU pěnou a nízkohustotní pěnou s kokosovými vlákny. Z výsledků bylo stanoveno, že průběhy stlačovací křivky jsou podobné, přičemž vlákenná výztuž zvyšuje tuhost a silový odpor proti stlačení. Následně se provedla realizace funkčního vzorku pro reálné experimentální porovnání (viz kap. 5.2). Funkční vzorek sedáku automobilové sedačky byl testován a porovnáván pro statické a dynamické zatížení, pro které byly navrženy a zkonstruovány modernizované testovací zařízení pro statické a dynamické zatěžování výplně sedáku i celých automobilových sedaček (viz kap. 5.3). Z výsledků statického stlačování byly získány výsledky rozložení kontaktního tlaku, jsou uvedeny na obr. 5.14 - obr. 5.15. Při dynamickém namáhání měl funkční vzorek z PUK pěny lepší přenosové charakteristiky v porovnání s PU pěnou pro dané zatížení v rozsahu 30 – 74 kg. Výsledky stanovily, že pro všechny testované hmotnosti zátěže byly zaznamenány nižší hodnoty přenosu přibližně o 24 %. Rezonanční frekvence vykazují mírný posun o cca 0,25 Hz k nižším hodnotám. Tedy výplň PU pěny kokosovými vlákny sice snížila nepatrně statický komfort nárůstem tuhosti, ale naopak zlepšila dynamický komfort daný velikostí přenosové charakteristiky pro danou frekvenci. Z výsledků měření a simulace lze shrnout, že vlákna v PU pěně ovlivňují dynamické vlastnosti konstrukčního řešení sedáku, mohou být tedy vývojovým řešením současného provedení sedáků automobilových sedaček, otázkou je jen jak by se chovala při vysokých přetíženích např. během nárazu.

## 6. Přínosy disertační práce

V průběhu řešení problematiky disertační práce byly prostřednictvím analýz struktur vybraných vzorků, měření a modelových simulací zjištěny poznatky, které jsou přínosem jak pro vědní obor, tak i pro následnou aplikaci v praxi.

### 6.1 Přínosy pro vědní obor

Přínosy disertační práce pro vědní obor lze shrnout do následujících bodů:

- Bylo zjištěno, že vybrané vzorky nízkohustotních kompozitních pěn vyztužených přírodními vlákny vykazují výraznou změnu mechanických vlastností při různých metodách zatěžování (statické a dynamické), což je obdobné u vzorků čisté PU pěny. Při dynamickém namáhání měl funkční vzorek z PUK pěny lepší přenosové charakteristiky v porovnání s PU pěnou pro dané zatížení v rozsahu 30 – 74 kg. Výsledky stanovily, že pro všechny testované hmotnosti zátěže byly zaznamenány nižší hodnoty přenosu přibližně o 24 %. Rezonanční frekvence vykazují mírný posun o cca 0,25 Hz k nižším hodnotám. Tedy výplň PU pěny s přírodními vlákny sice snižuje nepatrně statický komfort nárůstem tuhosti, ale naopak zlepšila dynamický komfort daný velikostí přenosové charakteristiky pro danou frekvenci.
- Byly vytvořeny pokročilé MKP modely vzorků PU pěny a kompozitní pěny vyztužené vertikálními a horizontálními vlákny pro studii a porovnání mechanických vlastností viskoelastických materiálů, neboť výsledný průběh závislosti síly na deformaci je v dobré shodě s experimenty. Následně lze pomocí modelu vyjádřit např. tuhost a disipační energii ve vzorku PU pěny a ve vzorku nízkohustotní kompozitní pěny vyztužené přírodními vlákny.
- Byly vytvořeny pokročilé MKP modely celých výplní sedáků PU pěny a kompozitní pěny vyztužené přírodními vlákny pro studii a porovnání komfortních vlastností, jako mohou být rozložení deformace a napětí, či kontaktního tlaku. Modely vykazují dobrou shodu s reálnými experimenty.

## 6.2 Přínosy pro praxi

Přínosy disertační práce pro praxi lze shrnout do následujících bodů:

- Bylo zjištěno, že vybrané nízkohustotní kompozitní pěny vyztužené přírodními vlákny vykazují závislost na rychlosti deformace, proto při konstruování např. výplní automobilových sedaček, opěráků či hlavových opěrek jsou jejich vlastnosti obdobné jako u čisté pěny, ale s nižší hmotností.
- Byly provedeny návrhy a realizace modernizovaného zkušebního zařízení, které lze výhodně použít pro porovnávání vlastností autosedaček ve stísněných prostorech (absence masivních konstrukcí, úspora materiálu). Zařízení je uzpůsobeno pro statické a dynamické měření nejen sedaček, ale i experimentálních vzorků.

## 7. Závěr

Disertační práce byla zaměřena na výzkum nízkohustotních kompozitních pěn vyztužených přírodními vlákny použitelných jako možná náhrada standardní polyuretanové pěny v automobilových sedačkách. Na výplňový materiál automobilových sedaček jsou kladeny protichůdné požadavky, jednak z prvního (technického) hlediska je to zejména tuhost výplně a tlumení vibrací vstupujících do sedačky, z druhého hlediska na je na výplně vyvíjen vysoký tlak na snížení hmotnosti a využití ekologických materiálů z důvodů ekonomických a legislativních. Technické požadavky mohou být splněny díky využití zcela nových materiálů, které se však obvykle z důvodu jejich vysoké ceny nehodí pro masovou výrobu. Alternativním řešením může být využití polymerních materiálů na přírodní bázi nebo kompozitních materiálů s přírodními vlákny, kdy mohou být po určité úpravě zachována výrobní zařízení, díky čemuž nebude zavedení výroby dílů z těchto materiálů příliš nákladné. Pro splnění hlavního cíle disertační práce, tj. návrh a realizace funkčního vzorku nízkohustotní kompozitní pěny vyztužené přírodními vlákny pro výplně automobilových sedaček při zachování stejných nebo lepších mechanických vlastností, byla provedena řada teoretických studií, analýz, modelových simulací a měření.

Pro splnění hlavního cíle disertační práce byly provedeny následující dílčí kroky:

- Provedly se rozboru struktury vybraných vzorků standardních polyuretanových pěn a nízkohustotních kompozitních pěn s přírodními vlákny.
- Byly určeny vybrané mechanické vlastnosti vzorků pomocí laboratorních měřicích zařízení.
- Na základě analýz a rozborů vzorků byly stanoveny důležité parametry pro návrh kompozitního materiálu vhodného pro konstrukci výplně automobilové sedačky.
- Prostřednictvím MKP byly vytvořeny strukturní modely na jejichž základě byl vytvořen materiálový model.
- Byly vytvořeny MKP simulace odpovídající reálné geometrii sedáku automobilové sedačky
- Byl sestaven konstrukční návrh a realizován funkční vzorek výplně automobilové sedačky z kompozitní nízkohustotní pěny s kokosovými vlákny
- Byla navržena a sestavena experimentální zařízení pro testování statických a dynamických vlastností výplně i celých automobilových sedaček



---

Pro další výzkumy a vývoj výplně sedačky z nízkohustotní kompozitní pěny s přírodními vlákny včetně následné aplikace do reálné automobilové sedačky lze doporučit následující postup:

- Studovat a testovat tepelný komfort, pro který lze využít i nově navržených modernizovaných zařízení uvedených v disertační práci. jako např. analýzy prodyšnosti a rozložení teplot
- Bariérové zkoušky na vzorcích i celých výplních sedáků s ohledem na experimentální vybavení laboratoří TUL, především laboratoře aplikované mechaniky.
- Testování výplní sedačky z nízkohustotní kompozitní pěny s přírodními vlákny v reálných sedáčkách a v reálném provozu, např. podle testovacích metodik výrobců automobilů.
- Klimatické zkoušky vzorků i celých výplních sedáků při různých teplotách v rámci studie degradace materiálu (studie degradace kompozitní pěny a vláken).
- Testování vibrací a bariérových zkoušek s využitím figuríny Hybrid 3, která byla pořízena do laboratoře aplikované mechaniky pro testování bariérových zkoušek a vibrací. Následně tyto vibrace porovnávat se standardizovanou zátěží včetně lidských jedinců.
- Rozšířit strukturální modely vzorků kompozitní pěny vyztužené přírodními vlákny do modelů reálné geometrie výplně sedáku automobilové sedačky. Prostřednictvím těchto modelů následně provádět virtuální analýzy mechanických vlastností výplně sedáku automobilové sedačky při zatížení pro verifikace s experimenty v laboratořích.

## Seznam použité literatury

- [1] Griffin, M. J. *Handbook of Human vibration*, University Southampton, UK, MCS Limited, 2004, ISBN 0-12-303041-2
- [2] Huang, Y., Griffin, M.J. Effect of voluntary muscular activity on non-linearity in the apparent mass of the seated human body during vertical whole-body vibration. *Journal of Sound and Vibration*, Volume 298. 2006, s. 824-840, ISSN 0022-460X, <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2006.06.028>.
- [3] Subashi, G. H. M. J., Nawayseh, N., Matsumoto, Y., Griffin, M.J. Nonlinear subjective and dynamic responses of seated subjects exposed to horizontal whole-body vibration, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 321, Issues 1–2, 2009, s. 416-434, ISSN 0022-460X, <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2008.09.041>.
- [4] Rakheja, S., Dong, R. G., Patra, S., Boileau, P. É., Marcotte, P., Warren, C., Biodynamics of the human body under whole-body vibration: Synthesis of the reported data, *International Journal of Industrial Ergonomics*, Volume 40, Issue 6, 2010, s. 710-732, ISSN 0169-8141, <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2010.06.005>
- [5] Rauch, F., Sievanen, H., Boonen, S., Cardinale, M., Degens, H., Felsenberg, D., Roth, J., Schoenau, E., Verschueren, S., Rittweger, J. Recommendations of the International Society of Musculoskeletal and Neuronal Interactions. *Journal of Musculoskeletal & Neuronal Interactions*, 2010, ISSN 1108-7161
- [6] Thamsuwan, O., Blood, R. P., Ching, R. P., Boyle, L., Johnson, P.W. Whole body vibration exposures in bus drivers: A comparison between a high-floor coach and a low-floor city bus, *International Journal of Industrial Ergonomics*, Volume 43, Issue 1, 2013, s. 9-17, ISSN 0169-8141, <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2012.10.003>
- [7] Joshi, G., bajaj, A.K., davies, P. Whole-body Vibratory Response Study Using a Nonlinear Multi-body Model of Seat-occupant System with Viscoelastic Flexible Polyurethane Foam, *Industrial Health*, 2010/10/13, Online ISSN 1880-8026, Print ISSN 0019-8366
- [8] Blood, R. P., Ploger J. D, Johnson P. W., Whole body vibration exposures in forklift operators: comparison of a mechanical and air suspension seat, *Ergonomics*, 53:11, s. 1385-1394, 2010, DOI: 10.1080/00140139.2010.519053
- [9] Johannig, E. Whole-body vibration-related health disorders in occupational medicine – an international comparison, *Ergonomics*, 58:7, s. 1239-1252, 2015, DOI: 10.1080/00140139.2015.1005170
- [10] Fahy, F., Thompson, D., *Fundamentals of Sound and Vibration*, Second Edition, 2015 ISBN 9780415562102
- [11] Valentini, P. Modeling human spine using dynamic spline approach for vibrational simulation, *Journal of Sound and Vibration*, Volume 331, Issue 26, 2012, s. 5895-5909, ISSN 0022-460X,
- [12] Petruš, M. *Automobilová sedačka s nepolyuretanovým materiálem*, Liberec, 2012, Disertační práce, Technická Univerzita v Liberci, Fakulta Strojní
- [13] Njeugna, N., Schacher, L., Adolphe, D. C., Schaffhauser, J., Strehle, P. Development of a New 3D Nonwoven for automotive Trim Applications, *New Trends and*

- Developments in Automotive Industry*, IntechOpen, 2011,p. 333-346. DOI: 10.5772/13036
- [14] Dupuis, R. L., Njeugna, N., Adolphe, D. C., Schacher, L., Aubry, E., Schaffhauser, J., Strehle, P., Comparison of Compression Behaviour of PU Foam and 3D Nonwoven, *Proceedings of the SEM Annual Conference, Society for Experimental Mechanics Inc.* 2009, Dostupné na: <http://sem-proceedings.com/09s/sem.org-SEM-2009-Ann-Conf-s055p02-Comparison-Compression-Behaviour-PU-Foam-3D-Nonwoven.pdf>
- [15] Sonnenschein, M. F., *Polyurethanes: Science, Technology, Markets, and Trends*, John Wiley and Sons, 2014, ISBN: 978-1118737835
- [16] Petru, M., Novák, O., Mechanical properties measurement and comparison of polyurethane foam substitute, *ACC Journal, 16, Issue A, Natural Sciences and Technology*, 2010, s. 50-59.
- [17] Petru, M., Novák, O. Measurement and Numerical Modeling of Mechanical Properties of Polyurethane Foams, *Aspects of Polyurethanes* , IntechOpen, 2017, s. 73 - 109, ISBN: 978-953-51-3546-3, DOI: 10.5772/65991
- [18] Szycher, M., *Szychers handbook of polyurethanes*, second edition, CRC Press, 2017, ISBN 9781138075733
- [19] Petřík, J., Petru, M. Simulation of the transmissibility of the non-linear materials, *Proceedings of the 8th International Conference Vibroengineering 2009*, Klaypeda university Lithuania, říjen 2009, ISSN 1822-1262
- [20] Martonka, R., *Měření automobilových sedaček a jejich inovace*, Liberec, 2010 Disertační práce, Technická Univerzita v Liberci, Fakulta Strojní, ISBN 80-7083-922-9
- [21] Fliegel, V., Martonka, R., Automobile seats - simulation characteristics seats. *Acta Mechanica Slovaca*, 2008, ISSN 1335-2393.
- [22] Ivancic, P. C., Sha, D., Lawrence, B. D., Mo, F. Effect of Active Head Restraint on Residual Neck Instability due to Rear Impact, *Spine*, 2010, DOI: 10.1097/BRS.0b013e3181d04d2b
- [23] *Ford's bio-foam and bio-plastics: Plants aren't just for fuel anymore*, Dostupné z: <http://green.autoblog.com/2007/07/11/fords-bio-foam-and-bio-plastics-plants-arent-just-for-fuel-an>
- [24] Petru, M. Petřík, J. Systems to optimize comfort and developments of car seat, *Acta Technica Corviniensis – Bulletin of Engineering*, Annals of Faculty Engineering Hunedoara, fascicule 4, 2009, s. 55-59.
- [25] Mills, N. J. *Polymer foams handbook: engineering and biomechanics applications and design guide*, Oxford, UK, 2007, ISBN 9780750680691,
- [26] Warren. W. E., Kraynik A. M. Linear Elastic Behavior of a Low-Density Kelvin Foam With Open Cells, *J. Appl. Mech.* 1997, s. 787-794. doi:10.1115/1.2788983.
- [27] Gupta, N., Woldesenbet, E., Characterization of Flexural Properties of Syntactic Foam Core Sandwich Composites and Effect of Density Variation, *Journal of Composite Materials*, Vol.39, 2005, s. 2197–2212, DOI: 10.1177/0021998305052037
- [28] Dow Automotive, *Finite Element Analyses with IMPAXX Energy Absorbing Foams in Headliner Applications Modeling Instructions and Material*, 2009, Dostupné z:

[http://msdssearch.dow.com/PublishedLiteratureDOWCOM/dh\\_030b/0901b8038030b1d4.pdf?filepath=automotive/pdfs/noreg/299-51549.pdf&fromPage=GetDoc](http://msdssearch.dow.com/PublishedLiteratureDOWCOM/dh_030b/0901b8038030b1d4.pdf?filepath=automotive/pdfs/noreg/299-51549.pdf&fromPage=GetDoc)

- [29] Harrison D. D., Harrison, S. O., Croft A.C., Harrison D.E., Troyanovich S.J. Sitting biomechanics Part I: Review of the Literature, *Journal of Manipulative and Physiological Therapeutics*, Volume 22, Issue 9, 1999, s. 594 - 609 ISSN 0161-4754
- [30] Yusof, M. B. *Development of an automotive seat for ride comfort*, Doctoral Thesis Johor, Universiti Teknologi Malaysia, 2005
- [31] Damkot, D. K., Pope, M. H., Lord, J., Frymoyer J. W., The relationship between work history, work environment and low-back pain in men, *Spine*, Volume 9, Issue 4, 1984, s. 395 - 399
- [32] Kelsey, J. L., Hardy, R. J., Driving of motor vehicles as a risk factor for acute herniated lumbar intervertebral disc. *Am J Epidemiol* 1975, 102(1), s. 63-73.
- [33] R. Rosegger, S. Rossegger, Health effects of tractor driving, *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1960, s. 241-276.
- [34] Harrison, D. D., Harrison, S. O., Croft A.C., Harrison D.E., Troyanovich S.J. Sitting biomechanics, Part II: Optimal car driver's seat and optimal driver's spinal model, *Journal of Manipulative and Physiological Therapeutics*, Volume 23, Issue 1, 2000, s. 37-47, ISSN 0161-4754,
- [35] Cirkl, D. *Mechanické vlastnosti polyuretanové pěny*, Liberec 2005, Disertační práce, Technická Univerzita v Liberci, Fakulta Strojní
- [36] Polyurethane Foam Association, *Intouch information on flexible polyurethane foam*, Volume 3, Number 1, 1993, Dostupné z: [http://www.pfa.org/intouch/new\\_pdf/Ir\\_IntouchV3.1.pdf](http://www.pfa.org/intouch/new_pdf/Ir_IntouchV3.1.pdf)
- [37] Jhinkwan, A., Sight, J., Design Specifications and Ergonomic Evaluation of Car Seat, *International Journal of Engineering Research & Technology*, Volume 3, Issue 5 2014, s. 611 - 613, ISSN 2278-0181
- [38] EHK R14, *Jednotná ustanovení pro schválení vozidel z hlediska kotevních úchyťů bezpečnostních pásů*, Evropská hospodářská komise, 2014
- [39] EHK R17, *Jednotná ustanovení pro schválení vozidel z hlediska sedadel, jejich ukotvení*, Evropská hospodářská komise, 2014
- [40] EHK R25, *Jednotná ustanovení pro schválení opěrek hlavy, které jsou anebo nejsou spojené se sedadly vozidla*, Evropská hospodářská komise, 2015
- [41] Srb, P., Kulhavý, P., Lufinka, A., Lepšík, P., Fliegel, V., Real stress arising in the backrest frame of a car seat, *54. Conference on Experimental Stress Analysis*, 2016
- [42] Petřík, J. *Interakce automobilové sedačky a zátěže*, Liberec 2008, Disertační práce, Technická Univerzita v Liberci, Fakulta Mechatroniky, Informatiky a Mezioborových studií
- [43] Kulhavý, P., Srb, P., Petřů, M. Numerical and experimental analysis of the real load arising in the cushion of the car seat, *Manufacturing technology*, Volume 15, Number 6, 2015, ISSN 1213-2489

- [44] Verver, M. M., de Lange, R., van Hoof, J., Wismans, J. S. Aspects of seat modelling for seating comfort analysis, *Applied Ergonomics*, Volume 36, Issue 1, 2005, s. 33-42, ISSN 0003-6870
- [45] Mastrigt S. *Comfortable passenger seats: Recommendations for design and research*, Delft, 2015, ISBN: 978-94-6259-736-5
- [46] Pheasant, S. *Bodyspace: Anthropometry, Ergonomics and the Design of Work*, Third Edition, 2003, ISBN 0-7484-0326-4
- [47] Jackson, C., Emck, A. J., Hunston, M. J., Jarvis, P. C., Pressure Measurements and Comfort of Foam Safety Cushions for Confined Seating. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, Volume 80, Issue 6, 2009 s. 565 - 569
- [48] VLK, F. *Karoserie motorových vozidel*. Nakladatelství Vlk, Brno, 2001, ISBN 80-238-5277-9
- [49] Chen, J., Hong, J., Zhang, E., Liang, J., Bingheng, L. U. Body pressure distribution of automobile driving human machine contact interface. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, Volume 20, Issue 4, s. 66–70.
- [50] Carcone, S. M., Keir, J. K. Effects of backrest design on biomechanics and comfort during seated work. *Applied Ergonomics*, Volume 38, Issue 6, 2007, s. 755-764, ISSN 0003-6870, <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2006.11.001>.
- [51] Porter, J. M., Gyi, D. E., Tait, H. A., Interface pressure data and the prediction of driver discomfort in road trials. *Applied Ergonomics* Volume 34, Issue 3, 2003, s. 207-214, ISSN 0003-6870
- [52] Wilder, D. G., Frymoyer, J. W., Pope, M. H., The effects of vibration on seated individuals, *Automedica*, Volume 34, Issue 3, 1985 ISSN: 0003-6870 [https://doi.org/10.1016/S0003-6870\(03\)00009-7](https://doi.org/10.1016/S0003-6870(03)00009-7).
- [53] Pope, M. H., Wilder, D.G., Frymoyer, J.W., Vibration as an aetiologic factor in low back pain, *Proceedings of Institution of Mechanical Engineers, Conference on Engineering Aspects of the Spine*, Westminster, London: May 1980.
- [54] Tian, J., Chen, M. Sustainable design for automotive products: Dismantling and recycling of end-of-life vehicles, *Waste Management*, Volume 34, Issue 2, 2014, s. 458-467, ISSN 0956-053X, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.11.005>
- [55] Srb, P., Fliegel, V. Measuring static and dynamic characteristics of composite polyurethane foam, *Conference Proceedings: 53. International Conference of Machine design Departments*, 2012, s. 271 - 274, ISBN 978-80-214-4533-8
- [56] Mansfield, N. J. *Human response to vibration*, London, 2005, CRC Press, ISBN 9780415282390
- [57] FLIEGEL, V.: Study of car seat and human rheology, *Sborník 46. mezinárodní konference kateder částí a mechanismů strojů*, TU v Liberci. 2005. s. 125 – 128. ISBN 80-213-1523-7
- [58] Niekerk, J. L., Pielemeier, W.J., Greenberg, J.A., The use of seat effective amplitude transmissibility (SEAT) values to predict dynamic seat comfort, *Journal of Sound and Vibration*, Volume 260, Issue 5, 2003, s. 867-888, ISSN 0022-460X, [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(02\)00934-3](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(02)00934-3)

- [59] Delleman, N. J., Haslegrave, C. M., Chaffin., Don B. *Working Postures and Movements*, CRC Press, 2004, ISBN 9780415279086
- [60] White A. A., Panjabi, M. *Clinical biomechanics of the spine*, 2nd edition, Philadelphia, 1990, ISBN: 0397507208
- [61] Franz, M., Durt, A., Zenk, R., Desmet, P. Comfort effects of a new car headrest with neck support, *Applied Ergonomics*, Volume 43, Issue 2, 2012, s. 336-343, ISSN 0003-6870, <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2011.06.009>.
- [62] Erth, H., Gulich, B. Three-dimensional textiles and nonwovens for polyurethane foam substitution in car seats. *Textile Advances in the Automotive Industry*, 2008, s. 140-149, DOI: 10.1533/9781845695040.2.140.
- [63] proseat s.r.o. *Quality Release of Chemical Suppliers by proseat for Production of Polyurethane Foam Automotive Seating*, Mörfelden-Walldorf, 2013
- [64] Fliegel, V., Martonka, R. (2009), Sedačka, zejména sedačka automobilová, Užitečný vzor č. 19429, majitel: Technická univerzita v Liberci.
- [65] Kamp, I. The influence of car-seat design on its character experience, *Applied Ergonomics*, Volume 43, Issue 2, 2012, s. 329-335, ISSN 0003-6870, <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2011.06.008>.
- [66] Zenk, R., Franz, M., Bubb, H. Spine load in the context of automotive seating, *SAE Technical Paper*, <https://doi.org/10.4271/2007-01-2485>
- [67] Smardzewski J., Auxetic springs for seating, January, *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, Volume 37, s. 369-376, DOI10.3906/tar-1204-64
- [68] Janus-Michalska, M., Jasińska, D. Comparison of Contact Stress Distribution for Foam Seat and Seat of Auxetic Spring Skeleton, *Journal of Applied Mechanics and Engineering*, Volume 18, Number 1, 2013, s. 55-72, DOI: 10.2478/ijame-2013-0004
- [69] Wang Y., Lakes R. Analytical parametric analysis of the contact problem of human buttocks and negative Poisson's ratio foam cushions, *International Journal of Solids and Structures*, Volume 39, 2002 s.4825-838, ISSN 0020-7683, [https://doi.org/10.1016/S0020-7683\(02\)00379-7](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(02)00379-7).
- [70] Smardzewski, J., Jasińska, D., Janus-Michalska, M. Structure and properties of composite seat with auxetic springs, *Composite Structures*, Volume 113, 2014, s. 354-361, ISSN 0263-8223, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.03.041>.
- [71] Kohl, O. Vzduchové tlumení sedadla řidiče, Liberec, 2017, Disertační práce, Technická Univerzita v Liberci, Fakulta Strojní
- [72] Gu, X., Yu, Y., Li, J., Li, Y. Semi-active control of magnetorheological elastomer base isolation system utilising learning-based inverse model, *Journal of Sound and Vibration*, Volume 406, 2017, s. 346-362, ISSN 0022-460X
- [73] Maciejewski, I., Krzyzynski T., Meyer, L. Control system synthesis of seat suspensions used for protection of working machine operators, *International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, Volume 52, Issue 11, 2014, s. 1355-1371, <https://doi.org/10.1080/00423114.2014.941883>
- [74] Ning, D., Sun, S., Li, H., Du, H., Li, W., Active control of an innovative seat suspension system with acceleration measurement based friction estimation, *Journal*

- of Sound and Vibration*, Volume 38, 2016, s. 28-44, ISSN 0022-460X, <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2016.08.010>
- [75] Nurul H. Structure property performance of natural palm olein polyol in the viscoelastic polyurethane foam, *Journal of Cellular Plastics*, Volume 53, Issue 1, s. 65-81, 2016, ISSN: 1530-7999, <https://doi.org/10.1177/0021955X16639031>
- [76] Chang, L., Sain, M., Kortschot, M. Effect of mixing conditions on the morphology and performance of fiber-reinforced polyurethane foam, *Journal of Cellular Plastics*, Volume 51, Issue 1, 2015, s. 103-119, <https://doi.org/10.1177/0021955X14545138>
- [77] Yebo Li, Xiaolan Luo, Shengjun Hu Polyols and Polyurethanes from Vegetable Oils and Their Derivatives, *Bio-based Polyols and Polyurethanes, SpringerBriefs in Molecular Science*, 2015, s. 15-43, ISBN 78-3-319-21538-9, [https://doi.org/10.1007/978-3-319-21539-6\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-21539-6_2)
- [78] Petrović, Z.S., Polymers from biological oils, *Contemporary Materials*, Volume 1, Issue 1, 2010, s. 39–50
- [79] Desroches, M., Escouvois, M., Auvergne, R. From vegetable oils to polyurethanes: synthetic routes to polyols and main industrial products, *Polymer Reviews*, Volume 52, Issue 1, 2012, s. 38–79. ISSN: 1558-372 <https://doi.org/10.1080/15583724.2011.640443>
- [80] Junming, X., Jianchun, J., Jing., L. Preparation of polyester polyols from unsaturated fatty acid, *Journal of Applied Polymer Science*, Volume 126, Issue 4, s. 1377–1384, <https://doi.org/10.1002/app.36740>
- [81] Lligadas, G., Ronda, J. C., Galià, M., Biermann, U., Metzger, J. O. Synthesis and characterization of polyurethanes from epoxidized methyl oleate based polyether polyols as renewable resources, *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry* Volume 44, Issue 1, 2005, <https://doi.org/10.1002/pola.21201>
- [82] Gu, R., Sain, M. M., Konar, S. K. A feasibility study of polyurethane composite foam with added hardwood pulp, *Industrial Crops and Products*, Volume 42, 2013, s. 273-279, ISSN 0926-6690, <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.06.006>.
- [83] Shan, C. W., Ghazali, M. I., Idris, M. I., Improved Vibration Characteristics of Flexible Polyurethane foam via Composite Formation, *International Journal of Automobive and Mechanical Engineering*, Volume 7, 2013, s. 1031-1042, ISSN: 2229-8649
- [84] Banik, I., Sain, M. M. Water-blown soy polyol based polyurethane foams modified by cellulosic materials obtained from different sources, *Journal of Applied Polymer Science*, Volume 112, Issue 4, 2009, s. 1974–1987. <https://doi.org/10.1002/app.29570>
- [85] Chiang, C. C., *Synthesis of green polyurethane foam using waste glycerol and hay fibers*, California State University, Long Beach, 2012
- [86] Fliegel, V.; Petřík, J.; Martonka, R., Novák, O.; Petrů, M. (2008,2009). *Vývoj sedaček pro VW*, Výzkumná zpráva, majitel: Technická univerzita v Liberci.
- [87] Petrů, M., Novák, O. Kinetics of Crack propagation in textiles usable for upholstery fabric of car seats, *Structure and Structural Mechanics of Textiles 18th International Conference*, TU Liberec, 2011, s.161-168.

- [88] ISO 3386-1:1986 *Polymeric materials, cellular flexible -- Determination of stress-strain characteristics in compression -- Part 1: Low-density materials*, International Organization for Standardization, 1986
- [89] Buckley, C. P., Prisacariu, C. Martin, C., Elasticity and inelasticity of thermoplastic polyurethane elastomers: Sensitivity to chemical and physical structure, *Polymer*, Volume 51, Issue 14, 2010, s. 3213-3224, ISSN 0032-3861,
- [90] ISO 2439:2008 *Flexible cellular polymeric materials -- Determination of hardness (indentation technique)*, International Organization for Standardization, 2008
- [91] M. Khazabi, *Investigation of biopolyol spray foam Insulation modified with natural fibers*, Doctoral Thesis, University of Toronto, 2015
- [92] Weaire, D., Hutzler, S. *The Physics of Foams*, Clarendon Press, Oxford, 1999
- [93] Weaire D.,Phelan R.& Verbist G.: The Structure and geometry of foams, *Foams and Emulsions*, Volume 354, 1999, s. 287-302, ISBN 978-90-481-5180-6, [https://doi.org/10.1007/978-94-015-9157-7\\_16](https://doi.org/10.1007/978-94-015-9157-7_16)
- [94] Schuur, M., Heide, E., Feijen, J., Gaymans, R. J. Elastic behaviour of flexible polyether(urethane–urea) foam materials, *Polymer*, Volume 45, Issue 8, 2004, s. 2721-2727, ISSN 0032-3861, <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2004.02.016>.
- [95] Bareš, R.A. (1988). *Kompozitní materiály*, SNTL Praha.
- [96] Hibbitt, Karlsson, Sorensen, *ABAQUS/CAE 6.13 User's Manual*, Dassault Systemes, 2013
- [97] Ogden, R.W. *Non-linear Elastic Deformations*, Courier Corporation, 1997, New York. ISBN 0486696480
- [98] Schrodtr ,M., Benderoth G., Kühhorn, A., Silber, G. Hyperelastic description of polymer soft foams at finite deformations, *Technische Mechanik*, Band 25, Heft 3-4, (2005), s. 163–173.
- [99] Rivlin, R. S. Large elastic deformations of isotropic materials, Part 1, *Philosophical Transactions*, Volume 241, Issue 835, 1948, s. 379-397, DOI: 10.1098/rsta.1948.0024
- [100] Ogden, R. W. Large deformation isotropic elasticity: on the correlation of theory and experiment for compressible rubberlike solids, *Proc. Roy. Soc. Proceedings of the Royal Society of London*, Volume 328, Issue 1575, 1972, s. 567–583., DOI: 10.1098/rspa.1972.0096
- [101] Petřík, J., Srb, P. Simulation of Static Loading of Polyurethane Foam, *ACC JOURNAL XVII 1/2012, Issue A, Natural Sciences and Technology*, Technická univerzita v Liberci, s. 85 – 92, ISSN 1803-9782
- [102] ČSN EN ISO 1032, *Vibrace – Zkoušení mobilních strojů pro účely určení emisních hodnot vibrací*, 1997, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví
- [103] Press, W. H. *Numerical recipes: The art of scientific computing*, Cambridge, Cambridge University Press, 2007, ISBN 9780521880688



## Vybrané publikace autora

### Publikace v časopisech

- Srb, P., Syrovátková, M., Kulhavý, P., Tomková, B. Study of mechanical properties and modeling of flax reinforced composites, *Materials Science Forum*, Volume 919, 2018, s. 152-159, DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.919.152
- Srb, P., Kulhavý, P., Fliegel, V., Lepšík, P., Cam Mechanism for Car Seat Testing, *Advances in Mechanism Design II. Mechanisms and Machine Science*, Volume 44, 2017, ISBN 978-3-319-44087-3
- Kulhavý, P., Syrovatkova, M., Srb, P., Petru, M., Samkova, A. Irregular winding of pre-preg fibres aimed at the local improvement of flexural properties, *Tekstilec*, Volume 60, Number 4, 2017, s. 310-316, DOI: 10.14502/Tekstilec2017.60.310-316
- Syrovátková, M., Kulhavý, P., Srb, P., Petrů, M., Testing of tensile properties of carbon prepreg composite rods with adding of a non composite part, *Local mechanical properties, Defect and Diffusion Forum*, 2016, Volume 368, s. 130-133, DOI: 10.4028/www.scientific.net/DDF.368.130
- Kulhavý, P., Srb, P., Petrů, M. Numerical and experimental analysis of the real load arising in the cushion of the car seat, *Manufacturing technology*, Volume 15, Number 6, 2015, ISSN 1213-2489
- Kulhavý P., Petrů M., Srb P., Rachitsky G. Numerical and experimental analysis the pressure losses of the heat convector, *Strojírenská technologie*, Ročník XIX, číslo 3,4, 2014, s. 197-204,
- Petrů, M., Novák, O., Srb, P. Active adjustable system of car seat support for controlled reduction of vibrations, *ACC JOURNALS XVII 1/2012, Issue A, Natural Sciences and Technology, Technická univerzita v Liberci*, s. 77-84, ISSN 1803-9782,
- Petřík, J., Srb, P. Simulation of Static Loading of Polyurethane Foam, *ACC JOURNAL XVII 1/2012, Issue A, Natural Sciences and Technology, Technická univerzita v Liberci*, s. 85 – 92, ISSN 1803-9782

### Publikace na vědeckých konferencích

- Srb, P., Fliegel, V., Kulhavý, P., Martonka, R. Dynamic analysis of PUR foam reinforced with coconut fibres in various thermal conditions, *56. Conference on Experimental Stress Analysis*, 2018, ISBN 978-80-270-4061-2
- Srb, P., Petrů, M.: Numerical simulation of reinforced polyurethane foam, *56. Conference on Experimental Stress Analysis*, 2018, ISBN 978-80-270-4061-2
- Srb, P., Kulhavý, P., Lufinka, A., Lepšík, P., Fliegel, V. Real stress arising in the backrest frame of a car seat, *54. Conference on Experimental Stress Analysis*, 2016, ISBN: 778-80-261-0624-1
- Srb, P., Kulhavý P., Martonka, R. Assessment of mechanical properties of polyurethane foam under multiaxial loading in different climatic conditions. *55. International*

*Conference of Machine Design Departments*, 2014, s. 433-438, ISBN 978-80-01-05542-7

- Srb, P., Martonka, R. Mechanical Properties of Polyurethane Foam in Different Climate Conditions, *Book of proceedings, 54. International Conference of Machine Design Departments*, 2013, s. 341-346, ISBN 978-80-7372-986-8
- Srb, P. Vibrační zařízení pro dlouhodobé testování automobilových sedaček, *Sborník příspěvků, Konstruování - Green Engineering 2. ročník národní konference 2013*, s. 125-130, ISBN 978-80-7494-035-4
- Srb, P., Fliegel, V. Vibration Device for Long-term Testing of Car Seats, *Book of proceedings, 54. International Conference of Machine Design Departments*, 2013, s. 161-166, ISBN 978-80-7372-986-8
- Srb, P., Fliegel, V. Measuring static and dynamic characteristics of composite polyurethane foam, *Conference Proceedings: 53. International Conference of Machine design Departments 2012*, s. 271 - 274, ISBN 978-80-214-4533-8
- Srb, P. Mechanické vlastnosti vzorku polyuretanové pěny při stlačování, *Sborník příspěvků konference INInet, Rožnov pod Radhoštěm, 2012*, s. 72 -79, ISBN 978-80-248-2750-6
- Srb, P., Fliegel, V., Náhrady PU pěn převážně určených pro výrobu sedadel. *Sborník referátů: 52. konference kateder částí a mechanismů strojů s mezinárodní účastí: 6.-9.9.2011*, s. 216-221, ISBN 978-80-248-2450-5

#### **Užitný vzor**

- Petruž, M., Potěšil, A., Večerník, J., Srb, P., Martinec, T. Zařízení na ukládání vlákněné výtzuže na jádro vláknové kompozitní konstrukce, UV 30980, 2017

#### **Funkční vzorky a prototypy**

- Srb, P., Fliegel, V., Novák, O. Funkční vzorek výplně automobilové sedačky z nízkohustotní kompozitní pěny s přírodními vlákny aplikovatelných pro automobilové sedačky, 2018.
- Petruž, M., Novák, O., Srb, P., Kulhavý, P., Ryvolová, M., Vosáhlo, J., Funkční vzorek simulátoru automyčky, 2015
- Ševčík, L., Srb, P., Petruž, M., Prototyp mechatronického systému pro ukládání rámových konstrukcí pro rotační pohyb, 2015
- Petruž, M., Ševčík, L., Kovář, R., Srb, P., Kulhavý, P., Prototyp ovíjecího zařízení ovíjecího zařízení pro kompozitní rámy vyztužené dlouhými vlákny, 2015