

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA APLIKOVANÝCH VĚD

KATEDRA MECHANIKY

Diplomová práce

Nadstandardní zkoušky chráničů pro motocyklisty

Plzeň 2019

Bc. Sandra Kaňáková

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně, výhradně s použitím uvedené literatury.

V Přešticích dne 29. 5. 2019

Bc. Sandra Kaňáková

Poděkování

Ráda bych poděkovala Ing. Radku Kottnerovi, Ph. D. za cenné rady a věcné připomínky, které přispěly k vypracování této práce, a za ochotu a trpělivé vedení v průběhu celého studia.

Abstrakt

Tato práce se zabývá experimentálním testováním pěny používané v chráničích motocyklistů a následnou identifikací jejich materiálových parametrů. Nejprve byla provedena série pádových zkoušek s různou dopadovou rychlostí a teplotou vzorku. Následně byl vybrán vhodný materiálový model, jednalo se o Low-density foam. Byly vytvořeny konečnoprvkové simulace experimentálních měření se zvoleným materiálovým modelem v parametrickém vyjádření. Identifikace probíhala v programu optiSLang na základě minimalizace hodnot cílové funkce. Výsledkem byly hodnoty parametrů materiálového modelu Low-density foam. Tento model byl dále validován pomocí srovnání provedené části standardní zkoušky na chrániči SAS-TEC SCL-2 s její simulací. Rovněž bylo provedeno srovnání řady chráničů, které používaly různé materiály jako tlumicí prvky. Zkoumaná pěna se ukázala jako nejlepší.

Klíčová slova

Chránič, identifikace, Low-density foam, materiálový model, motocykl, pádová zkouška, pěna.

Abstract

This thesis deals with the experiments concerning a foam used in a motorcycle protective equipment, and subsequently its material parameter identification. At first, a serie of a drop tests with a different impact velocity and a sample temperature was realized. Suitable material model was chosen subsequently, it was Low-density foam. A finite element simulations of the performed experiments were created with chosen material model in parametric form. The identification was conducted in the optiSLang and evaluated on the basis of the minimization of the target function value. The results were values of the Low-density foam material model parameters. This model was further evaluated by the comparison of the realized part of the standard test carried out on the SAS-TEC SCL-2 protector with its simulation. Furthermore, a comparison of several foam protectors were carried out. The investigated foam turned out to be the best.

Keywords

Protector, identification, Low-density foam, material model, motorcycle, drop test, foam.

Použité značení

Symbol	jednotka	název
A	-	centrální oblast chrániče
a	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	zrychlení
B	-	střední oblast chrániče
b_{v1}	mm	délka strany podstavy vzorku
b_{v2}	mm	délka strany podstavy vzorku
C	-	vnější oblast chrániče
D	-	diferenční operátor
$E, E_1, E_2 \dots E_n$	Pa	Youngův modul pružnosti
\mathcal{F}	-	obálková funkce
F	N	síla
F_a	N	síla vypočtená ze zrychlení razníku
F_f	N	síla změřená siloměrem
F_{\max}^{exp}	N	maximum síly z experimentu
F_{\max}^{sim}	N	maximum síly ze simulace
g	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	gravitační zrychlení
h_v	mm	uvolňovací výška razníku
i	-	index
m_r	kg	hmotnost razníku
m_v	g	hmotnost vzorku
l_0	mm	výška vzorku
n	-	počet
p	Pa	tlak
p_c	Pa	napětí při hydrostatickém stlačení
p_t	Pa	napětí při hydrostatickém pnutí
q	Pa	Misesovo napětí
r_1	mm	poloměr horní části chrániče
r_2	mm	poloměr dolní části chrániče
T	$^{\circ}\text{C}$	teplota
t	s	čas
t_0	s	počátek měření
u	mm	posunutí razníku

Symbol	jednotka	název
u_{\min}^{exp}	mm	minimální posunutí razníku z experimentu
u_{\min}^{sim}	mm	minimální posunutí razníku ze simulace
v	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	dopadová rychlost
α	-	koeficient deformace
ϵ	-	nominální deformace
$\bar{\epsilon}_k$	-	plastická deformace
$\dot{\epsilon}$	s^{-1}	rychlost deformace
μ	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	viskozita
μ_0, μ_1	s	parametry relaxace
ν	-	Poissonovo číslo
σ, σ_i	Pa	nominální napětí
ς	%	odchylka
τ_i	s	relaxační čas
τ_y	Pa	napětí v tlaku

Seznam obrázků

2.1.1	Schéma chrániče SAS-TEC SCL-2	3
2.1.2	Ramenní chránič SAS-TEC SCL-2	3
2.2.1	Schéma zón tlakové zkoušky	4
3.1.1	Schéma Maxwellova modelu	6
3.1.2	Schéma Kelvinova modelu	7
3.1.3	Schéma Zobecněného Maxwellova modelu	7
3.3.1	Materiálový model <i>Low-density foam</i>	9
4.1.1	Sestava pádové věže	11
4.1.2	Schéma zapojení snímačů - pádová zkouška se vzorky	12
4.1.3	Data - $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	13
4.1.4	Data - $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	14
4.1.5	Data - $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	14
4.1.6	Data - $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	15
4.1.7	Data - $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	15
4.1.8	Data - $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	16
4.1.9	Minima posunutí razníku	17
4.1.10	Maximální síly	17
4.2.1	Model pádové zkoušky	18
4.2.2	Použitá síť - 1	19
4.2.3	Použitá síť - 2	19
4.2.4	Použitá síť - 3	19
4.4.1	Identifikované parametry - část 1 - $22 \text{ }^\circ\text{C}$	21
4.4.2	Identifikované parametry - část 2 - $40 \text{ }^\circ\text{C}$	22
4.4.3	Identifikované parametry - část 3 - $50 \text{ }^\circ\text{C}$	22
4.4.4	Srovnání experimentu a simulace - vzorek - $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ - $22 \text{ }^\circ\text{C}$	23
4.4.5	Srovnání experimentu a simulace - vzorek - $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ - $22 \text{ }^\circ\text{C}$	23
4.4.6	Srovnání experimentu a simulace - vzorek - $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ - $22 \text{ }^\circ\text{C}$	24
4.4.7	Srovnání experimentu a simulace - vzorek - $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ - $22 \text{ }^\circ\text{C}$	24
4.4.8	Srovnání experimentu a simulace - vzorek - $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ - $22 \text{ }^\circ\text{C}$	25
4.4.9	Srovnání experimentu a simulace - vzorek - $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ - $22 \text{ }^\circ\text{C}$	25
4.4.10	Srovnání experimentu a simulace - vzorek - $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ - $40 \text{ }^\circ\text{C}$	26
4.4.11	Srovnání experimentu a simulace - vzorek - $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ - $40 \text{ }^\circ\text{C}$	26
4.4.12	Srovnání experimentu a simulace - vzorek - $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ - $40 \text{ }^\circ\text{C}$	27

4.4.13	Srovnání experimentu a simulace - vzorek - $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ - $40 \text{ }^\circ\text{C}$	27
4.4.14	Srovnání experimentu a simulace - vzorek - $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ - $40 \text{ }^\circ\text{C}$	28
4.4.15	Srovnání experimentu a simulace - vzorek - $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ - $40 \text{ }^\circ\text{C}$	28
4.4.16	Srovnání experimentu a simulace - vzorek - $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ - $50 \text{ }^\circ\text{C}$	29
4.4.17	Srovnání experimentu a simulace - vzorek - $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ - $50 \text{ }^\circ\text{C}$	29
4.4.18	Srovnání experimentu a simulace - vzorek - $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ - $50 \text{ }^\circ\text{C}$	30
4.4.19	Srovnání experimentu a simulace - vzorek - $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ - $50 \text{ }^\circ\text{C}$	30
4.4.20	Srovnání experimentu a simulace - vzorek - $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ - $50 \text{ }^\circ\text{C}$	31
4.4.21	Srovnání experimentu a simulace - vzorek - $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ - $50 \text{ }^\circ\text{C}$	31
4.4.22	Celkové srovnání experimentů a simulací - maximální síly	32
4.4.23	Celkové srovnání experimentů a simulací - minima posunutí razníku	32
5.1.1	Sestava pro testování chrániče SAS-TEC SCL-2	35
5.1.2	Schéma zapojení snímačů - pádová zkouška s chráničem SAS-TEC SCL-2	35
5.1.3	Data - Chráníč	36
5.1.4	Zničený chráníč - $50 \text{ }^\circ\text{C}$	37
5.2.1	Sít chrániče SCL-2 - pohled 1	38
5.2.2	Sít chrániče SCL-2 - pohled 2	38
5.2.3	Model standardní zkoušky - pohled 1	38
5.2.4	Model standardní zkoušky - pohled 2	38
5.3.1	Srovnání experimentu a simulace - chráníč - $22 \text{ }^\circ\text{C}$	40
5.3.2	Srovnání experimentu a simulace - chráníč - $40 \text{ }^\circ\text{C}$	40
5.3.3	Srovnání experimentu a simulace - chráníč - $50 \text{ }^\circ\text{C}$	41
6.0.1	Plastová skořápka, vlevo svrchní strana, vpravo spodní strana s voštinovou strukturou	42
6.1.1	Složení chrániče	42
6.1.2	Pěna - $25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	43
6.1.3	Pěna - $30 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	43
6.1.4	Pěna - $170 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	43
6.1.5	Pěna - $200 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	43
6.1.6	Pěna - $260 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	43
6.1.7	Pěna - $400 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	43
6.2.1	Schéma zapojení snímačů - pádová zkouška pro srovnání chráničů	44
6.2.2	Chráníč s geometrickými otvory	45
6.2.3	Srovnání chráničů - maximální síly	46

6.2.4	Průběh posunutí - chránič s pěnou o hustotě $25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, krycí vrstva kůže	46
6.2.5	Průběh posunutí - chránič s pěnou o hustotě $30 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, krycí vrstva kůže	47
6.2.6	Průběh posunutí - chránič s pěnou o hustotě $30 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, krycí vrstva kůže	47
6.2.7	Průběh posunutí - chránič s pěnou o hustotě $170 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, krycí vrstva kůže	47
6.2.8	Průběh posunutí - chránič s pěnou o hustotě $170 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, krycí vrstva papír	48
6.2.9	Průběh posunutí - chránič s pěnou o hustotě $200 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, krycí vrstva kůže	48
6.2.10	Průběh posunutí - chránič s pěnou o hustotě $200 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, krycí vrstva papír	48
6.2.11	Průběh posunutí - chránič s pěnou o hustotě $260 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, bez krycí vrstvy	49
6.2.12	Průběh posunutí - chránič s pěnou o hustotě $260 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ s otvory, bez krycí vrstvy	49
6.2.13	Průběh posunutí - chránič s pěnou o hustotě $400 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, bez krycí vrstvy	49

Seznam tabulek

4.1.1 Parametry vzorků	12
4.1.2 Tabulka extrémů změřených hodnot	17
4.4.1 Srovnání experimentů a simulací - vzorky	33
5.3.1 Srovnání experimentů a simulací - chránič	39

Obsah

1	Úvod	1
2	Rešerše	2
2.1	Testování chráničů	2
2.2	Simulace chráničů	4
3	Materiálový model	6
3.1	Viskoelastický materiál	6
3.2	Crushable foam	8
3.3	Low-density foam	9
4	Identifikace materiálových parametrů	10
4.1	Experiment	10
4.1.1	Změřená data	13
4.2	Simulace	18
4.3	Identifikace	20
4.4	Výsledky	21
5	Validace identifikovaného modelu	34
5.1	Experiment	34
5.1.1	Změřená data	36
5.2	Simulace	37
5.3	Výsledky	39
6	Srovnání chráničů	42
6.1	Testované materiály	42
6.2	Experiment	44
6.2.1	Změřená data	45
7	Závěr	50

1 Úvod

Motocyklový sport se v dnešní době stává stále populárnějším. Na rozdíl od automobilů, které mají zejména v městském provozu velkou spotřebu paliva, motocykl může představovat úspornější variantu dopravy [1]. Za další výhodu může být považována i menší velikost motocyklu oproti automobilu, ale právě tato úspora připadá na úkor konstrukce a deformačních zón, které v automobilech slouží pro tlumení nárazu. Je tedy potřeba zabezpečit motocyklistu dalšími ochrannými prvky.

V roce 2018 zavinili motocyklisté 2109 nehod, při kterých zemřelo 91 motocyklistů a 488 bylo těžce zraněno [2]. Přes tato poměrně vysoká čísla je ze zákona dána pouze povinnost nosit helmu [3], i když další ochranné prvky, jako jsou například motorkářská bunda, kalhoty nebo rukavice, mají značný vliv především na ochranu měkkých tkání [4], [5]. Ovšem o rozsahu zranění nerozhoduje pouze přítomnost ochranných pomůcek, ale i jejich kvalita. Ta by měla být zajištěna splněním příslušných norem, které jsou podmínkou uvedení na trh.

S vývojem technologií se v dnešní době stále častěji setkáváme se snahou vytvářet patřičné simulace sportovních chráničů, jak je ukázáno v [6] a [7]. Ačkoliv je tento trend významný z hlediska úspory času a především financí při procesu navrhování nových produktů, vyžaduje i podrobnou znalost geometrie, zatížení a především mechanického chování použitých materiálů. Pouze v takovémto případě je možné vyhodnotit konkrétní návrh jako nevyhovující jen za použití numerické simulace.

Aby bylo možné získat opravdu spolehlivý materiálový model, je potřeba provést značné množství experimentů. Bohužel i tyto experimenty mohou být ovlivněny mnoha faktory, jako jsou například tvar použitého vzorku, způsob zatěžování nebo vliv teploty.

Cílem této práce bylo otestovat ramenní chrániče motocyklistů při větších zatíženích, než je běžné pro standardní zkoušky dle normy ČSN EN 1621-1 [8], a zároveň vyšetřit vliv teplot na mechanické vlastnosti chrániče. Z tohoto důvodu byla provedena řada experimentálních měření, která posloužila jako zdroj dat pro identifikaci parametrů vhodného materiálového modelu. Posléze byly vytvořeny odpovídající simulace provedených experimentů se zvoleným materiálovým modelem, jehož jednotlivé návrhy byly vyhodnocovány na základě cílové funkce. Výsledný model byl validován srovnáním provedené části standardní zkoušky chrániče a tomu odpovídající simulace. Dále byl proveden experiment, jenž měl za cíl porovnat různé tlumicí materiály na základě jejich mechanické odezvy.

2 Rešerše

Na počátku celé práce bylo potřeba provést rešerši zkoumané problematiky. Tu lze rozdělit na dvě části: experimentální testování chráničů a materiálů v nich použitých, a problematiku numerické simulace, která představuje komplexnější problém řešení předpokládaných zatížení společně se správným popisem mechanických vlastností použitých materiálů.

2.1 Testování chráničů

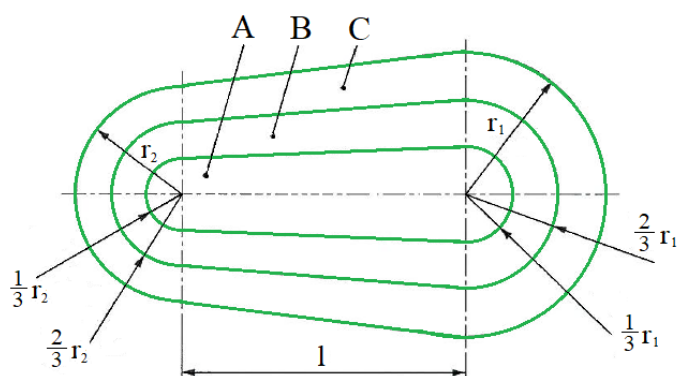
Jak už bylo zmíněno, chrániče musí před uvedením do prodeje projít testováním. Pro český trh musí chrániče kloubů proti nárazu splňovat normy ČSN EN 1621-1 [8]. Tato norma jednoznačně definuje požadavky na chránič v oblastech, jako jsou například geometrie či ergonomie, a především tlumení nárazu, to vše s přihlédnutím k předpokládaným stavům v průběhu dopravní nehody. Z tohoto důvodu se obvykle nesetkáváme s testováním přesahujícím požadavky standardních zkoušek. Jako příklad podobného testování lze uvést článek [9], kde je prováděno vyhodnocování kyčelních chráničů na základě výše zmíněné normy ČSN EN 1621-1.

Pro vyhodnocení tlumení nárazu je jasně nadefinovaná sestava padacího zařízení. To ve zkratce umožňuje volný pád ocelového razníku o hmotnosti 5 kg s plochou hlavicí podél svislého vedení z výšky 1 m. Jako nárazová podložka je použita polokulová hlavice s poloměrem 50 mm, pod kterou je umístěn siloměr. Ten je z druhé strany připevněn k základně o hmotnosti 500 kg. Středová osa razníku se musí shodovat se středovou osou nárazové podložky.

Pro jednotlivá testování jsou definované další faktory, které mají významný potenciál ovlivnit mechanické vlastnosti chrániče. Konkrétně se jedná o teploty a vlhkosti, kterým má být testovaný exemplář vystaven. Prvním klíčovým testem je nárazová zkouška za teploty okolního prostředí, kterou norma definuje na hodnotu 23 ± 2 °C při relativní vlhkosti okolního vzduchu 50 ± 5 %. Dalším testem je zkouška za vlhka, která má za úkol simulovat vliv hydrostatického stárnutí materiálu na velikost přenesené síly. Provádí se pro vzorek, který je 72 hodin ponechán v uzavřené tepelné komoře nad vodou, přičemž v komoře je po tuto dobu udržována teplota 70 ± 2 °C. Po uplynutí požadované doby je vzorek uzavřen v nepropustném obalu následujících 24 hodin za teploty okolního prostředí 23 ± 2 °C.

Nepovinnou částí testování je dle zmíněné normy testování za nízkých a vysokých teplot. Nízké teploty norma definuje jako -10 ± 2 °C, vysoké jako 40 ± 2 °C.

Zkouška je provedena pro výše popsané parametry okolního prostředí, během kterých je zaznamenávána hodnota maximální přenesené síly. Podle hodnoty přenesené síly rozdělují chrániče do dvou tříd. Třída 1 zahrnuje chrániče přenášející sílu maximálně do 35 kN. Třída 2 tvoří chrániče přenášející sílu s maximální hodnotou do 20 kN. Tato hranice musí být dodržena jak při nárazu na centrální část, v normě označené jako oblast A (obrázek 2.1.1), tak pro celkovou průměrnou hodnotu. V krajních částech chrániče, označovaných jako B a C, lze očekávat vyšší hodnoty, pro třídu 1 však nesmí přesáhnout 50 kN, pro třídu 2 pak 30 kN.



Obr. 2.1.1: Schéma chrániče SAS-TEC SCL-2

Zkoumaný chránič SAS-TEC SCL-2, zobrazený na obrázku 2.1.2, náleží do třídy 2 [10]. Použité vzorky byly vyříznuty z chráničů v oblastech A až B.

Aby bylo možné mluvit o nadstandardních testech chráničů, je potřeba tento pojem definovat. Pro tuto práci budou za nadstandardní považovány experimenty, které svým zatížením převyšují zatížení odpovídající výše citované normě [8], konkrétně se jedná o pádové zkoušky odpovídající vyšším dopadovým rychlostem, než je pro uvolňovací výšku razníku 1 m. Jako nadstandardní bude považován i vliv teploty, která je v nepovinné části zkoušky stanovena na 40 °C, a pro tuto práci byla dále rozšířena o hodnotu 50 °C.



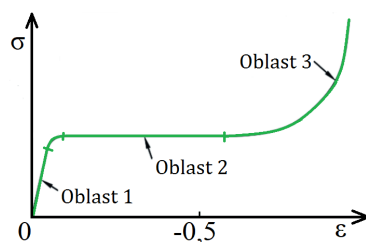
Obr. 2.1.2: Ramenní chránič SAS-TEC SCL-2

2.2 Simulace chráničů

Chrániče jako takové jsou z hlediska výzkumu velice zajímavou problematikou. Při jejich tvorbě totiž často dochází ke kombinaci netradičních kompozitních materiálů, které samy o sobě mnohdy představují složitý problém pro matematický popis jejich mechanického chování. Právě ale schopnost korektně popsat chování materiálu je klíčová pro samotnou simulaci.

U chráničů se často setkáváme s plastovými materiály, které mají za úkol chránit jezdce před zraněním způsobeným například třením s vozovkou, a především rozložit nárazovou sílu do větší plochy. Plastové komponenty se obvykle používají v kombinaci s dalším pěnovým materiálem sloužícím jako hlavní tlumicí prvek. Právě energii absorbující pěny, které disipují kinetickou energii a snižují hodnotu přenesené síly pod určité maximum [11], jsou velice rozšířené. Z komerčně prodávaných materiálů mezi ně spadá například materiál s označením ST firmy D3O [12] či zkoumaná pěna SLC firmy SAS-TEC [10].

U energii absorbujících pěn je možné sledovat typické chování v průběhu tlakové zkoušky, viz obrázek 2.2.1. V první zóně se nachází oblast lineární elasticity, obvykle se jedná o oblast deformací menších než 5 % [11]. U otevřených buněk pěnové struktury dochází k ohýbání jejich stěn, u uzavřených buněk naopak k jejich napínání. Druhou oblastí je takzvaná Plateau zóna, zde k příbytku napětí v průběhu deformace buď nedochází, nebo je velice pozvolný. V reálné situaci tato oblast představuje borcení stěn buněk. Jako třetí následuje oblast densifikace, zde je typický prudký nárůst napětí v závislosti na deformaci. U otevřených buněčných struktur přechází chování pěny v chování matrice, u uzavřených struktur je mechanická odezva ovlivněna stlačeným plynem uvnitř buněk [13].



Obr. 2.2.1: Schéma zón tlakové zkoušky

Z hlediska simulace jsou často řešenou problematikou především chrániče krční páteře a hlavy. Jako příklad lze uvést článek [14], který se podobně jako tato práce zaměřuje na srovnání provedených experimentů s konečnoprvkovou simulací běžně dostupné helmy pro motocyklisty, podrobenou pádovým zkouškám. Zde je i názorná kombinace

materiálů, kterými byly pěna z expandovaného polystyrenu, krytá svrchní skořepinou z akrylonitril-butadien-styrenu. Skořepina byla modelována lineárně elastickým materiálem. Spodní vrstva, představující vnitřní polstrování helmy, byla ze simulace vyřazena, nepředstavovala výrazný vliv na přenesenou sílu při dopadu. Pro modelaci hlavní pěnové vrstvy byl vybrán elasto-plastický materiálový model, kde elastickou složku představovaly hodnoty Youngova modulu pružnosti E a Poissonovy konstanty ν , získané z provedené série tlakových zkoušek. Plastickou složku tvořil materiálový model *Crushable foam*. Hlava byla modelována jako absolutně tuhé těleso. Pro úsporu času výpočtu byla helma umístěna těsně nad podložku, s počáteční podmínkou požadované dopadové rychlosti.

Podobnou metodiku lze nalézt i v článku [15], kde je opět přistoupeno k modelaci helmy ze tří částí: svrchní skořepiny, pěnového jádra a vnitřního polstrování, které bylo opět z analýzy vyloučeno. Helma byla přidána k modelu lidského těla a byla použita při simulaci nárazu motocyklisty do svodidel. Opět se tedy jedná o zatížení rázovou silou.

V souvislosti s předchozí prací lze odkázat na článek [16], který se mimo jiné soustředil na identifikaci materiálových parametrů jednotlivých komponent helmy. Zde je pro případ akrylonitril-butadien-styrenové nebo polykarbonátové skořepiny jako vhodný materiálový model připuštěn elasto-plastický materiálový model. Ten je ovšem považován za zjednodušený model skutečného materiálu. V případě kompozitní skořepiny tento materiál není vhodný. Při jeho použití může dojít k nepodchycení možné delaminace či praskání matrice. Pro případ kompozitu je vhodné namodelovat jeho exaktní složení po vrstvách. Naopak pro pěnový segment, sloužící jako hlavní tlumicí faktor, byl v simulaci použit materiálový model *Crushable foam*.

Jako další možný materiálový model pro modelaci pěnového segmentu helmy lze považovat *Low-density foam*. V článku [17] je sice tento materiál použit pro modelaci polstrování opěrky hlavy v automobilu, ale právě tam má důležitou funkci absorbovat energii při nárazu. Dá se tedy říci, že plní podobný úkol jako výše zmiňované materiály. Jeho výhodou je především schopnost popsat velké deformace pěny bez trvalých plastických deformací, které zůstanou po odlehčení materiálu.

Low-density foam lze použít i při modelování ochranných prvků, jak je ukázáno v [18], kde slouží pro modelaci pěnové vrstvy chrániče zad pro motocyklisty.

Jak je z předešlého textu patrné, při modelaci ochranných prvků se nejčastěji setkáváme s rázovým zatížením ať už prostřednictvím přímé simulace standardní zkoušky vztahující se k danému druhu chrániče, nebo předpokládaného stavu v průběhu dopravní nehody. Klíčovou je pro simulaci volba materiálových modelů, která pro případ chráničů není vždy jasně dána.

3 Materiálový model

Zvolení vhodného materiálového modelu je klíčové pro schopnost správně simulovat chování pěnového chrániče. Při jeho volbě je proto důležité se důkladně zamyslet nad klíčovými vlastnostmi, které je potřeba při simulaci podchytit. Pro zkoumaný chránič se především jedná o schopnost materiálů absorbovat energii při nárazu.

Jak vyplývá z provedené řešerše v sekci 2.2 Simulace chráničů, často se setkáváme s materiálovým modelem *Crushable foam*, jednou možností je i materiálový model *Low-density foam*. Dle článků [9] a [18] je další přípustnou variantou i viskoelastický materiálový model.

3.1 Viskoelastický materiál

Jedním z přípustných materiálových modelů je viskoelastický materiálový model. Ten, jak už jeho název prozrazuje, představuje kombinaci viskózního chování Newtonovských kapalin a elastického chování pevných materiálů v oblasti Hookeova zákona. U dokonale viskoelastického materiálu se v případě cyklického zatěžování a odlehčování část energie disipuje na teplo, zatímco druhá část je využita při odlehčování [19]. Klíčovou vlastností je především závislost na rychlosti deformace, se kterou se u elastických materiálů nesetkáme [20].

Viskózní charakter materiálu si lze představit jako chování tlumiče a elastické chování jako pružiny. Viskoelastický materiál je tvořen kombinací obou prvků. Jejich konkrétní složení, tedy počet a sériové nebo paralelní zapojení, dále specifikuje chování výsledného materiálu. Základními modely jsou Maxwellův a Kelvinův.

Maxwellův model si lze představit jako zapojení tlumiče a pružiny do série, viz obrázek 3.1.1. Formálně lze chování modelu popsat následujícím vztahem:

$$\dot{\sigma} + \frac{E}{\mu}\sigma = E\dot{\epsilon}, \quad (3.1)$$

kde σ je působící napětí, E je modul pružnosti pružiny, μ je viskozita tlumiče, $\dot{\epsilon}$ je rychlost deformace [21].

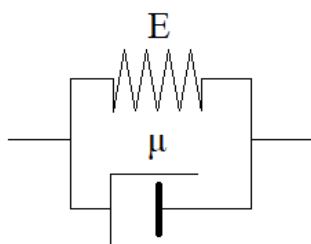


Obr. 3.1.1: Schéma Maxwellova modelu

Dalším základním modelem je Kelvinův model, někdy též označovaný jako Voigtův model. V tomto případě jsou tlumič a pružina zapojeny paralelně, jak je ukázáno na obrázku 3.1.2. Kelvinův model popisuje následující vztah:

$$\sigma = E\epsilon + \mu\dot{\epsilon}, \quad (3.2)$$

kde σ je působící napětí, E je modul pružnosti pružiny, ϵ deformace, μ je viskozita tlumiče, $\dot{\epsilon}$ je rychlost deformace [21].

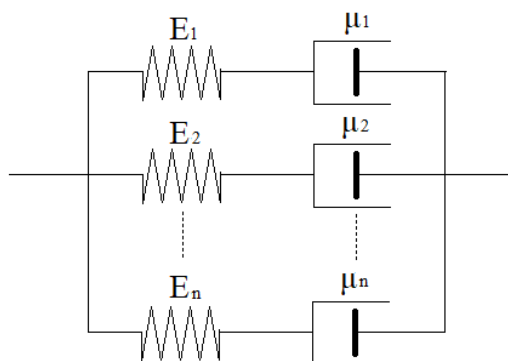


Obr. 3.1.2: Schéma Kelvinova modelu

Jako příklad složitější struktury modelu lze uvést zobecněný Maxwellův model, zobrazený na obrázku 3.1.3. Jednotlivé větve představují základní Maxwellovy modely uspořádané paralelně. Model, složený z n Maxwellových modelů, lze popsat soustavou n rovnic ve tvaru

$$\sigma_i + \tau_i D\sigma_i = \mu_i D\epsilon(t), \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (3.3)$$

kde σ_i je působící napětí v i -té větvi, τ_i je relaxační čas v i -té větvi, D je diferenční operátor, $D = \frac{d}{dt}$, μ_i je viskozita tlumiče v i -té větvi, $\epsilon(t)$ je celková deformace v čase t [21].



Obr. 3.1.3: Schéma Zobecněného Maxwellova modelu

3.2 Crushable foam

Často zmiňovaným modelem v souvislosti s modelováním ochranných prvků je takzvaný *Crushable foam*.

Tento materiálový model, používaný pro popis energii absorbujících prvků, je vhodný především pro modelaci monotónního zatěžování s citlivostí na rychlost deformace. V průběhu zatěžování u něj dochází k deformacím buněčné struktury, které po odlehčení okamžitě nemizí a lze je tedy idealizovat jako plastické deformace v krátkém časovém úseku [22]. Dalším charakteristickým znakem pro pěny typu *Crushable foam* je také menší odolnost vůči tahovým zatížením, kdy dochází k praskání buněčné struktury již při menším zatížení. Naopak v případě tlakových zatížení vykazuje tento materiál výrazně větší tuhost [23].

Model je tvořen spojením izotropického lineárně-elastického modelu s plastickou složkou. Plastická složka je reprezentována tuhnutím, které lze popsat obálkovou funkcí

$$\mathcal{F}(q, p) = \sqrt{q^2 + \alpha^2(\bar{\epsilon}_k) \left(p - \frac{p_c - p_t}{2}\right)^2} - \alpha(\bar{\epsilon}_k) \left(p - \frac{p_c - p_t}{2}\right), \quad (3.4)$$

kde q je Misesovo napětí, $\bar{\epsilon}_k$ je plastická deformace, p je tlak, α je materiálový parametr, p_c je napětí při hydrostatickém stlačení, p_t je tlak materiálu při hydrostatickém pnutí [23], [24].

Hodnotu materiálového parametru α lze určit jako

$$\alpha = \frac{\bar{\tau}_y}{\sqrt{p_t p_c - \frac{1}{3}\bar{\tau}_y(p_t - p_c) - \frac{1}{9}\bar{\tau}_y^2}}, \quad (3.5)$$

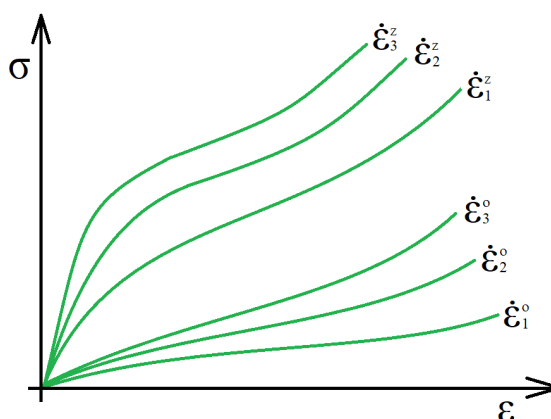
kde τ_y je napětí ve směru hlavního napětí při tlakovém namáhání [23].

3.3 Low-density foam

Dalším modelem, vhodným k modelování vysoce stlačitelných pěn, je takzvaný *Low-density foam*. Tento materiálový model je vhodný především pro popis pěn vykazujících značnou závislost na rychlosti deformace, používaných v automobilovém průmyslu jako pasivní ochranné prvky.

Model je vhodný zejména pro modelaci pěn vyznačujících se odolností vůči trvalým permanentním deformacím, typických například u viskoelastických materiálů, které mají otevřenou strukturu. Jedná se o pěny, u kterých převažují zcela otevřené buňky, které při deformaci umožňují uniknutí plynu ze své struktury. Je-li na zkoumanou pěnu nahlíženo jako na takzvaný kompozit třetího druhu [25], který je tvořen maticí v pevném skupenství a plynnou disperzí, lze předpokládat, že při velkých deformacích postupně přejde chování pěnové struktury v chování samotné matrice [26].

Materiálový model je jednoduše definován množinou hysterezních křivek, které představují závislost nominálního napětí na nominální deformaci [27]. Tyto křivky jsou získané ze série provedených tahových a tlakových zkoušek. Hysterezní křivky jsou rozděleny dle zatěžovací a odlehčovací části experimentu. Jednotlivé křivky jsou uváděny v závislosti na konstantní teplotě a konstantní rychlosti deformace prováděného experimentu. Popsané schéma je pro konstantní teplotu zobrazeno na obrázku 3.3, označení "z" představuje zatěžovací část tlakové zkoušky, "o" je odlehčovací část.



Obr. 3.3.1: Materiálový model *Low-density foam*

4 Identifikace materiálových parametrů

Celý proces získání finálního materiálového modelu lze rozdělit do několika fází. Nejprve byly provedeny experimenty, které posloužily jako zdroj cílových dat. Následně byly vytvořeny simulace odpovídající provedeným experimentům se zvoleným materiálovým modelem. Dále bylo přistoupeno k identifikaci parametrů materiálového modelu.

4.1 Experiment

Pádová zkouška byla zvolena jako vhodný experiment pro získání cílových dat pro budoucí identifikaci materiálových parametrů pěny chrániče SAS-TEC SCL-2, dále označované jako SCL. Tento druh experimentu byl vybrán především z toho důvodu, že se nejvíce přibližuje skutečnému zatížení jak při standardní zkoušce, tak při samotné dopravní nehodě. Při tomto experimentu byl zároveň vyšetřen i vliv teploty.

Pádová zkouška byla provedena na pádové věži zkonstruované zaměstnanci Katedry mechaniky při Západočeské univerzitě v Plzni, zobrazené na obrázku 4.1.1. Pro experiment byl použit razník s plochou ocelovou hlavou o váze 5,25 kg. Přenesená síla byla měřena siloměrem KISTLER 9351B s citlivostí 3,822 pC/N, umístěným pod plochou ocelovou podložkou. Siloměr byl zapojen přes zesilovač Brüel & Kjær 2635 a převodník napětí Statron 2223 do měřicí karty NI 9215 a připevněn k základně o hmotnosti 300 kg.

Posunutí razníku bylo měřeno dvěma lasery Micro-Epsilon optoNCDT 2300-50 s citlivostí 0,8 μm , které byly umístěny na obou stranách příčnicku sloužícímu k vedení razníku. Oba lasery byly připojeny do měřicí karty NI 9215.

Dále bylo měřeno zrychlení razníku akcelerometrem KISTLER 8742A5 s citlivostí 1,087 mV/g, který byl zapojen do měřicí karty NI 9234. Vzorkovací frekvence byla 26 kHz. Záznam dat byl proveden v programu National Instrument Signal Express. Schéma zapojení je na obrázku 4.1.2.

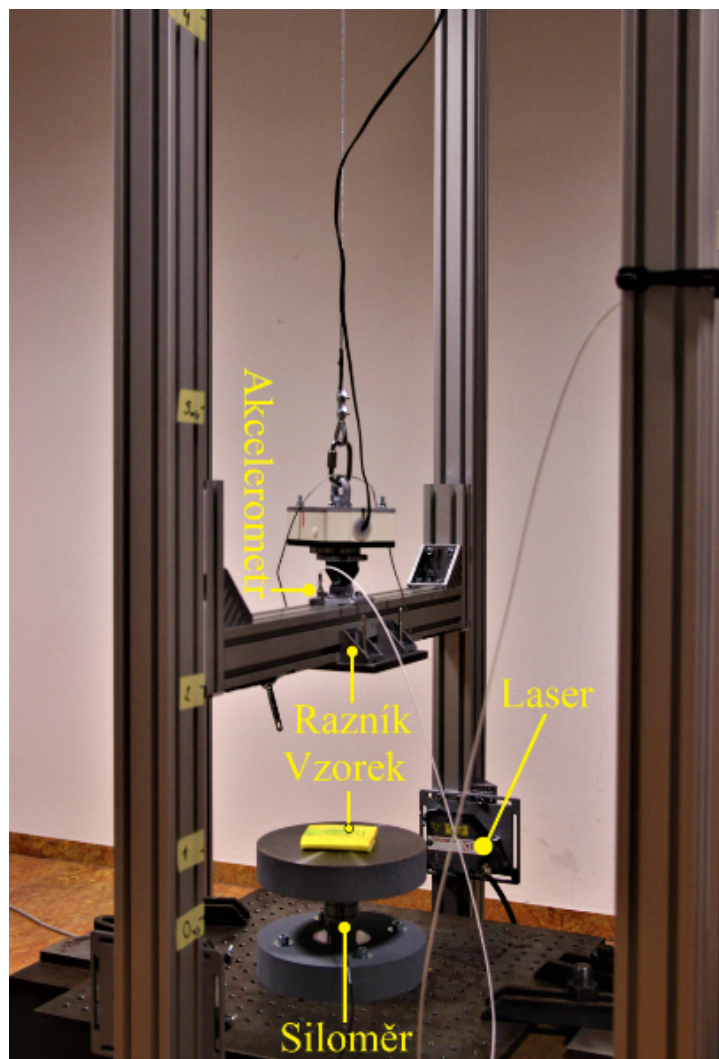
Pádová zkouška byla provedena pro šest dopadových rychlostí $v = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Dopadové rychlosti byly zajištěny patřičnou výškou h_v , ze které byl razník uvolňován. Ta byla stanovena následovně:

$$h_v = \frac{v^2}{2 \cdot g} + l_0, \quad (4.1)$$

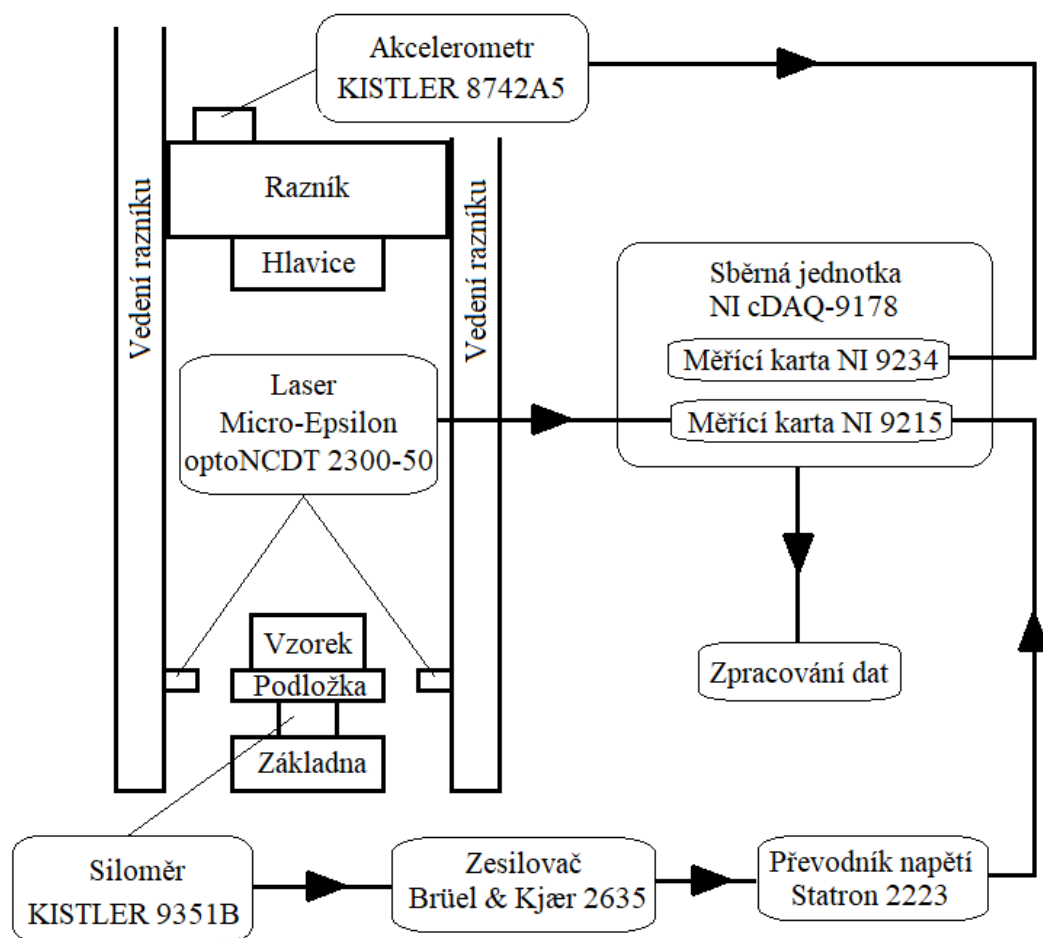
kde g je gravitační zrychlení 9,81 $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ a l_0 je výška vzorku 11 mm. Vypočtené hodnoty jsou společně s dalšími parametry vzorků, jako jsou délky stran podstavy b_{v1} a b_{v2} a hmotnost vzorku m_v , uvedeny v tabulce 4.1.1.

Experiment byl proveden pro tři teploty vzorku $T = \{22, 40, 50\}$ °C. Těmto teplotám byly vzorky vystaveny po jednu hodinu před uskutečněním měření.

Vzorky byly použity opakovaně, vždy pro stejnou dopadovou rychlost, postupně pro 22, 40 a 50 °C. Mezi jednotlivými opakováními bylo ponecháno minimálně 24 hodin na jejich relaxaci.



Obr. 4.1.1: Sestava pádové věže



Obr. 4.1.2: Schéma zapojení snímačů - pádová zkouška se vzorky

Tab. 4.1.1: Parametry vzorků

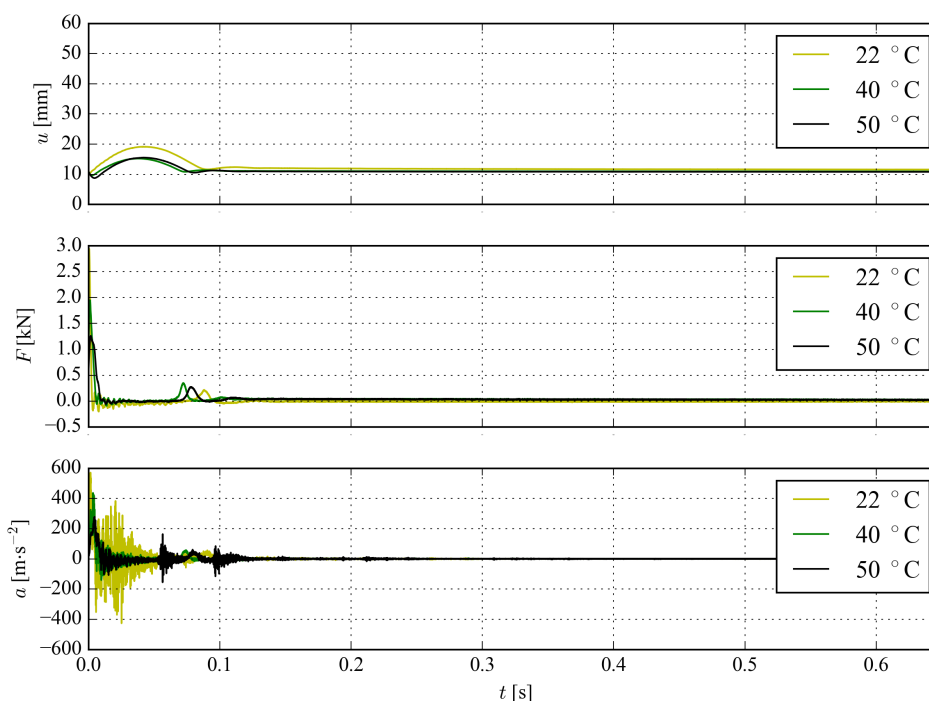
v [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]	1	2	3	4	5	6
h_v [mm]	62	214	470	826	1285	1846
b_{v1} [mm]	80	80	81	80	80	80
b_{v2} [mm]	80	80	80	79	80	80
m_v [g]	18	19	18	19	17	18

4.1.1 Změřená data

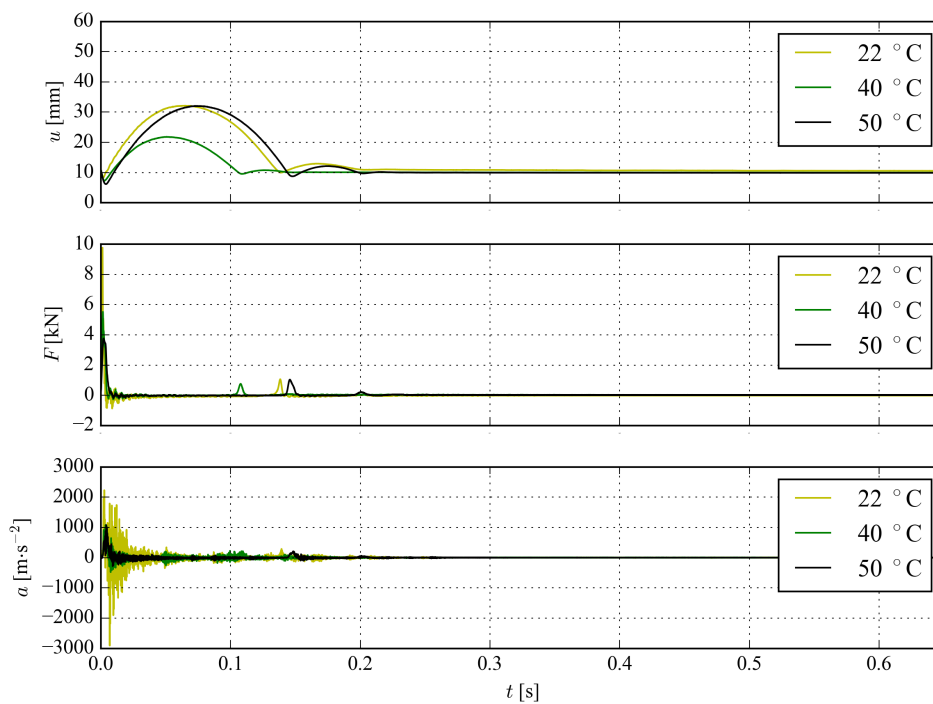
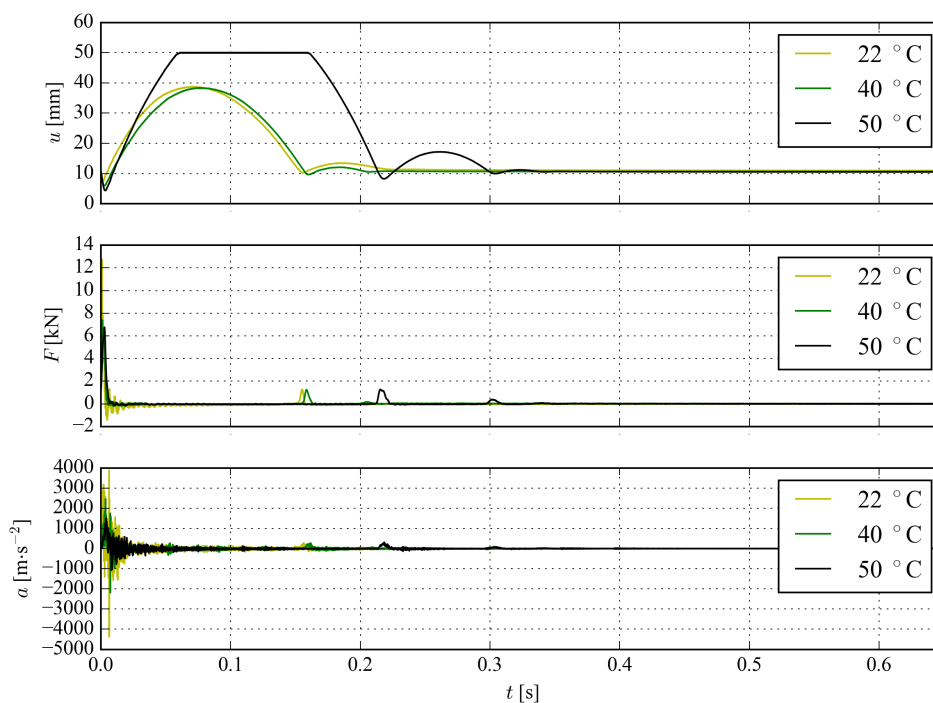
Získaná data jsou zobrazena na obrázcích 4.1.3 - 4.1.8. Jednotlivé obrázky obsahují tři grafy pro tři měřené veličiny, zároveň ukazují srovnání dat pro zkoumané teploty. První graf ukazuje posunutí razníku u , kde $u = 0$ je přímý kontakt razníku s podložkou. Druhý graf zobrazuje průběh síly F změřený siloměrem. Třetí graf vynáší zpomalení razníku a . Počátek měření je sjednocen na okamžik kontaktu razníku s pěnovým vzorkem $u(t_0) = 11$ mm, délka časové osy byla stanovena na 0,65 s, po překročení této hodnoty nebyly změřeny významné změny zkoumaných veličin.

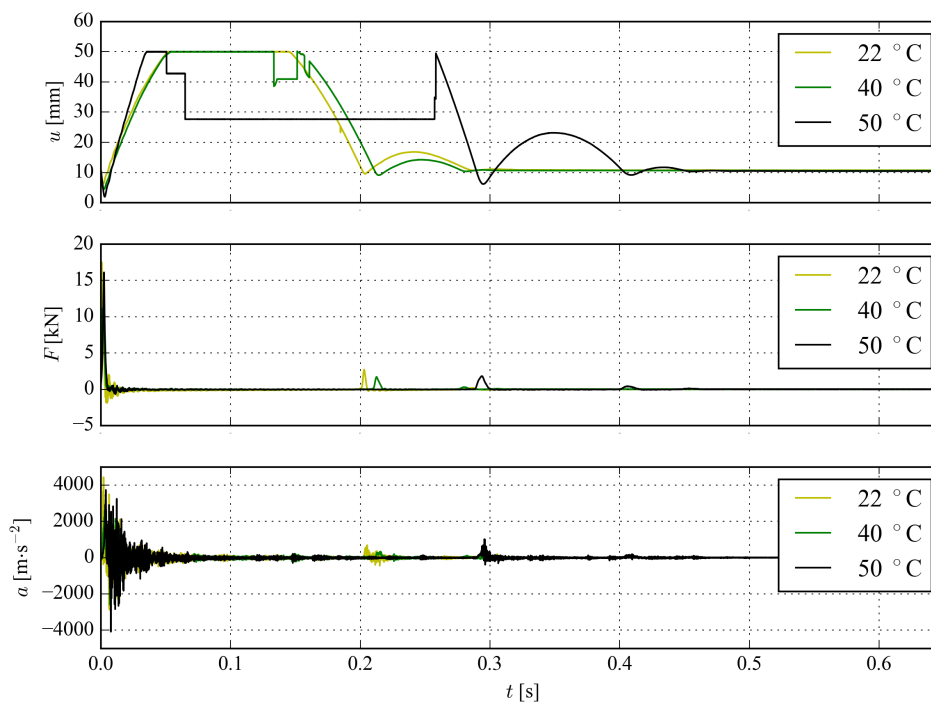
Na grafech posunutí razníku $u(t)$ jsou patrné jeho odskoky. Od dopadové rychlosti $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, (zobrazen na obrázku 4.1.4) dochází při odskoku k překročení rozsahu použitých laserů, který je 50 mm, u grafů na obrázcích 4.1.5 - 4.1.8 mají změřená data po překročení limitů laserů schodovitý charakter. Tato data jsou vyloučena z další práce.

Pro dopadovou rychlost $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ došlo pro teplotu $50 \text{ }^\circ\text{C}$ ke kontaktu razníku s podložkou v případě druhotného dopadu (obr. 4.1.8). To bylo zapříčiněno odskočením vzorku ze středu podložky po prvním nárazu. Data druhotného dopadu byla vyloučena z další práce.

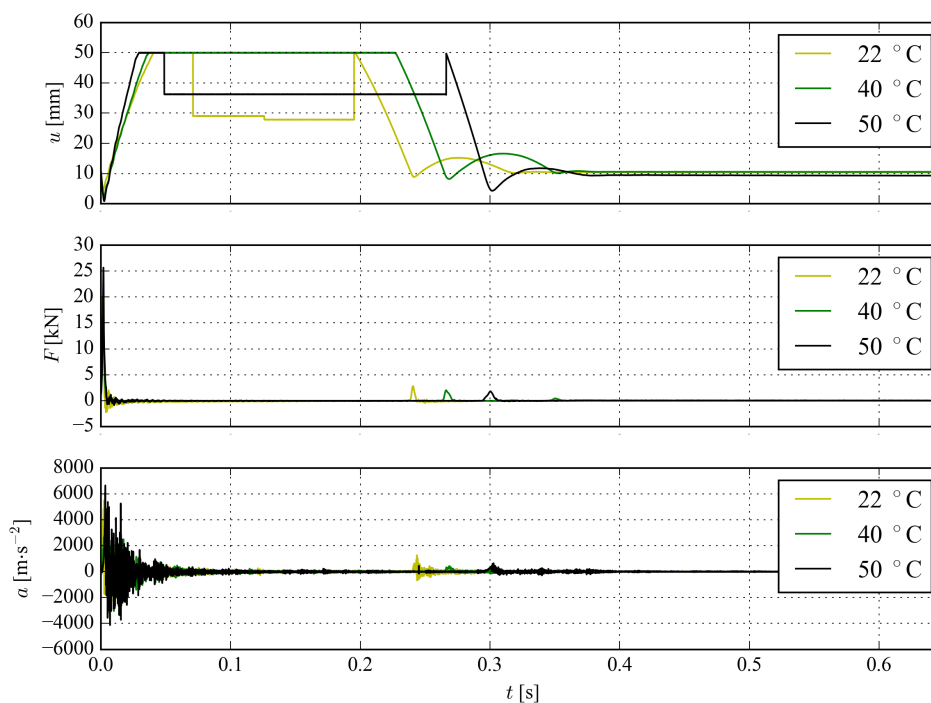


Obr. 4.1.3: Data - $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

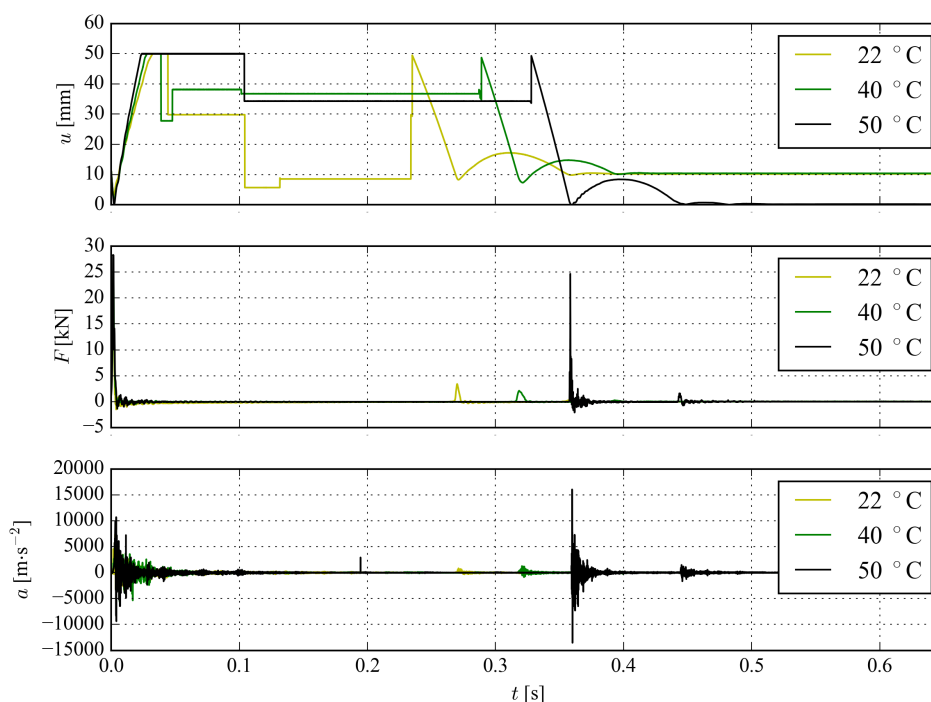

 Obr. 4.1.4: Data - $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

 Obr. 4.1.5: Data - $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$



Obr. 4.1.6: Data - $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$



Obr. 4.1.7: Data - $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$


 Obr. 4.1.8: Data - $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Celkové srovnání změřených dat je zobrazeno na obrázcích 4.1.9 a 4.1.10. Na obrázku 4.1.9 jsou zobrazena srovnání minimálních posunutí razníku v závislosti na dopadové rychlosti a teplotě vzorku. Z grafu je zřejmé, že oba faktory mají nepříznivý vliv na chování pěny, a tedy maximální tlaková deformace v závislosti na nich roste.

Na obrázku 4.1.10 jsou zobrazena srovnání maximálních sil v závislosti na dopadové rychlosti a teplotě vzorku. Tyto síly byly určeny dvěma způsoby: změřeny přímo siloměrem F_f a nepřímo, pomocí změřeného zrychlení dle následujícího vztahu:

$$F_a = m_r \cdot a, \quad (4.2)$$

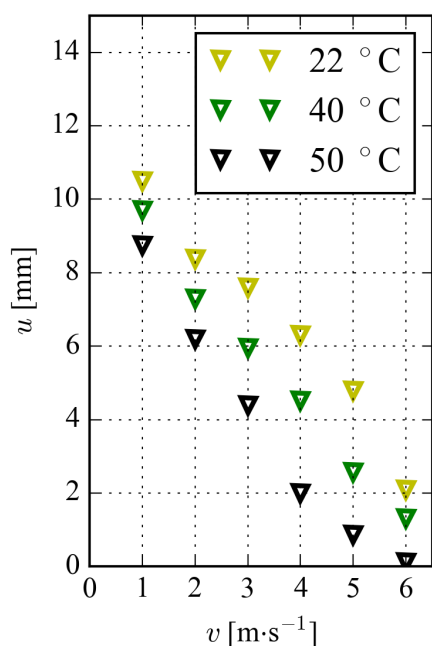
kde a jsou hodnoty změřené akcelerometrem, který byl připevněn na razníku, a m_r je hmotnost razníku.

Oba uvedené způsoby určení síly vykazují stejný charakter jak pro rostoucí dopadovou rychlost, tak pro rostoucí teplotu, nicméně s rostoucí dopadovou rychlostí dochází i k rostoucí odchylce maximálních sil.

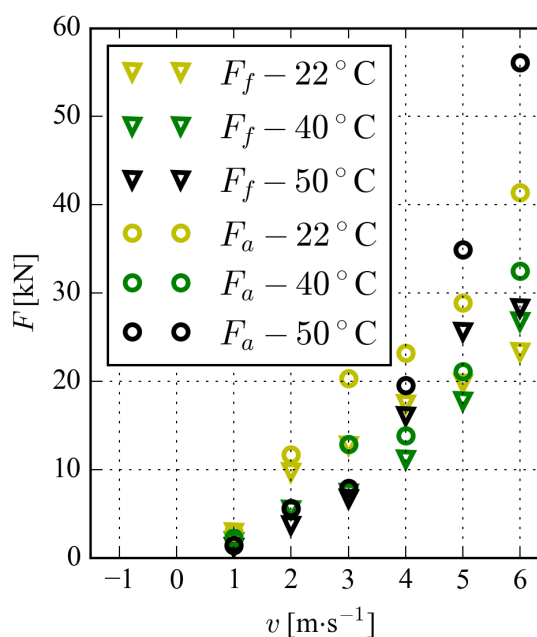
Z obrázku 4.1.10 je patrné, že pro dopadové rychlosti menší $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ má zvyšující se teplota obecně pozitivní vliv a hodnoty síly s teplotou klesají. U vyšších rychlostí již dochází s rostoucí teplotou i k růstu změřených hodnot síly.

Pro další práci byly použity hodnoty změřené siloměrem, protože tento způsob stanovení síly odpovídá i standardní zkoušce.

Z obou obrázků 4.1.9 a 4.1.10 je patrné, že tuhost pěny klesá v závislosti na rostoucí teplotě. Změřené hodnoty minimálního posunutí razníku u_{\min}^{exp} a maximální přenesené síly F_{\max}^{exp} uvedené v tabulce 4.1.2 byly použity pro následnou identifikaci materiálových parametrů.



Obr. 4.1.9: Minima posunutí razníku



Obr. 4.1.10: Maximální síly

Tab. 4.1.2: Tabulka extrémů změřených hodnot

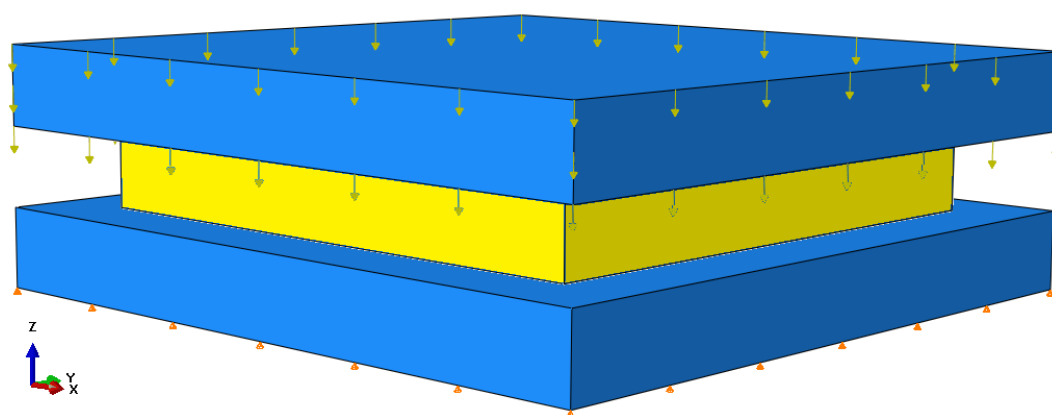
T [°C]	22		40		50	
v [m · s ⁻¹]	F_{\max}^{exp} [N]	u_{\min}^{exp} [mm]	F_{\max}^{exp} [N]	u_{\min}^{exp} [mm]	F_{\max}^{exp} [N]	u_{\min}^{exp} [mm]
1	2944	10,50	1949	9,70	1260	8,74
2	9767	8,38	5520	7,30	3767	6,20
3	12745	7,60	7389	5,96	6760	4,39
4	17480	6,30	11199	4,52	16109	2,00
5	19868	4,80	17805	2,57	25668	0,87
6	23369	2,09	26851	1,32	28317	0,12

4.2 Simulace

Aby bylo možné přistoupit k identifikaci materiálových parametrů, bylo potřeba vytvořit počítačové simulace provedené pádové zkoušky. Simulace byly vytvořeny parametricky v jazyce Python pro studentskou verzi softwaru Abaqus 6.14. Tato parametrizace simulace v oblasti materiálového modelu, předepsaného zatěžování a geometrie umožnila následnou identifikaci parametrů zvoleného materiálového modelu.

Pro simulaci byl zvolen model s prostorovými šestistěnnými prvky s osmi uzly. Geometrie vzorků odpovídala skutečným rozměrům měřených vzorků uvedených výše v tabulce 4.1.1. Mechanismus pádové věže byl zjednodušen. Jak podložka, tak razník byly modelovány pouze jako ocelové kvádry s parametry Youngova modulu $E = 210 \text{ GPa}$ a Poissonova čísla $\nu = 0,3$ přesahující rozměry vzorku. Razníku byla následně dopočtena fiktivní hustota tak, aby hmotnost razníku odpovídala 5,25 kg.

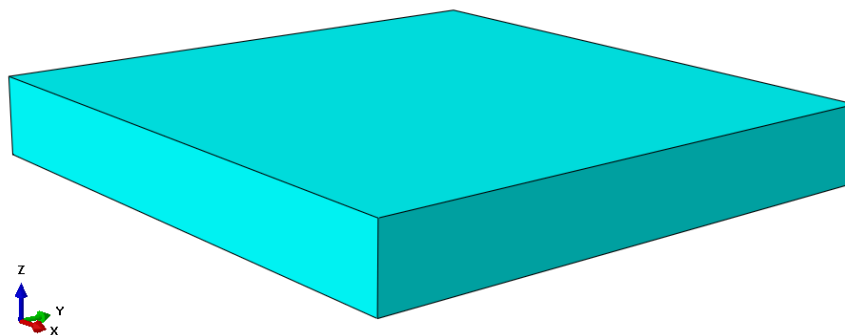
Podložce byly zamezeny posuvy ve všech třech hlavních směrech. Razníku byl umožněn pouze pohyb ve svislém směru. Z důvodu úspory doby výpočtu byl razník umístěn přímo nad horní podstavu vzorku a byla mu předepsána počáteční podmínka odpovídající požadované dopadové rychlosti, stejně jako je tomu v [14]. Dále na model působila gravitační síla. Popsaná sestava s předepsanými podmínkami a zatížením je zobrazena na obrázku 4.2.1. Simulovaný čas byl 0,4 s.



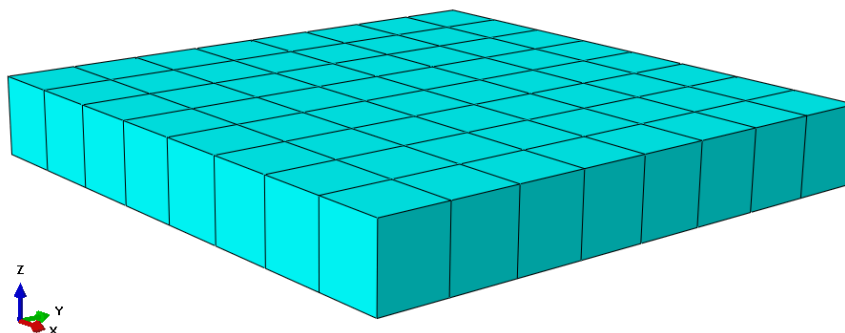
Obr. 4.2.1: Model pádové zkoušky

Z důvodu úspory času výpočtu a pro zabránění borcení elementů byl pro identifikaci nejprve použit model pěny stávající pouze z jednoho elementu (obrázek 4.2.2). Po stanovení orientačních hodnot hledaných parametrů bylo přistoupeno k identifikaci na menších elementech pěnového vzorku (obrázek 4.2.3 a 4.2.4).

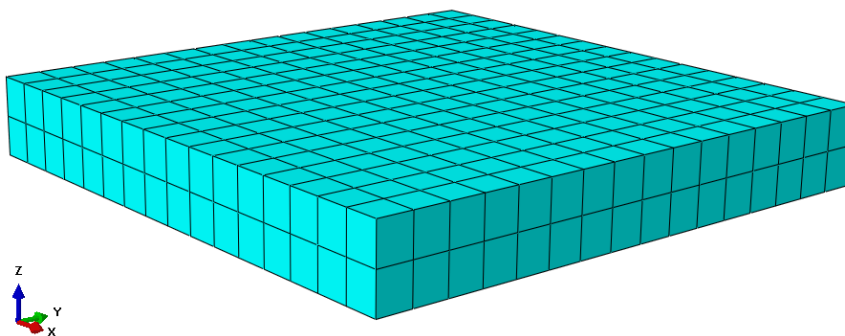
Při simulaci byly zaznamenávány hodnoty posunutí razníku a reakční síla na podložce.



Obr. 4.2.2: Použitá síť - 1



Obr. 4.2.3: Použitá síť - 2



Obr. 4.2.4: Použitá síť - 3

4.3 Identifikace

Po získání cílových dat z provedených experimentů a vytvoření jim odpovídajícím simulacím bylo možné přistoupit k identifikaci materiálových parametrů. Pro identifikaci byl použit software optiSlang 3.0.

Identifikace spočívala ve srovnávání jednotlivých návrhů modelů se skutečnými výsledky provedených měření. Toto srovnání bylo prováděno na základě cílové funkce

$$f = \sum_v \sum_T f_v^T,$$

$$f_v^T = \left(1 \cdot \frac{\sqrt{(F_{\max}^{\text{exp}} - F_{\max}^{\text{sim}})^2}}{F_{\max}^{\text{exp}}} + \frac{1}{4} \cdot \frac{\sqrt{(u_{\min}^{\text{exp}} - u_{\min}^{\text{sim}})^2}}{u_{\min}^{\text{exp}}} \right)^T \quad (4.3)$$

$$v = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\},$$

$$T = \{22, 40, 50\},$$

kde F_{\max}^{exp} představovala hodnotu maximální síly změřené z experimentu, F_{\max}^{sim} hodnotu maximální síly identifikovaného modelu, u_{\min}^{exp} minimum posunutí razníku změřené z experimentu, u_{\min}^{sim} minimum posunutí razníku ze simulace, v odpovídá příslušné pádové rychlosti a T teplotě vzorku. Identifikace tedy probíhala pro všechny provedené zkoušky současně.

Jelikož je pro posuzování chráničů dle normy [8] sledována především hodnota přenesené síly a velikost deformace je pouze kontrolována z hlediska destrukce chrániče, byla tedy i síle přiřazena vyšší důležitost. Tato důležitost byla reprezentována váhovými koeficienty v cílové funkci. Pro silovou část byl zvolen koeficient 1, pro minimum posunutí razníku $\frac{1}{4}$.

Pro samotnou identifikaci byl zvolen materiálový model *Low-density foam*. Tento materiálový model byl zvolen především na základě schopnosti popsat velké deformace bez trvalých plastických deformací, klíčovým bylo i zohlednění rychlostí deformace. Oba tyto faktory jsou důležité při modelaci zkoumané pěny SCL. Tento model je v Abaqusu reprezentován sérií křivek z tahových a tlakových zkoušek závislostí nominálního napětí na nominální deformaci závislých na rychlosti deformace a napětí. Tyto křivky vstupují do programu formou diskrétních bodů s parametrem rychlosti deformace a teploty. Pro identifikaci byly ponechány výchozí hodnoty koeficientů deformace $\alpha = 2$, $\mu_0 = 0,0001$ s, $\mu_1 = 0,005$ s.

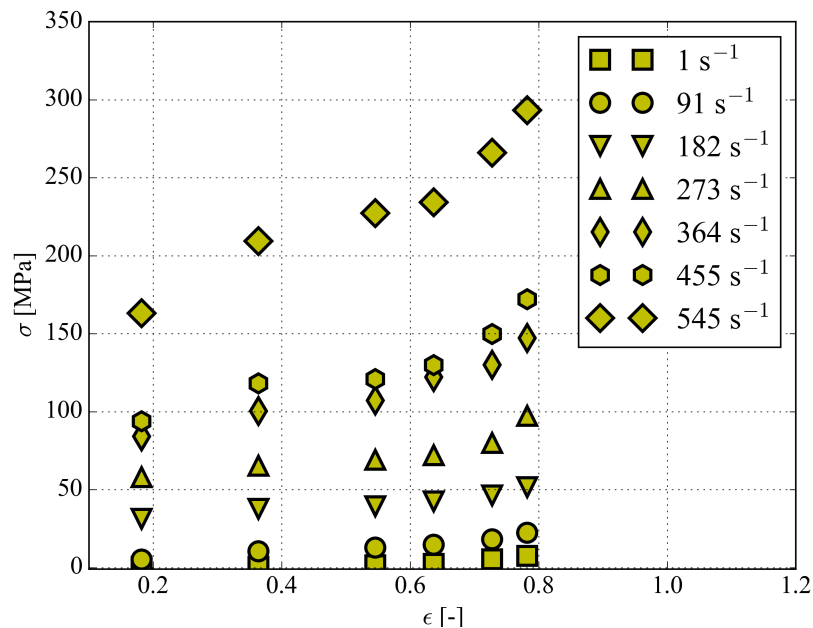
Zdrojem vstupních dat byla dříve provedená tlaková a tahová zkouška, detailně popsaná v článku [28]. Následně byly identifikovány další křivky, respektive jejich diskrétní body, pro vyšší teploty 22, 40 a 50 °C a deformační rychlosti $\dot{\epsilon} = \{1, 91, 182, 273, 364, 455, 545\}$ s⁻¹. Tyto deformační rychlosti odpovídají rychlostem deformace při tlakové zkoušce

s rychlostí zatěžování 0,01, 1, 2, 3, 4, 5 a 6 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$. Pro zjednodušení identifikace bylo předpokládáno, že jednotlivé křivky závislosti nominálního napětí na nominální deformaci mají podobný tvar, jen jsou vůči sobě posunuté, podobný trend je ukázán v [17]. V první části byly tedy identifikovány konstantní hodnoty posunutí, které přibližně vymezily další oblast identifikace. Následně byly parametry rozvolněny a identifikace probíhala pro jednotlivé diskrétní body zvlášť. Byla tak umožněna změna tvaru deformačních křivek.

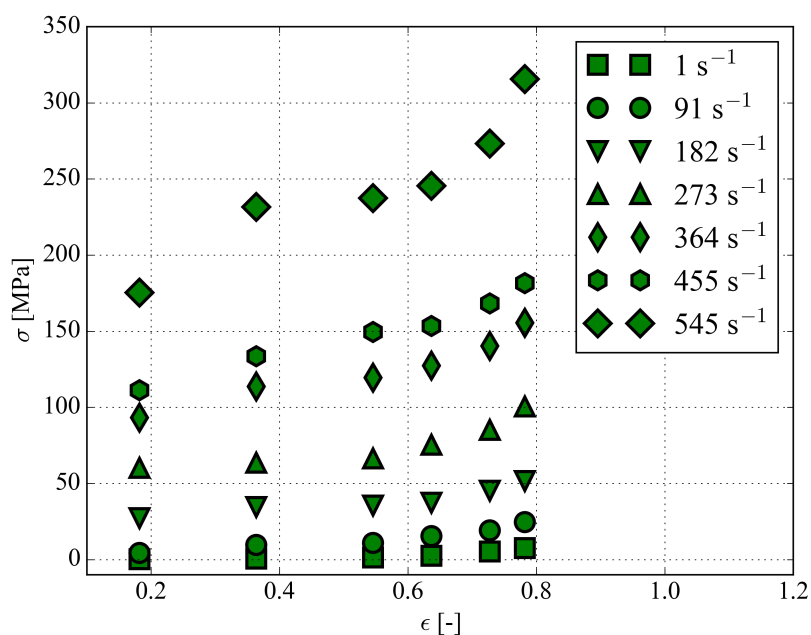
Identifikace byla provedena na základě evolučního algoritmu. Tomu byla nastavena větší počáteční generace, jako selekční metoda byla zvolena turnajová s velikostí 5 - 8. Identifikace byla prováděna postupně, nejprve v řádech MPa, následně v řádech kPa. Identifikace probíhala tedy ve více krocích, velikost počátečních generací se pohybovala v rozmezí 500 - 2000 návrhů. Následné generace měly velikost 100 - 400 návrhů. Zastavovací podmínka byla nastavena na stagnaci nejlepšího designu po 20 generací, případně dosažení 200 generací.

4.4 Výsledky

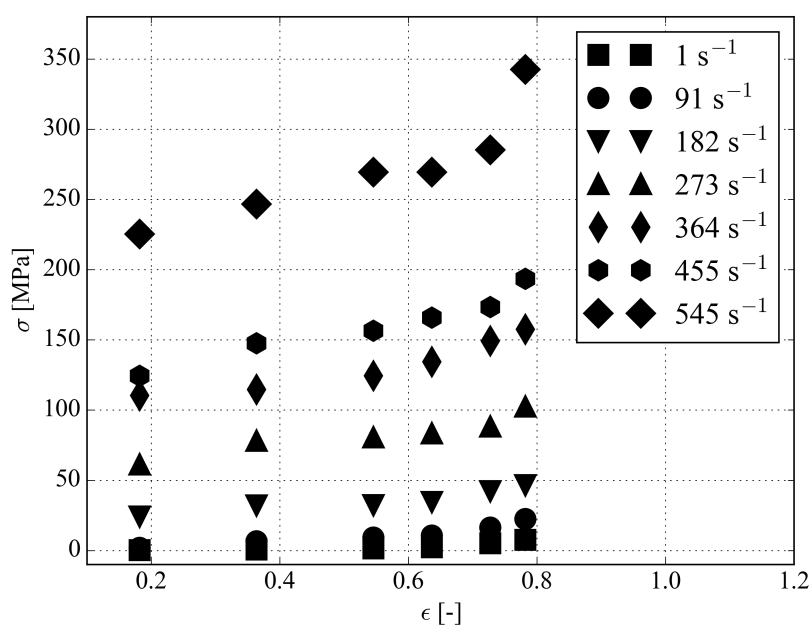
Pro přehlednost byly identifikované parametry materiálového modelu *Low-density foam* rozděleny pro konstantní teploty 22, 40 a 50 °C a jsou zobrazeny na obrázcích 4.4.1 až 4.4.3. Na každém z obrázků jsou zobrazeny identifikované diskrétní body závislosti nominálního napětí na nominální deformaci a deformační rychlosti $\dot{\epsilon} = \{1, 91, 182, 273, 364, 455, 545\} \text{ s}^{-1}$.



Obr. 4.4.1: Identifikované parametry - část 1 - 22 °C

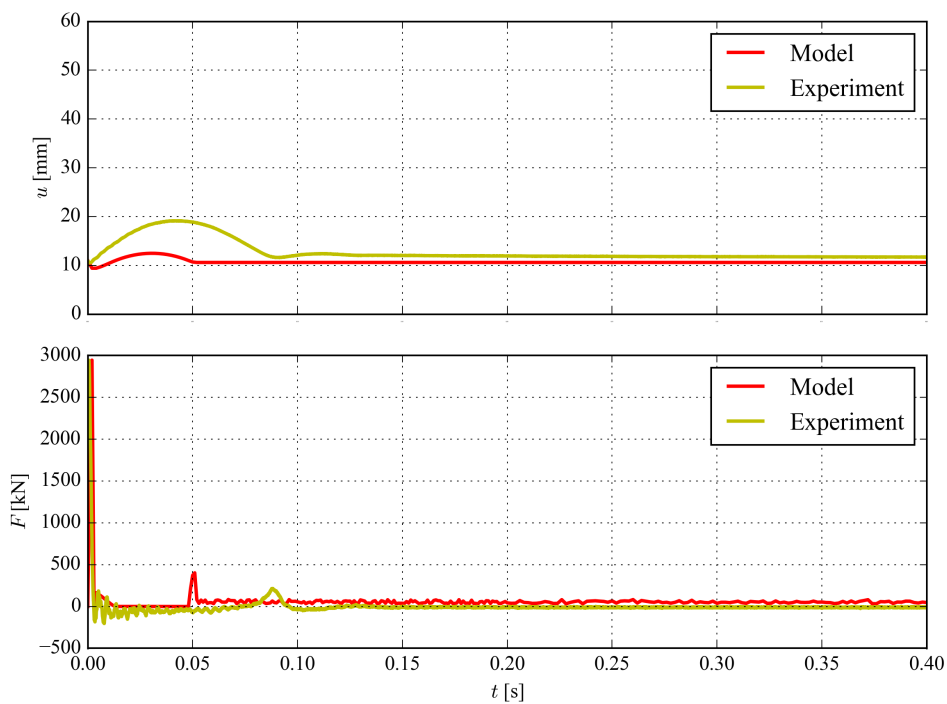
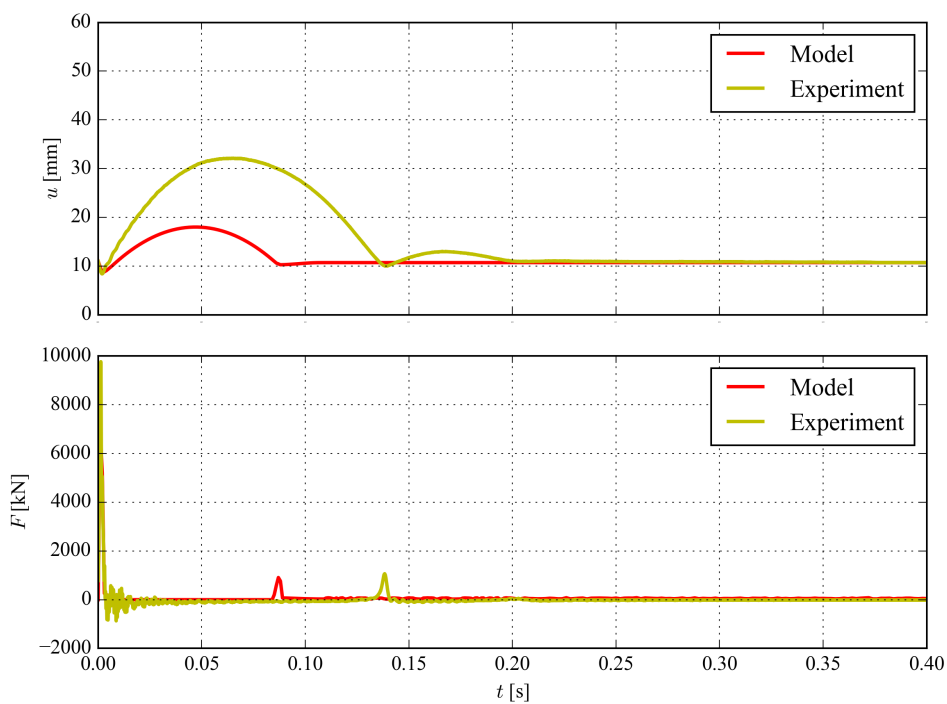


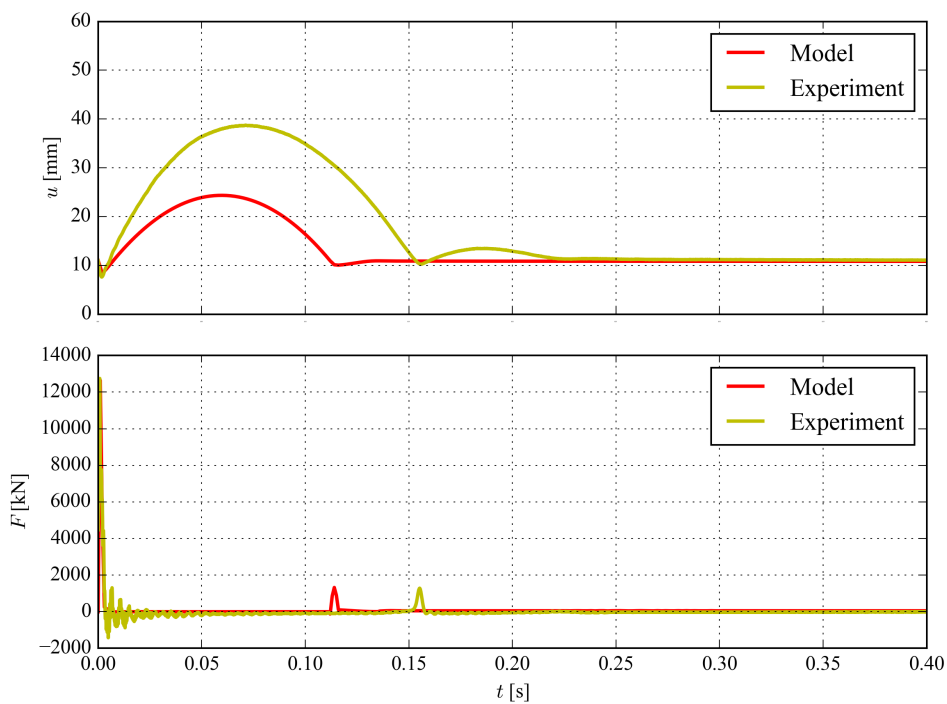
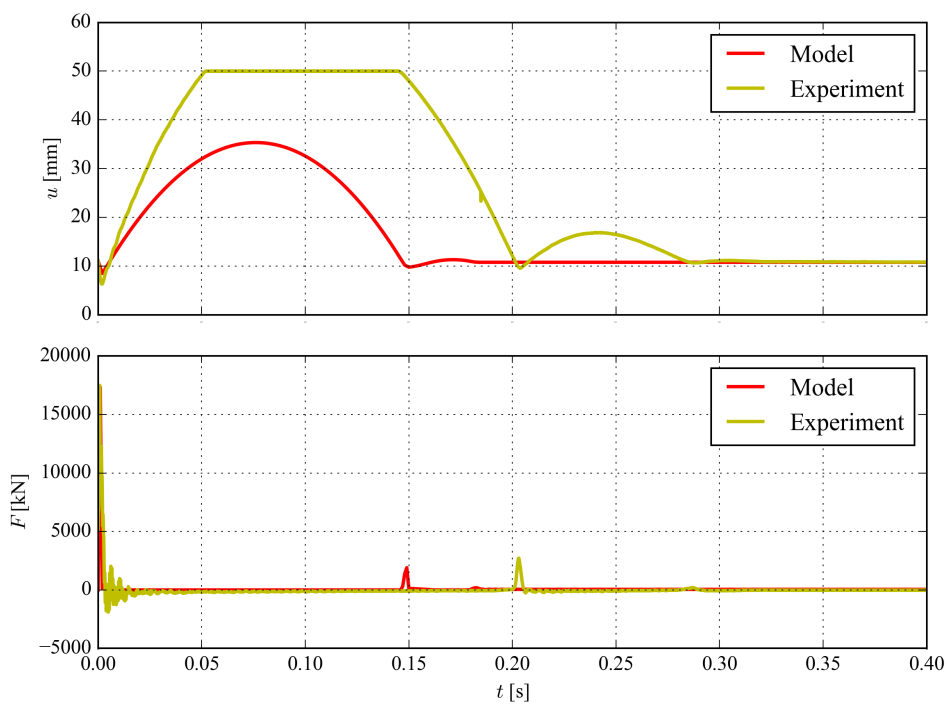
Obr. 4.4.2: Identifikované parametry - část 2 - 40 °C

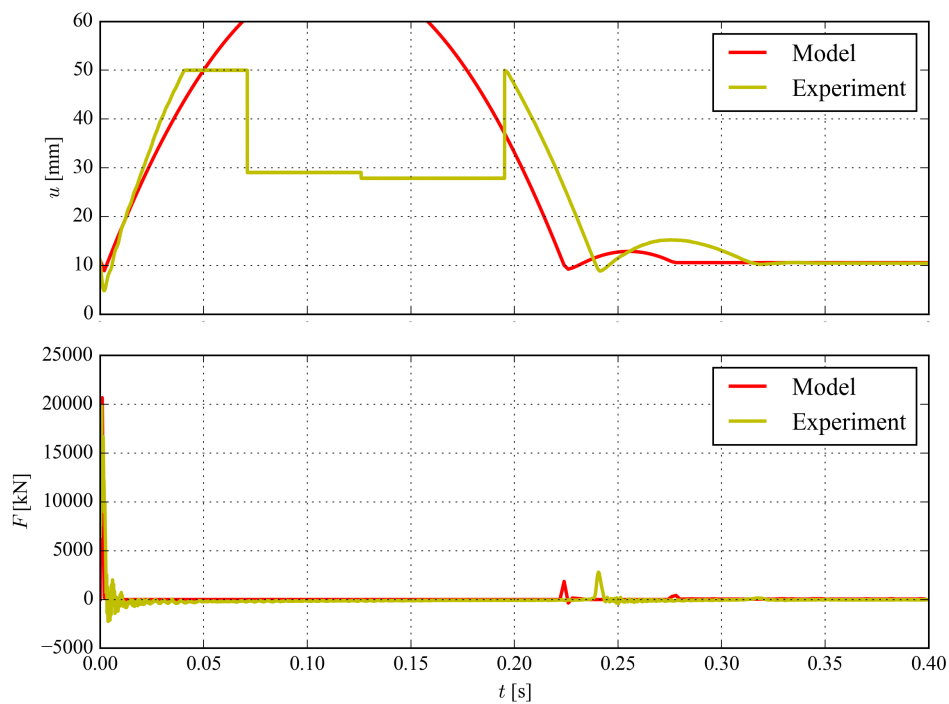
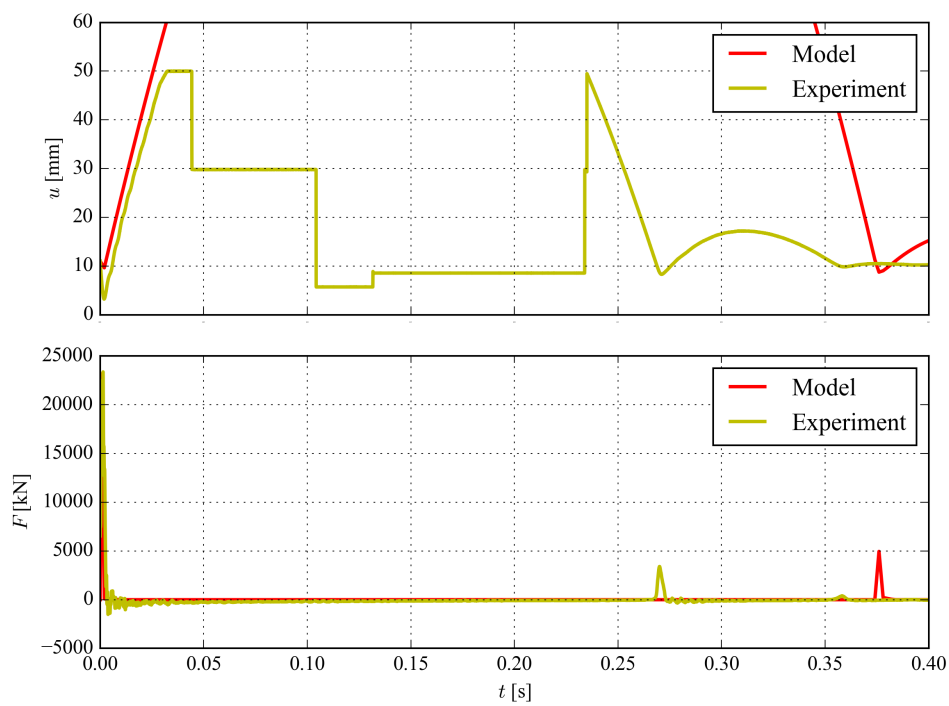


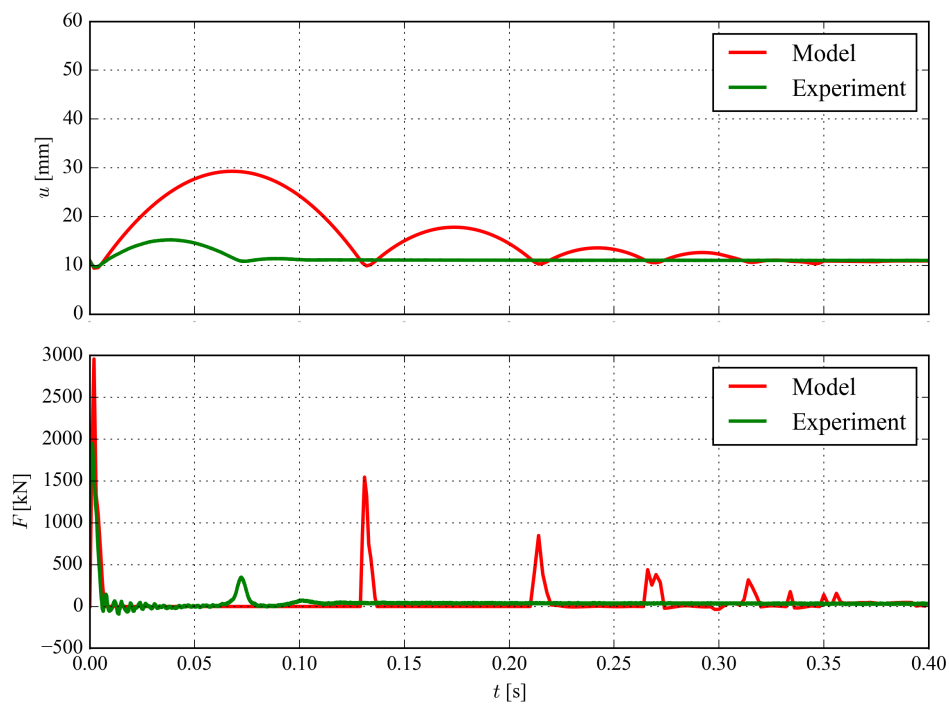
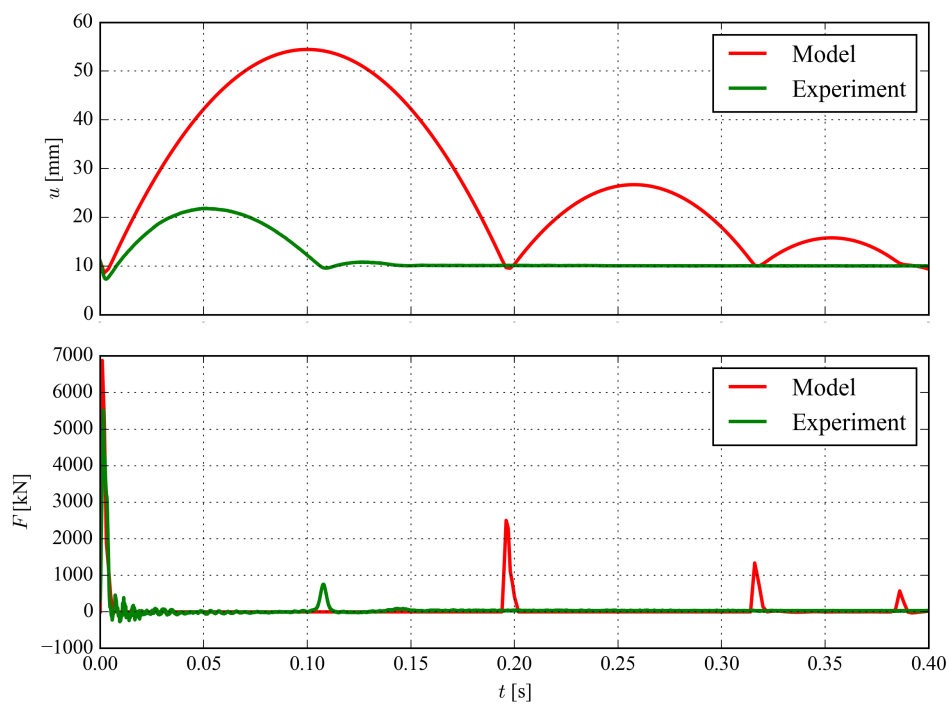
Obr. 4.4.3: Identifikované parametry - část 3 - 50 °C

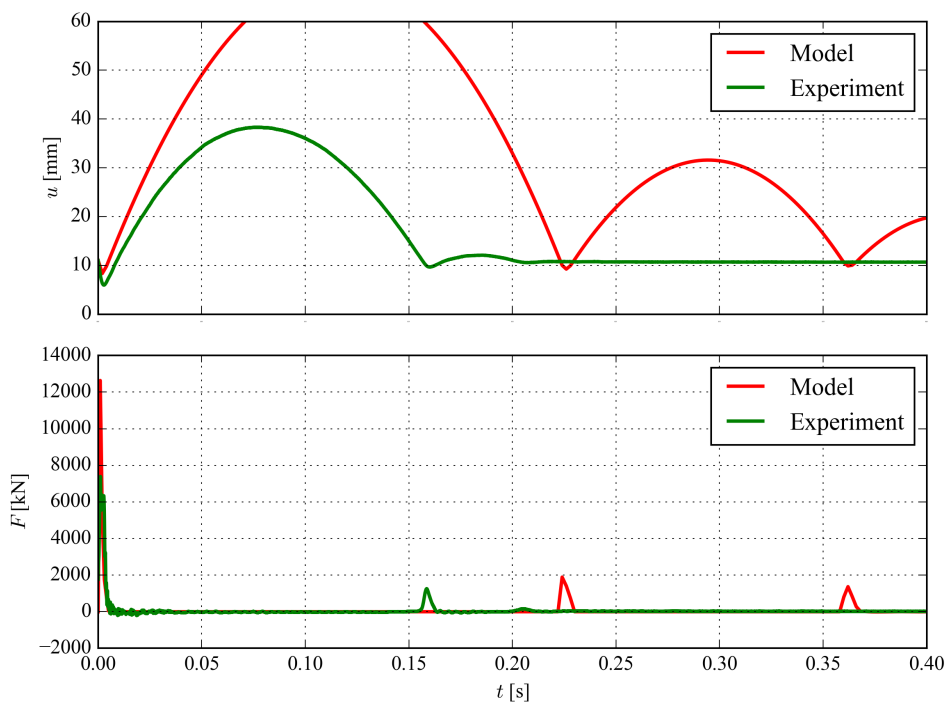
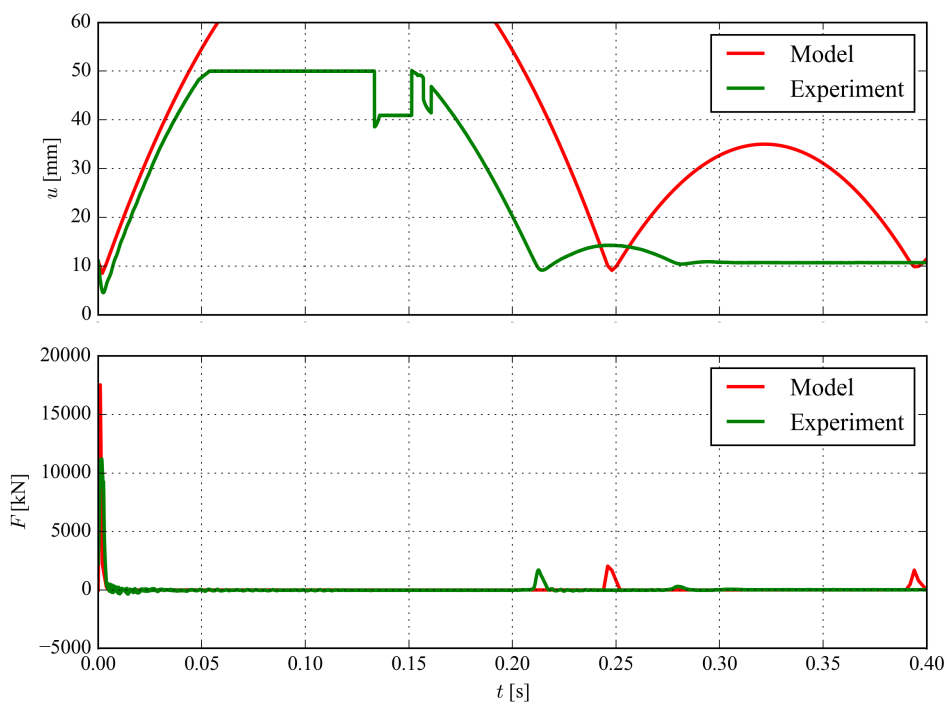
Srovnání simulace s experimentem je pro jednotlivé pády zobrazeno na obrázcích 4.4.4 až 4.4.21, souhrnné srovnání je zobrazeno na obrázcích 4.4.22 a 4.4.23 a uvedeno v tabulce 4.4.1, kde je i vyčíslena odchylka experimentu a simulace s výsledným materiálovým modelem ς .

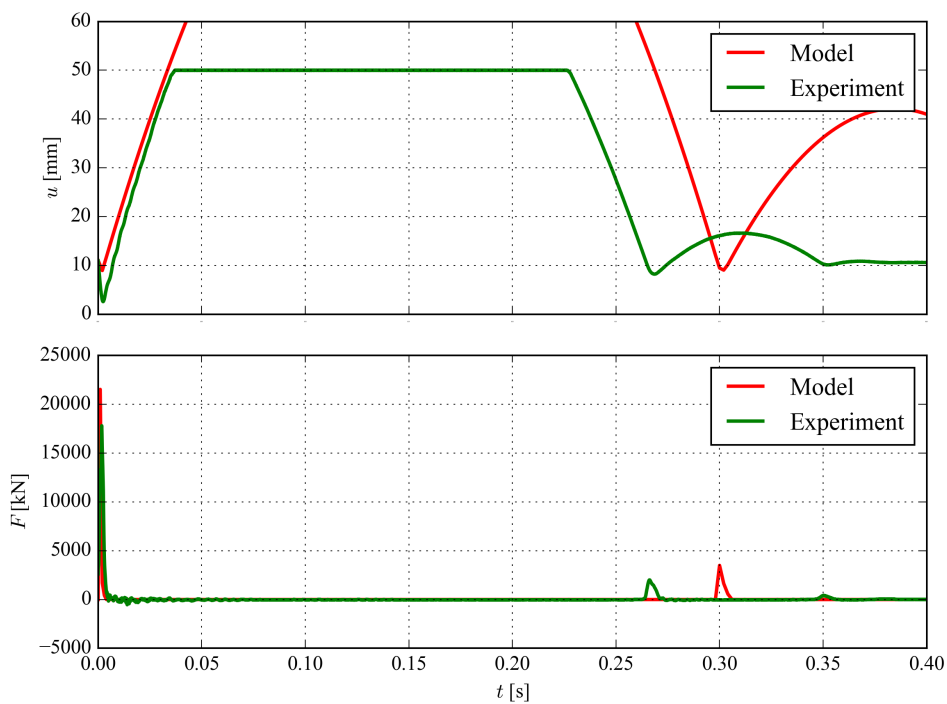
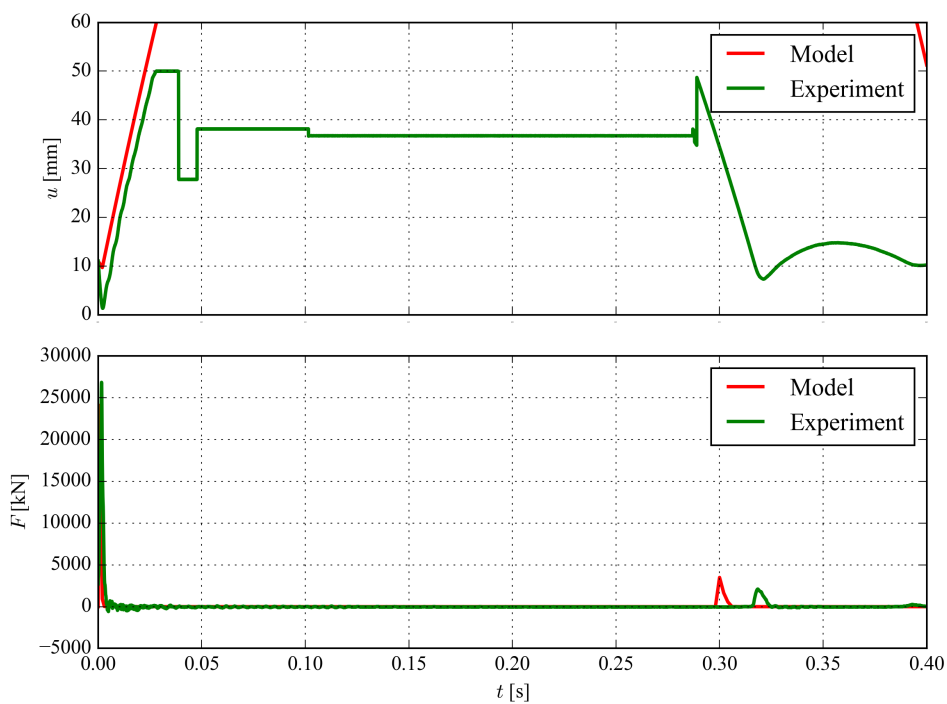

 Obr. 4.4.4: Srovnání experimentu a simulace - vzorek $-1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ - $22 \text{ }^\circ\text{C}$

 Obr. 4.4.5: Srovnání experimentu a simulace - vzorek $-2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ - $22 \text{ }^\circ\text{C}$

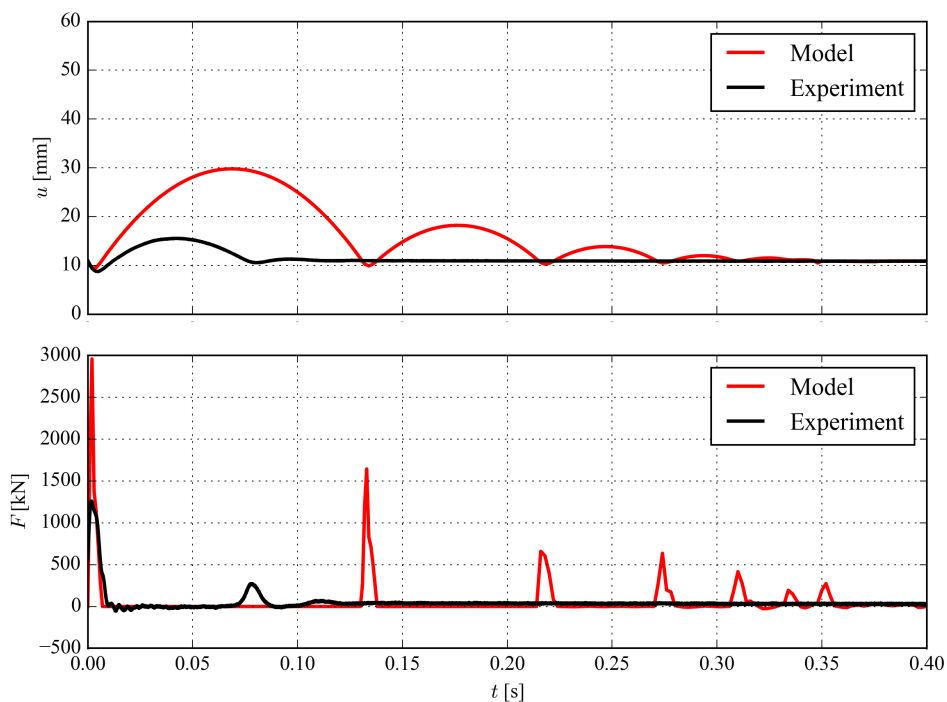
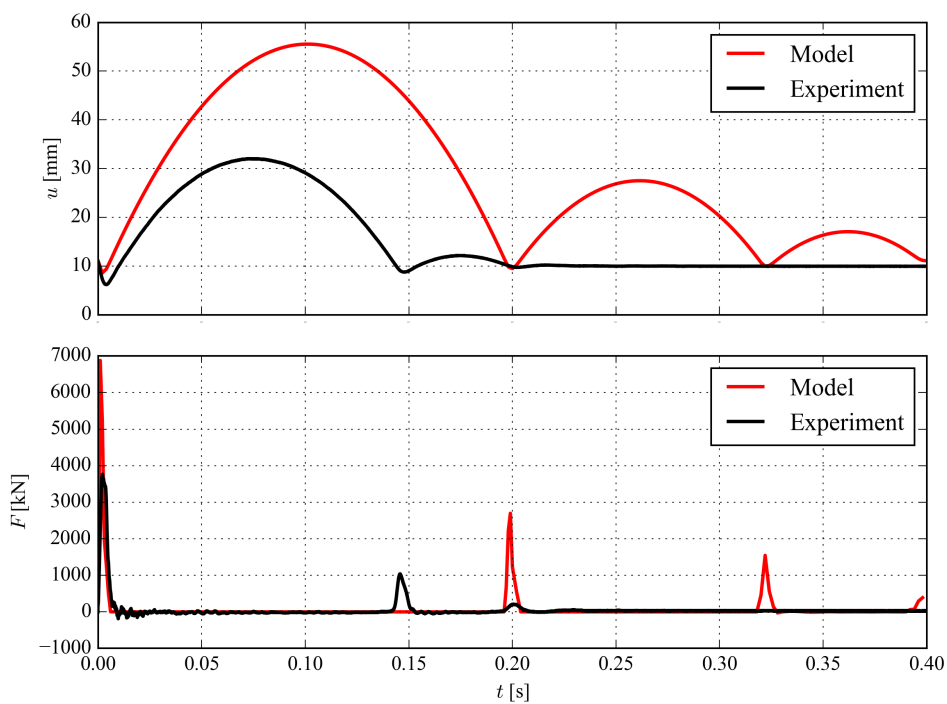

 Obr. 4.4.6: Srovnání experimentu a simulace - vzorek - $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ - $22 \text{ }^\circ\text{C}$

 Obr. 4.4.7: Srovnání experimentu a simulace - vzorek - $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ - $22 \text{ }^\circ\text{C}$

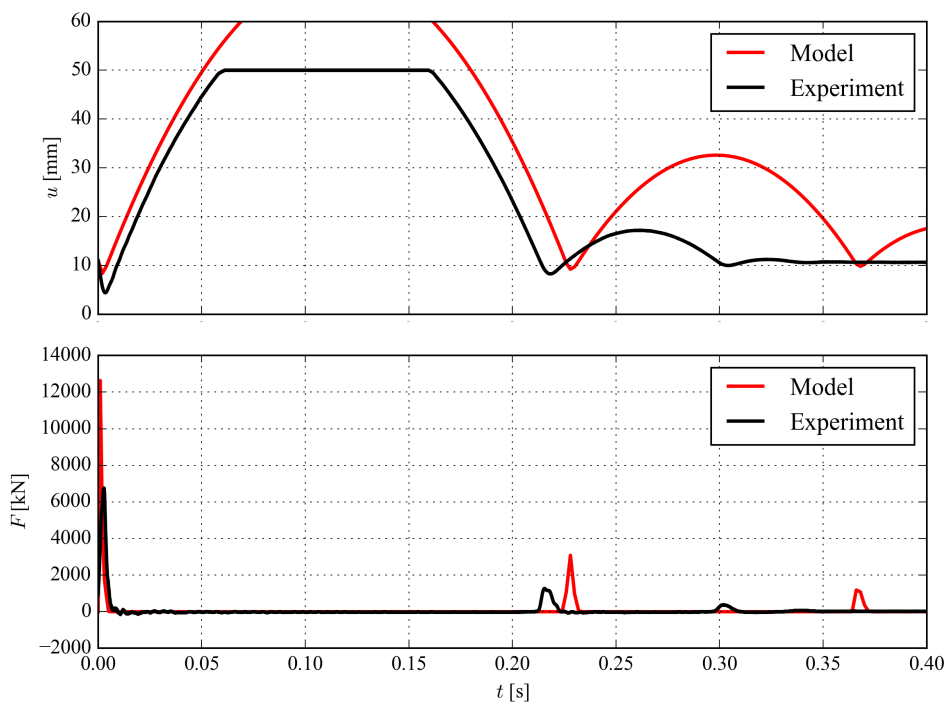
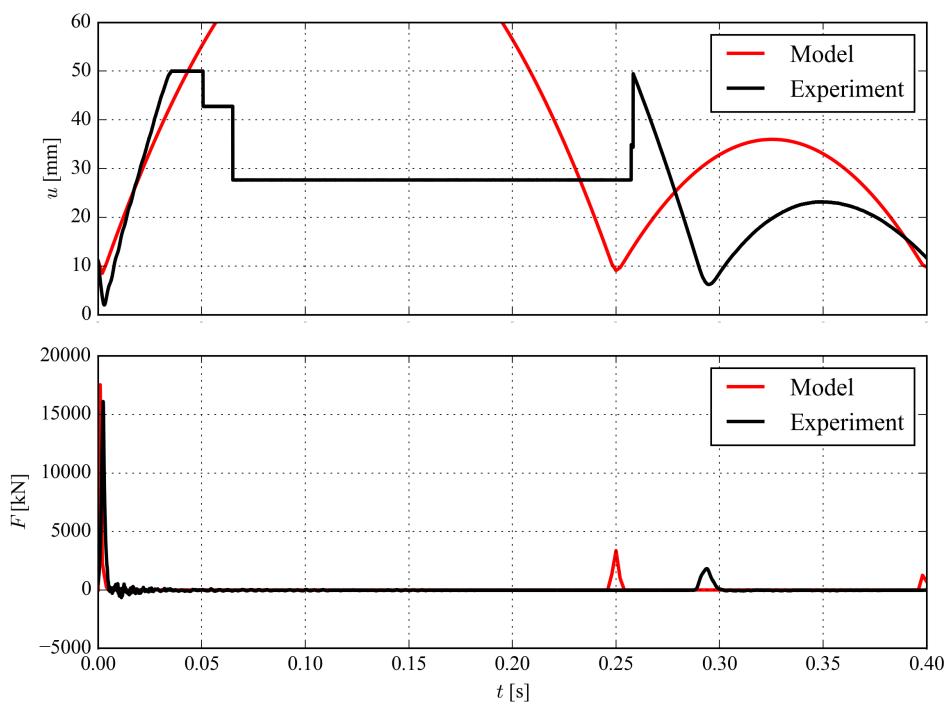

 Obr. 4.4.8: Srovnání experimentu a simulace - vzorek - $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ - $22 \text{ }^\circ\text{C}$

 Obr. 4.4.9: Srovnání experimentu a simulace - vzorek - $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ - $22 \text{ }^\circ\text{C}$

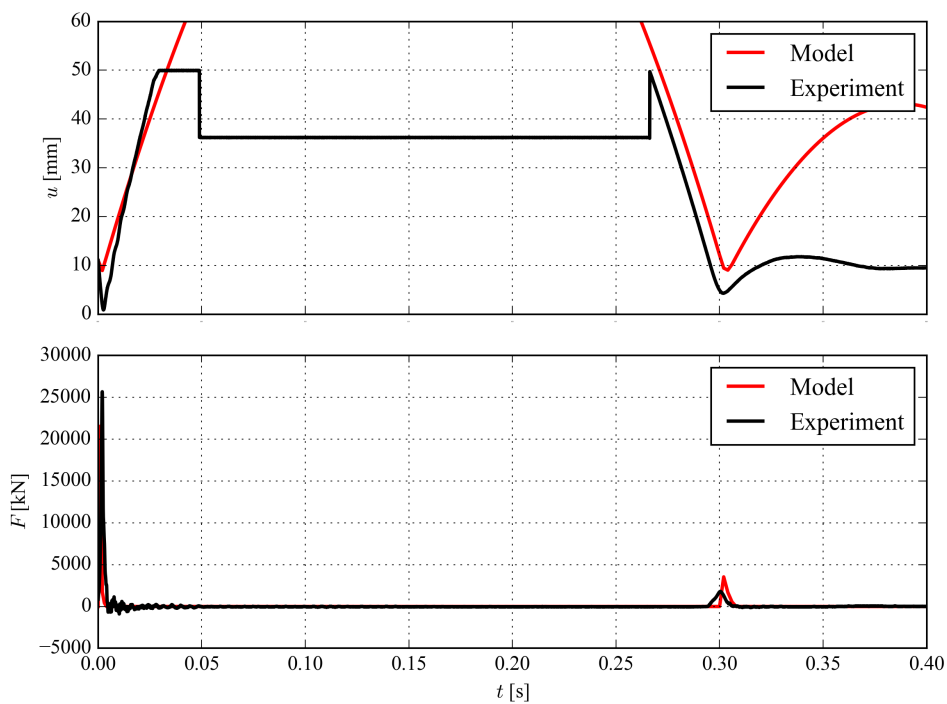
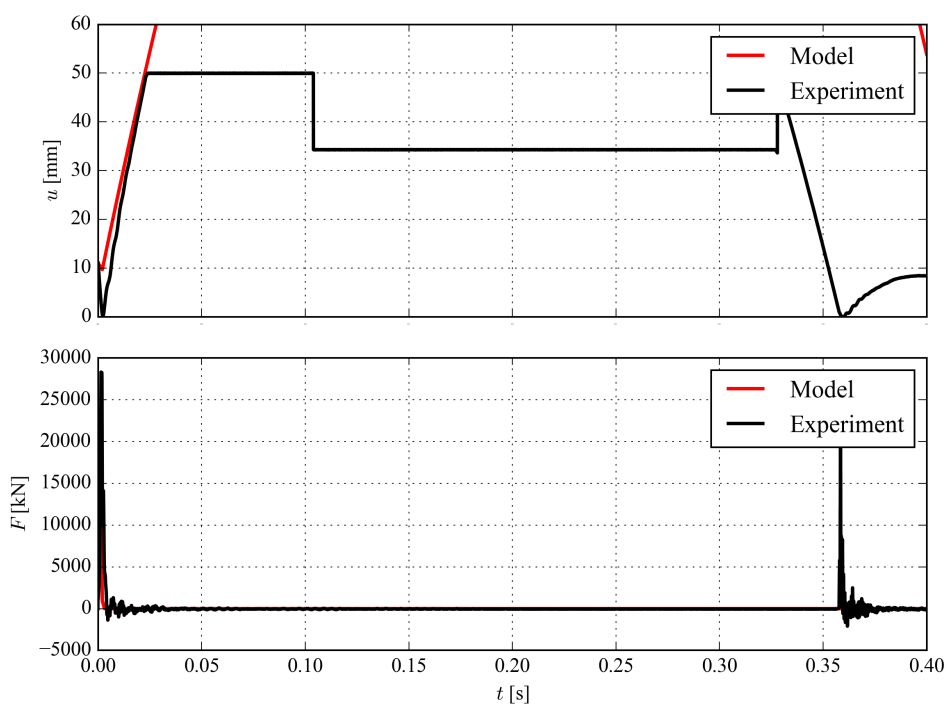

 Obr. 4.4.10: Srovnání experimentu a simulace - vzorek - $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ - $40 \text{ }^\circ\text{C}$

 Obr. 4.4.11: Srovnání experimentu a simulace - vzorek - $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ - $40 \text{ }^\circ\text{C}$

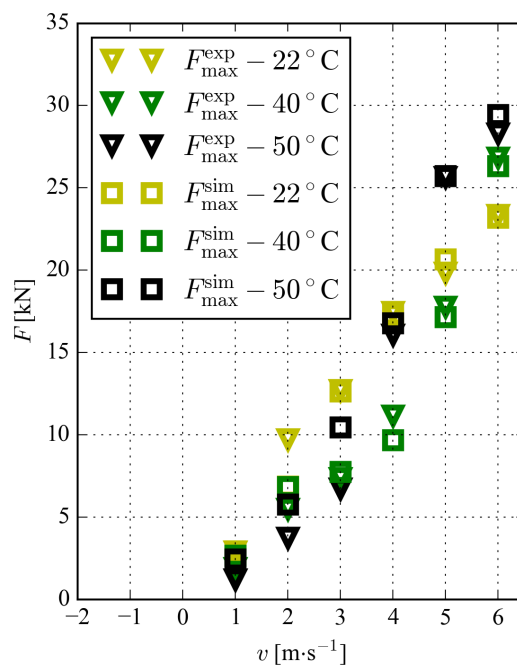

 Obr. 4.4.12: Srovnání experimentu a simulace - vzorek - $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ - $40 \text{ }^\circ\text{C}$

 Obr. 4.4.13: Srovnání experimentu a simulace - vzorek - $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ - $40 \text{ }^\circ\text{C}$


 Obr. 4.4.14: Srovnání experimentu a simulace - vzorek - $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ - $40 \text{ }^\circ\text{C}$

 Obr. 4.4.15: Srovnání experimentu a simulace - vzorek - $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ - $40 \text{ }^\circ\text{C}$

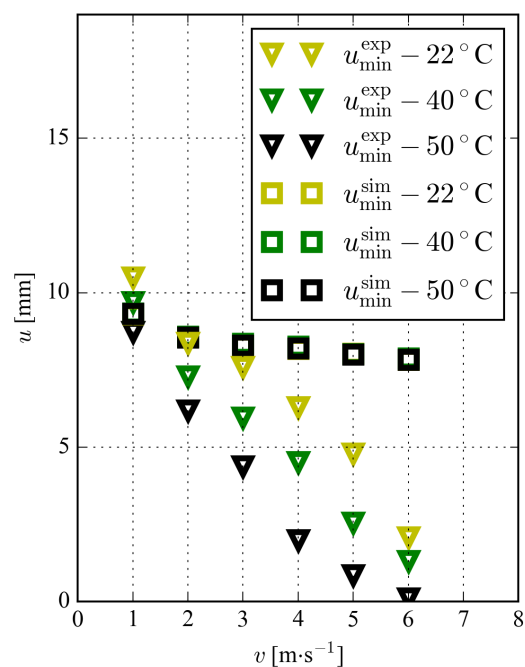

 Obr. 4.4.16: Srovnání experimentu a simulace - vzorek - $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ - $50 \text{ }^\circ\text{C}$

 Obr. 4.4.17: Srovnání experimentu a simulace - vzorek - $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ - $50 \text{ }^\circ\text{C}$


 Obr. 4.4.18: Srovnání experimentu a simulace - vzorek - $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ - $50 \text{ }^\circ\text{C}$

 Obr. 4.4.19: Srovnání experimentu a simulace - vzorek - $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ - $50 \text{ }^\circ\text{C}$


 Obr. 4.4.20: Srovnání experimentu a simulace - vzorek - $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ - $50 \text{ }^\circ\text{C}$

 Obr. 4.4.21: Srovnání experimentu a simulace - vzorek - $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ - $50 \text{ }^\circ\text{C}$



Obr. 4.4.22: Celkové srovnání experimentů a simulací - maximální síly



Obr. 4.4.23: Celkové srovnání experimentů a simulací - minima posunutí razníku

Tab. 4.4.1: Srovnání experimentů a simulací - vzorky

T [°C]	v [m · s ⁻¹]	F_{\max}^{exp} [N]	F_{\max}^{sim} [N]	ς [%]	u_{\min}^{exp} [mm]	u_{\min}^{sim} [mm]	ς [%]
22	1	2944	2945	0,03	10,50	9,30	11,43
	2	9767	6886	29,51	8,38	8,57	3,22
	3	12745	12649	0,75	7,60	8,30	9,21
	4	17480	17348	0,76	6,30	8,18	29,84
	5	19868	20674	4,06	4,80	8,04	67,50
	6	23369	23198	0,74	2,09	7,83	274,64
40	1	1949	2681	37,56	9,70	9,33	3,81
	2	5520	6866	24,38	7,30	8,58	17,53
	3	7389	7772	5,18	5,96	8,35	40,10
	4	11199	9707	13,32	4,52	8,26	82,74
	5	17805	17177	3,52	2,57	8,02	212,06
	6	26851	26343	1,89	1,32	7,88	496,97
50	1	1260	2460	95,23	8,74	9,32	6,64
	2	3767	5789	53,68	6,20	8,55	37,90
	3	6760	10462	54,76	4,39	8,30	89,07
	4	16109	16782	4,18	2,00	8,20	310,00
	5	25668	25737	0,27	0,87	8,01	820,69
	6	28317	29449	4,00	0,12	7,84	6 433,33

Shoda průběhu sil u experimentu a modelu je výrazně lepší než shoda minim posunutí razníku. Tento fakt odpovídá použité cílové funkci, kdy byla kladena větší váha právě na srovnání těchto hodnot. Průměrná odchylka modelu při srovnání hodnot maximálních sil činí 18,55 %, při srovnání minim posunutí razníku 497,04 %. Takto extrémní hodnota je zapříčiněna především borcením elementů modelované pěny, ke kterému docházelo při větších stlačeních v průběhu identifikace. Minima posunutí razníku dosahují vyšších hodnot v případě modelu, model tedy vykazuje vyšší tuhost než skutečná zkoumaná pěna. Hodnoty minim posunutí razníku jsou pro jednotlivé teploty konzistentní.

5 Validace identifikovaného modelu

Získaný materiálový model byl dále validován srovnáním provedené části standardní zkoušky [8] chrániče SAS-TEC SCL-2, popsané v kapitole 2.1 Testování chráničů, s její simulací.

5.1 Experiment

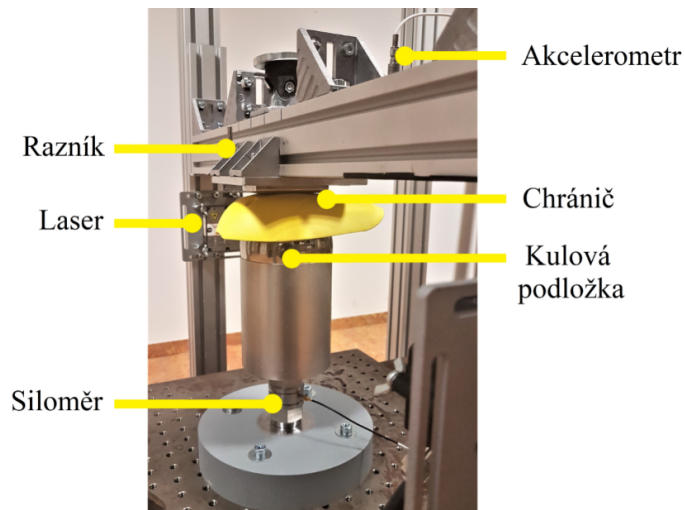
Pádová zkouška byla provedena na pádové věži zkonstruované zaměstnanci Katedry mechaniky při Západočeské univerzitě v Plzni (obrázek 5.1.1). Pro experiment byl použit impaktor s plochou ocelovou hlavou o hmotnosti 5 kg. Přenesená síla byla měřena siloměrem KISTLER 9351B s citlivostí 3,822 pC/N, umístěným pod ocelovou podložkou s kulovou hlavou o poloměru 50 mm. Výška podložky byla 180 mm. Siloměr byl zapojen přes zesilovač Brüel & Kjær 2635 a převodník napětí Statron 2223 do měřicí karty NI 9215 a připevněn k základně o hmotnosti 300 kg.

Posunutí razníku bylo měřeno dvěma Micro-Epsilon optoNCDT 2300-50 lasery s citlivostí 0,8 μm , které byly umístěny na obou stranách příčnicku sloužícímu k vedení razníku. Oba lasery byly připojeny do měřicí karty NI 9125.

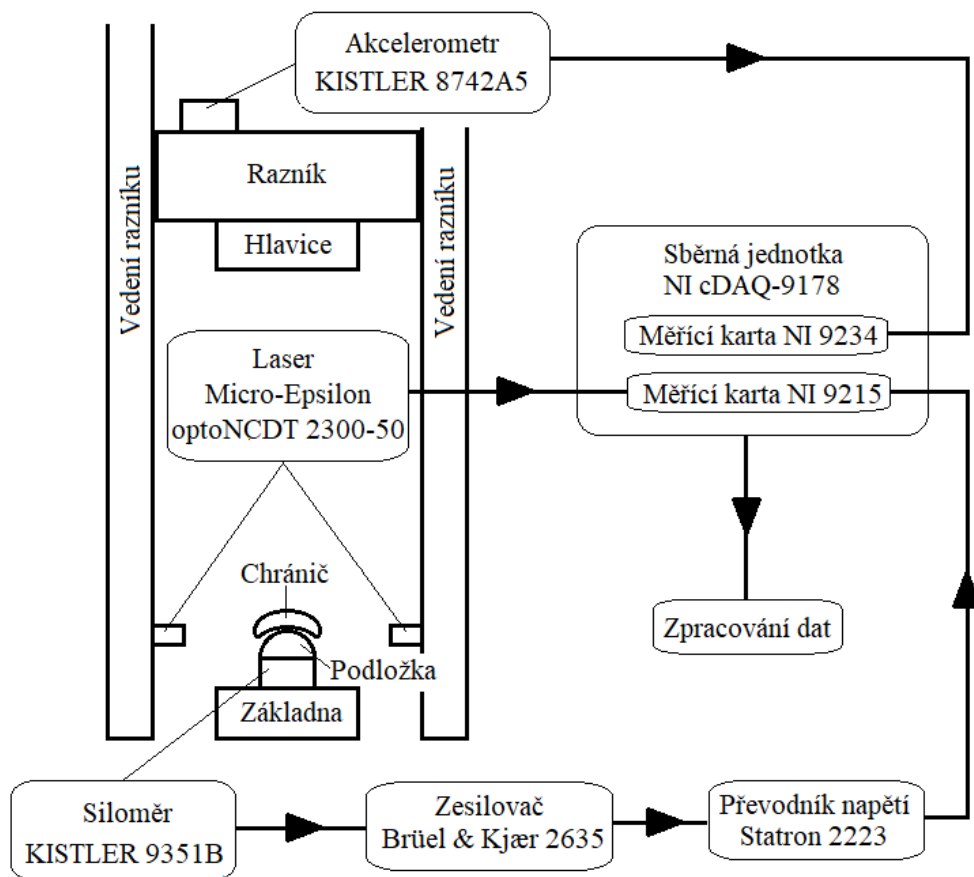
Dále bylo měřeno zrychlení razníku akcelerometrem KISTLER 8742A5 s citlivostí 1,087 mV/g, který byl zapojen do měřicí karty NI 9234. Vzorkovací frekvence byla 26 kHz. Záznam dat byl proveden v programu National Instrument Signal Express. Schéma zapojení je na obrázku 5.1.2.

Experiment byl proveden pro tři teploty chrániče $T = \{22, 40, 50\}$ °C. Teplota 22 °C odpovídá požadované teplotě pro okolní prostředí, teplota 40 °C představuje nepovinnou část zkoušky. Měření pro 50 °C spadá do kategorie nadstandardních testů. Teplotám 40 a 50 °C byly chrániče vystaveny po jednu hodinu před uskutečněním měření. Chrániče byly testovány do 30 s po vyjmutí z tepelné komory. Měření byla uskutečněna jednou, pro každé měření byl použit nový chránič.

Vzhledem k tomu, že cílem práce nebyla certifikace chrániče jako taková, ale validace modelu a vyšetření vlastností chrániče při vysokých teplotách, bylo upuštěno od několika požadavků normy. První byl na minimální počet testovaných vzorků. Dalším byl požadavek na vyhřev chráničů před měřením po dobu 24 hodin. Dále bylo upuštěno od testování ve vlhkém prostředí.



Obr. 5.1.1: Sestava pro testování chrániče SAS-TEC SCL-2



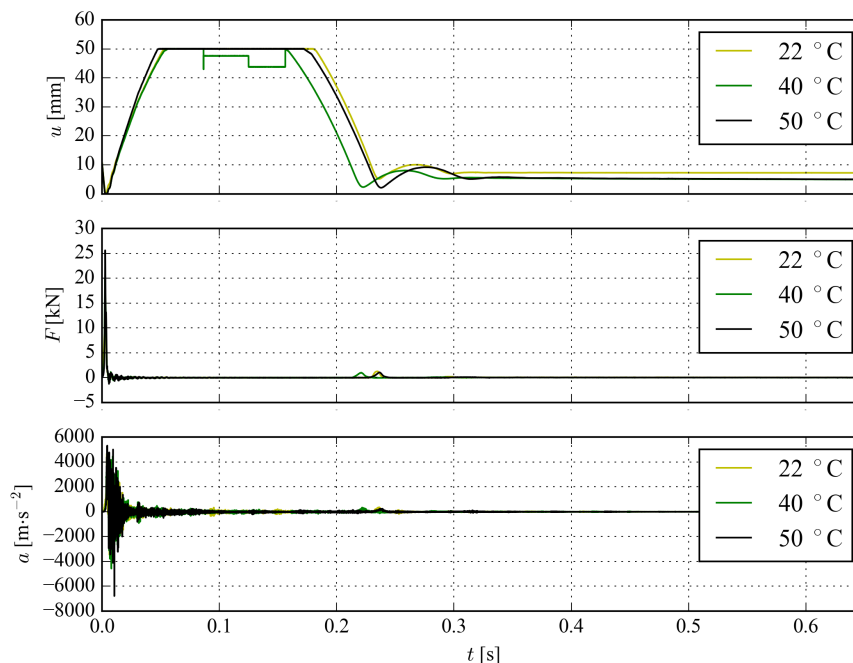
Obr. 5.1.2: Schéma zapojení snímačů - pádová zkouška s chráničem SAS-TEC SCL-2

5.1.1 Změřená data

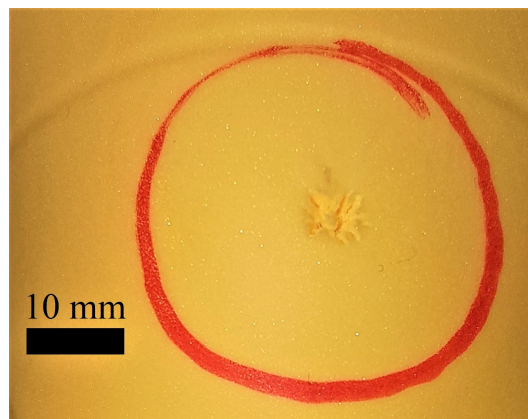
Změřená data jsou zobrazena na obrázku 5.1.3. Z výsledků je patrné, že rostoucí teplota má nepříznivý vliv na mechanické chování chrániče, kdy se zvyšováním teploty chrániče dochází ke zvýšení hodnot přenesených sil a větším deformacím.

V případě 50 °C maximální síla přesáhne 20 kN, což je hraniční hodnota, která nesmí být při testování překročena, aby vzorek spadl do třídy 2, popsané v kapitole 2.1 Testování chráničů. Nepříznivě působí i hodnota změřená při teplotě 40 °C, která dosahuje hodnoty 19938 N. Tato hodnota je sice pod hraničními 20 kN, nicméně tak nastalo po nahřívání po dobu 1 hodiny místo 24 hodin, které jsou uvedeny v nepovinné části normy [8]. Při prodloužení doby výhřevu hrozí tedy i zvětšení hodnoty přenesené síly, které by mělo za následek posunutí chrániče do třídy 1 s maximální přenesenou silou 35 kN, či úplné nesplnění požadavků normy [8].

Ze srovnání posunutí u razníku je patrné, že s rostoucí teplotou klesá tuhost materiálu zkoumaného chrániče. Dochází tak k většímu vtlačení kulové podložky do chrániče, kdy pro případ 50 °C došlo k protržení materiálu chrániče, které je ukázáno na obrázku 5.1.4. Tato deformace je z hlediska standardní zkoušky [8] nevyhovující.



Obr. 5.1.3: Data - Chráníč



Obr. 5.1.4: Zničený chránič - 50 °C

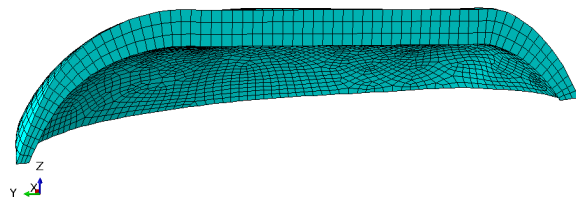
5.2 Simulace

Pro validaci identifikovaného materiálového modelu byla vytvořena numerická simulace provedené pádové zkoušky. Simulace byla vytvořena v MKP softwaru Abaqus CAE 2018.

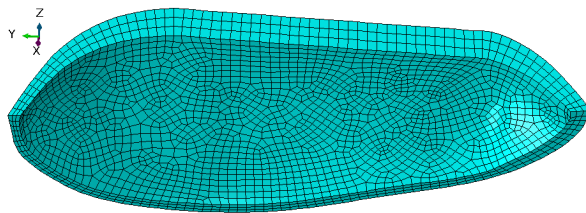
Pro simulaci byly použity prostorové a skořepinové prvky. Pro zjednodušení bylo využito symetrie v oblasti geometrie a zatížení a byla modelována pouze polovina chrániče. Mechanismus pádové věže byl opět zjednodušen, byla namodelována pouze polovina hlavice razníku, které byla přiřazena hmotnost 2,5 kg. Rovněž podložka byla zjednodušena. Byla modelována pouze jako skořepina s čtvrtkulovou horní podstavou. Razník i podložka byly ocelové s parametry Youngova modulu $E = 210 \text{ GPa}$ a Poissonova čísla $\nu = 0,3$. Geometrie pěnového chrániče, respektive jeho poloviny, byla vytvořena v programu Rhinoceros 6 a následně importována do softwaru Abaqus. Síť prvků chrániče je zobrazena na obrázcích 5.2.1 a 5.2.2.

Podložce byly zamezeny posuvy ve všech třech hlavních směrech. Razníku byl umožněn pouze pohyb ve svislém směru. Z důvodu úspory doby výpočtu byl razník umístěn přímo nad horní podstavu chrániče a byla mu předepsána počáteční podmínka odpovídající požadované dopadové rychlosti, ta se pro počáteční výšku 1 m rovná $4,43 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Dále na model působila gravitační síla. Popsaná sestava s předepsanými podmínkami a zatížením je zobrazena na obrázku 5.2.3 a 5.2.4. Simulovaný čas byl 0,4 s.

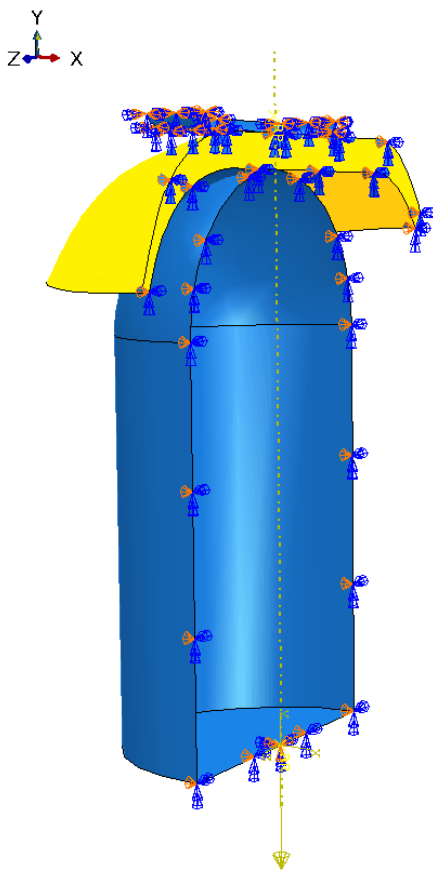
Výstupem byly hodnoty svislé reakční síly na podložce a posunutí razníku.



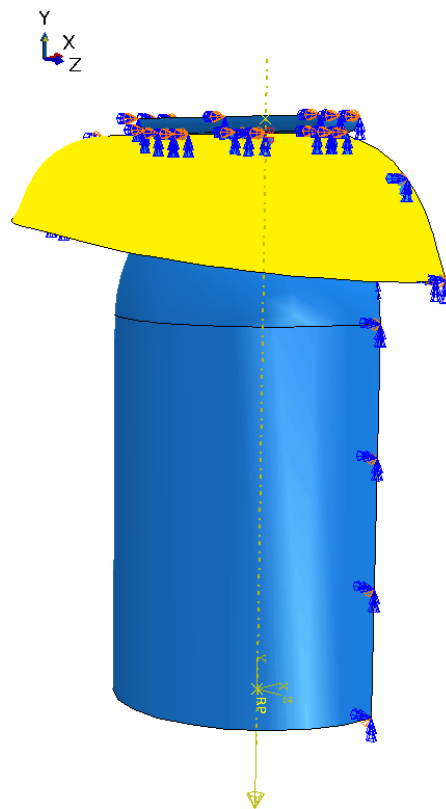
Obr. 5.2.1: Síť chrániče SCL-2 - pohled 1



Obr. 5.2.2: Síť chrániče SCL-2 - pohled 2



Obr. 5.2.3: Model standardní zkoušky
- pohled 1



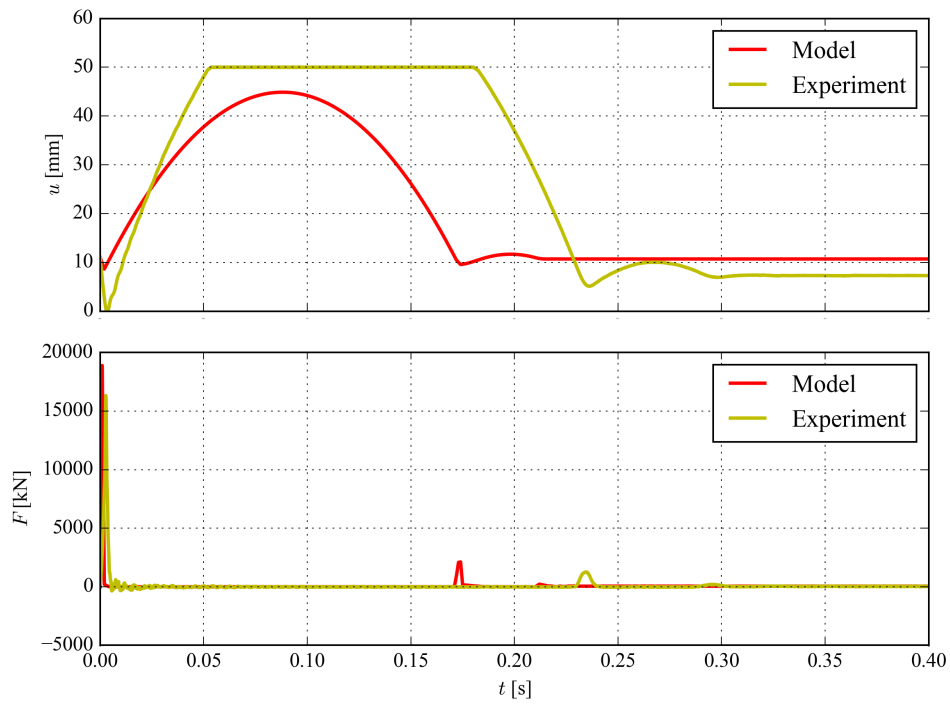
Obr. 5.2.4: Model standardní zkoušky
- pohled 2

5.3 Výsledky

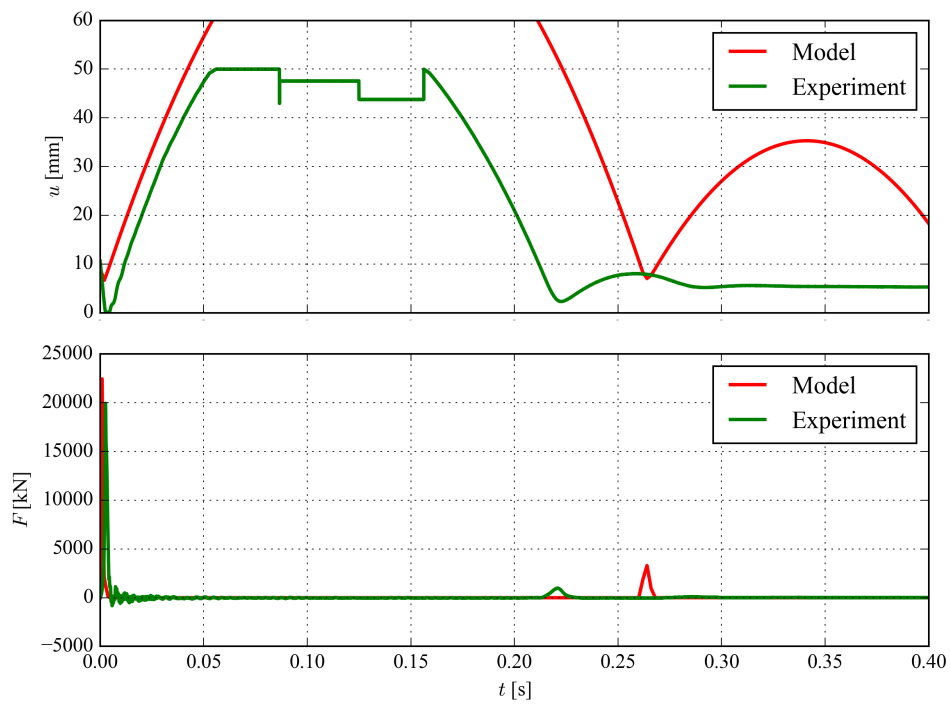
Výsledná srovnání provedených experimentů a vytvořených simulací s materiálovým modelem s identifikovanými parametry jsou uvedeny v tabulce 5.3.1 a zobrazeny na obrázcích 5.3.1 až 5.3.3. Z dat je patrné, že hodnoty maximálních sil určených simulací přesahují hodnoty sil změřených při experimentu. V praxi to znamená, že při použití materiálového modelu s identifikovanými parametry ať už k návrhu nového chrániče či k úpravám stávajícího bude výsledek na straně větší bezpečnosti. Hodnoty maximálních sil určených ze simulace mají průměrnou odchylku 15,31 % vůči hodnotám změřeným z experimentu. Toto číslo tedy nepřekračuje průměrnou odchylku 18,55 % vypočtenou při srovnání experimentu provedeného na vzorcích s jeho simulací. Hodnoty minimálních posunutí razníku změřené při experimentu jsou výrazně nižší než hodnoty určené simulací, tento trend odpovídá srovnání provedeném na kvádrových vzorcích. Z tohoto důvodu bylo upuštěno od numerického vyjádření odchylky, která se opět pohybuje v řádech stovek procent.

Tab. 5.3.1: Srovnání experimentů a simulací - chránič

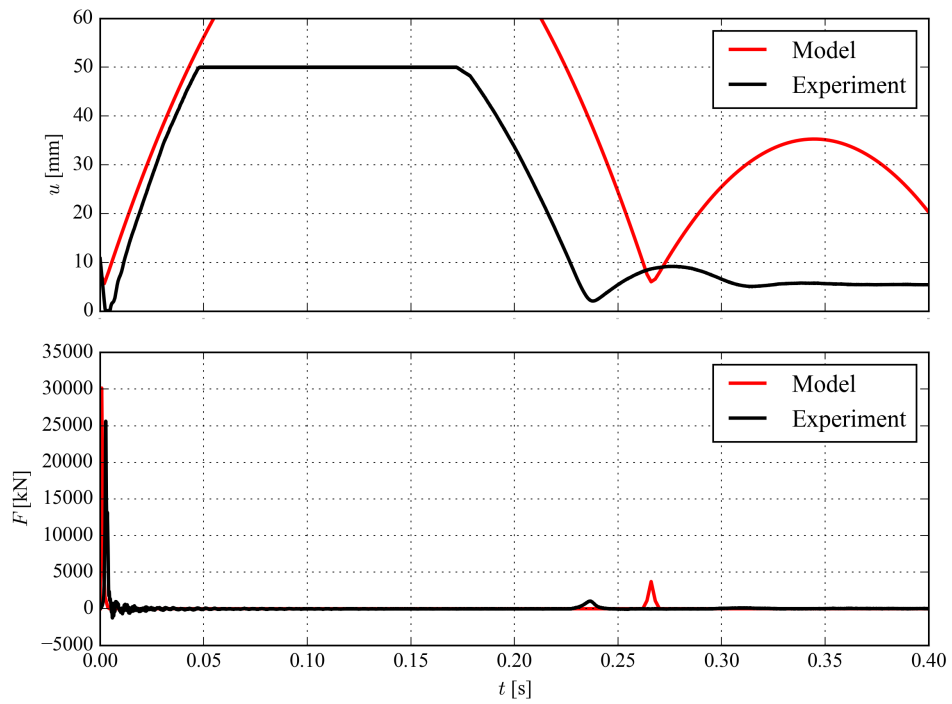
T [°C]	F_{\max}^{exp} [N]	F_{\max}^{sim} [N]	ζ [%]	u_{\min}^{exp} [mm]	u_{\min}^{sim} [mm]
22	16332	18892	15,67	0,01	9,03
40	19938	22452	12,61	0,06	6,54
50	25617	30144	17,67	0,02	5,62



Obr. 5.3.1: Srovnání experimentu a simulace - chránič - 22 °C



Obr. 5.3.2: Srovnání experimentu a simulace - chránič - 40 °C



Obr. 5.3.3: Srovnání experimentu a simulace - chránič - 50 °C

6 Srovnání chráničů

Jedním z cílů této práce bylo porovnat mechanické vlastnosti chráničů s různým tlumicím materiálem. Toto srovnání bylo provedeno na základě experimentu.

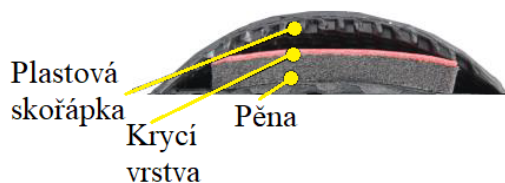
Testované chrániče používaly jako hlavní tlumicí prvek různé druhy pěn s horní vrstvou z různých materiálů, na kterých byla umístěna plastová skořápka s voštinovou strukturou na spodní straně (obrázek 6.0.1).



Obr. 6.0.1: Plastová skořápka, vlevo svrchní strana, vpravo spodní strana s voštinovou strukturou

6.1 Testované materiály

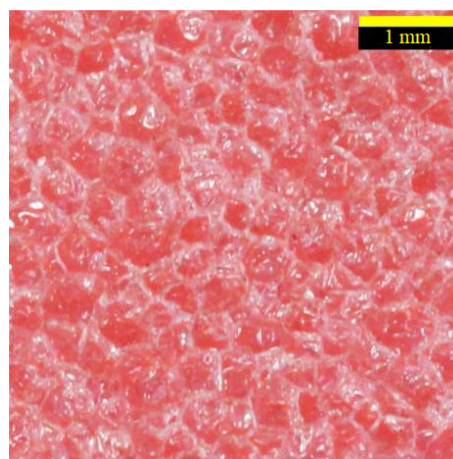
Pro testování bylo vybráno deset druhů chráničů. Na jednotlivé chrániče bylo pohlíženo jako na kombinaci dvou částí. Hlavní vrstvy tvořené jednou ze šesti zkoumaných pěn zobrazených na obrázcích 6.1.2 - 6.1.7 a krycí vrstvy, která byla z papíru (označení P), kůže (označení K), nebo zcela chyběla (bez označení). Na těchto vrstvách byla umístěna plastová skořápka, která představovala třetí a nejsvrchnější vrstvu. Řazení jednotlivých vrstev je zobrazeno na obrázku 6.1.1. Pěny byly rozděleny dle hustoty, tato hodnota zároveň posloužila jako jejich označení. Výška pěnové vrstvy odpovídala výšce běžně dostupným pěnovým chráničům a v jednotlivých případech se lišila v řádech jednotek milimetrů.



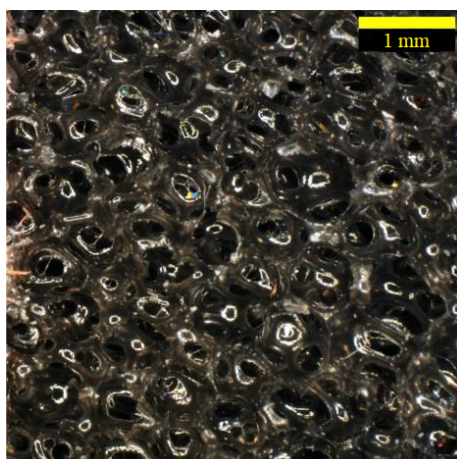
Obr. 6.1.1: Složení chrániče



Obr. 6.1.2: Pěna - $25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$



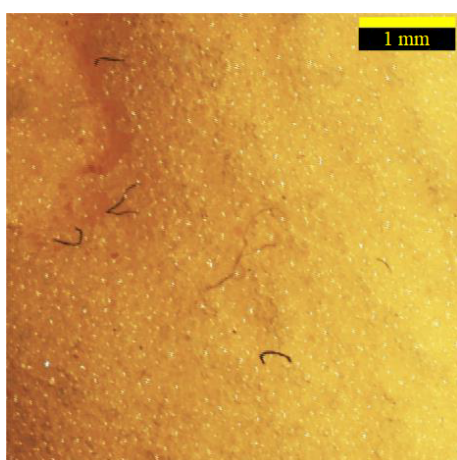
Obr. 6.1.3: Pěna - $30 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$



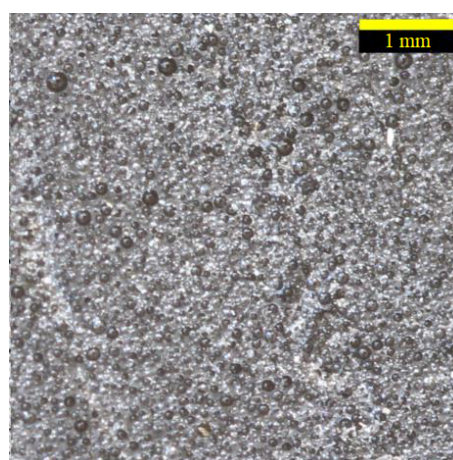
Obr. 6.1.4: Pěna - $170 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$



Obr. 6.1.5: Pěna - $200 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$



Obr. 6.1.6: Pěna - $260 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

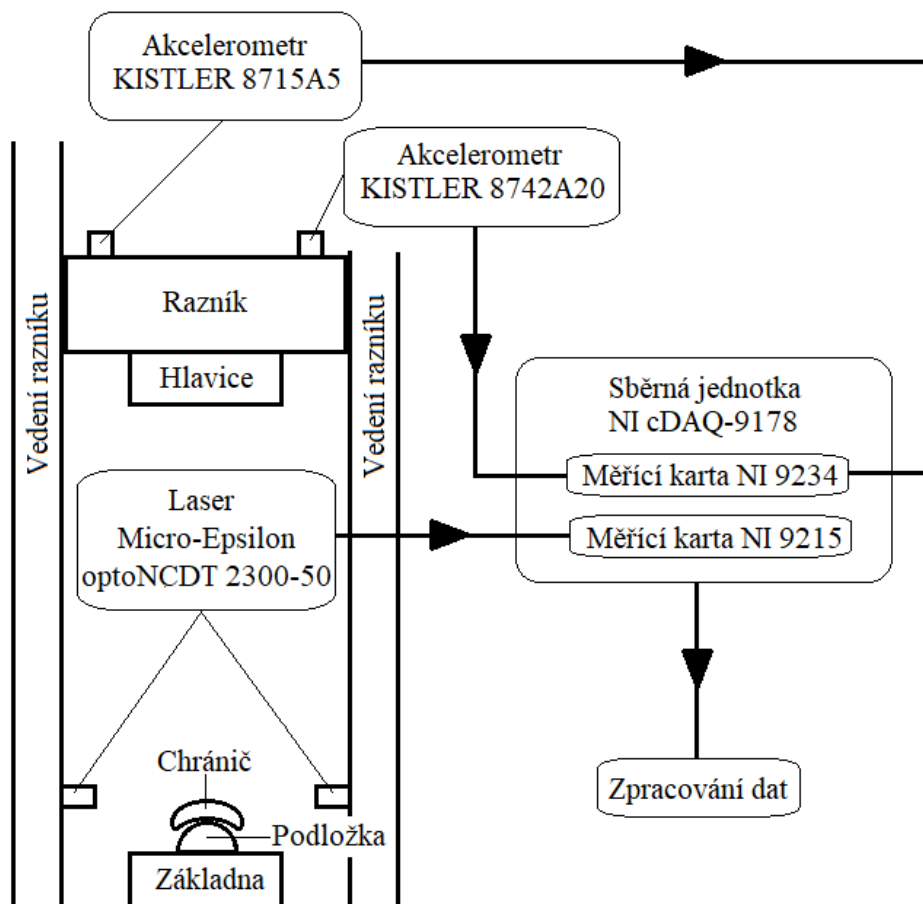


Obr. 6.1.7: Pěna - $400 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

6.2 Experiment

Porovnání spočívalo v provedení pádové zkoušky, kdy z výšky 1 m byl uvolňován razník s plochou ocelovou hlavou o hmotnosti 5 kg na kulovou podložku o poloměru 50 mm. Sestava tedy reflektovala geometrii nárazové podložky, váhu razníku a uvolňovací výšku razníku ze standardní zkoušky dle normy [8]. Při experimentu byly zaznamenávány hodnoty zrychlení pomocí dvou akcelerometrů KISTLER 8742A20 a 8715A5 symetricky umístěných na razníku a hodnoty posunutí razníku dvěma lasery Micro-Epsilon optoNCDT 2300-50. Nepoužití siloměru bylo záměrné z důvodu hrozícího překročení jejího rozsahu, jehož maximální hodnota činila 40 kN. Popsaná sestava je zobrazena na obrázku 6.2.1.

Pro jednotlivé chrániče byly provedeny vždy dvě pádové zkoušky v časovém rozmezí maximálně 2 min.



Obr. 6.2.1: Schéma zapojení snímačů - pádová zkouška pro srovnání chráničů

6.2.1 Změřená data

Získaná data jsou ukázána na obrázcích 6.2.3 - 6.2.13. Z obrázku 6.2.3 je patrné, že nejlepší tlumení nárazu vykazuje pěna o hustotě $260 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, jedná se o výše zkoumanou pěnu SCL chrániče SAS-TEC SCL-2. Tato pěna si zachovává dobré tlumící vlastnosti v průběhu opakovaného nárazu, kdy i při druhém nárazu je hodnota přenesené síly nižší než hodnoty přenesených sil změřených na ostatních chráničích při prvním nárazu. Jedinou výjimku představuje pěna o hustotě $400 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, která rovněž vykazuje dobrou schopnost opakovaně tlumit náraz s výraznější konzistencí změřených hodnot.

Z obrázku 6.2.3 je zároveň patrné, že konstrukční otvory v geometrii pěnového chrániče mají nepříznivý vliv na tlumení síly, viz 260*, která značí chránič, tvořený ze stejné pěny jako chránič SAS-TEC SCL-2, ale mající kruhové otvory v geometrii, viz obrázek 6.2.2.

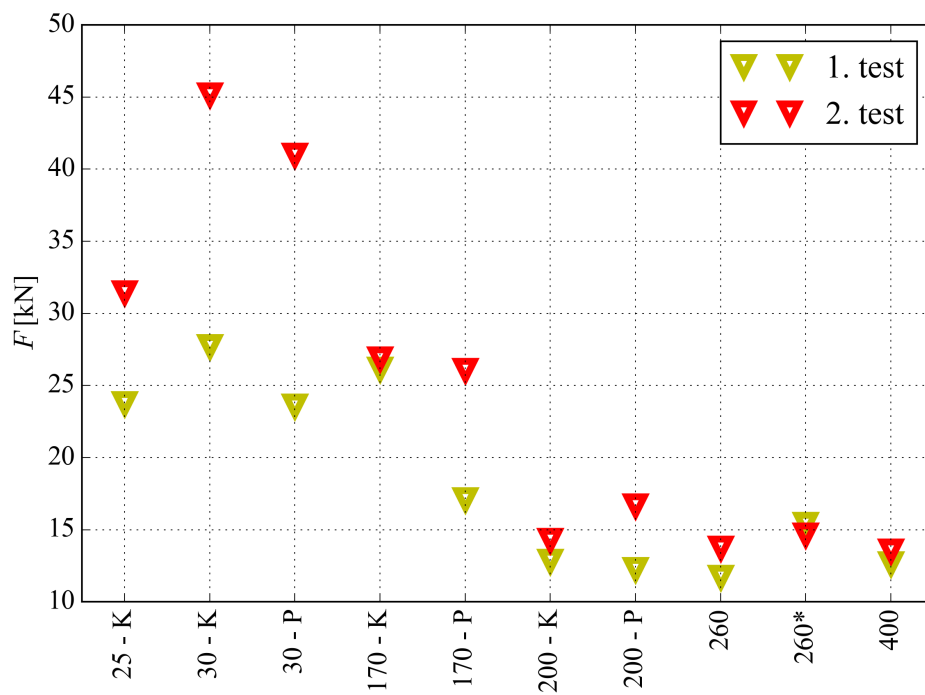
Vzhledem k rozdílné výšce měřených chráničů byla data posunutí razníku v závislosti na čase oříznuta na minimum prvního dopadu. U chráničů 25-K první test a 30-P druhý test došlo v průběhu měření k odskočení chrániče z kulové podložky, razník tak při druhotném dopadu dopadal pouze na kulovou podložku.

Při srovnání obrázku 6.2.7 s 6.2.8, jež zobrazují posunutí razníku v závislosti na čase, si lze všimnout, že papírová krycí vrstva má vliv na rychlejší zastavení razníku, konkrétně v případě papírové vrstvy dojde pouze k třem výraznějším odskokům razníku, kdežto v případě kůže jsou zachycena odskočení čtyři. Stejný případ je zachycen i na obrázcích 6.2.9 s 6.2.10.

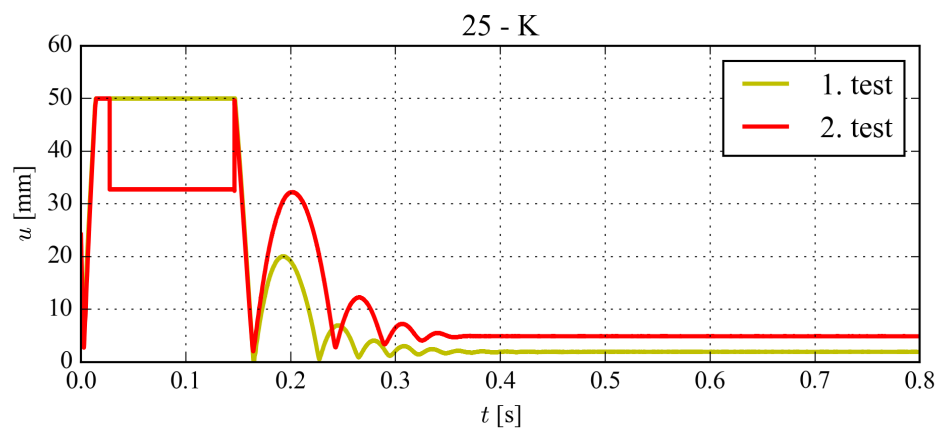
S přihlédnutím na velikost druhých odskoků vychází opět nejlépe pěna s hustotou $260 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, která jako jediná nepřesahuje hodnotu 30 mm, a to jak pro plný chránič 260, tak i pro chránič s perforacemi 260*.

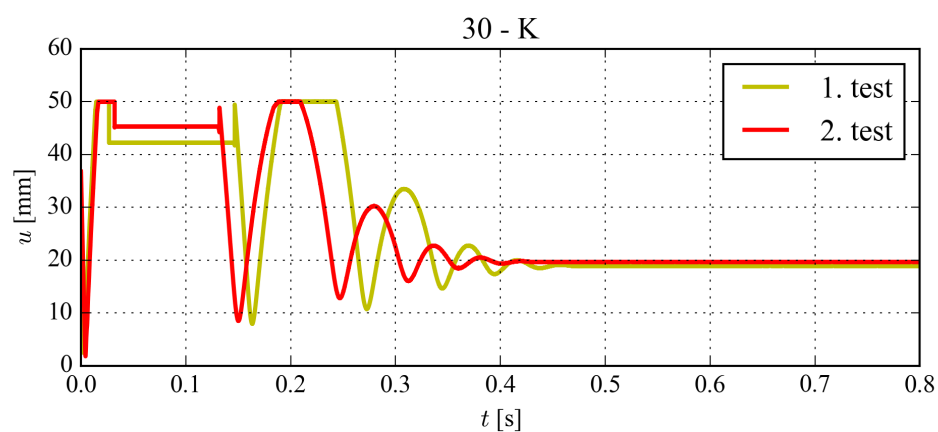
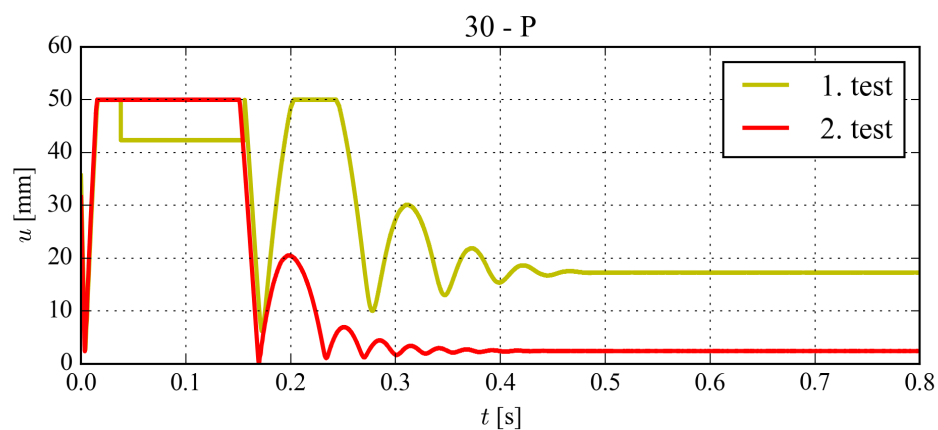
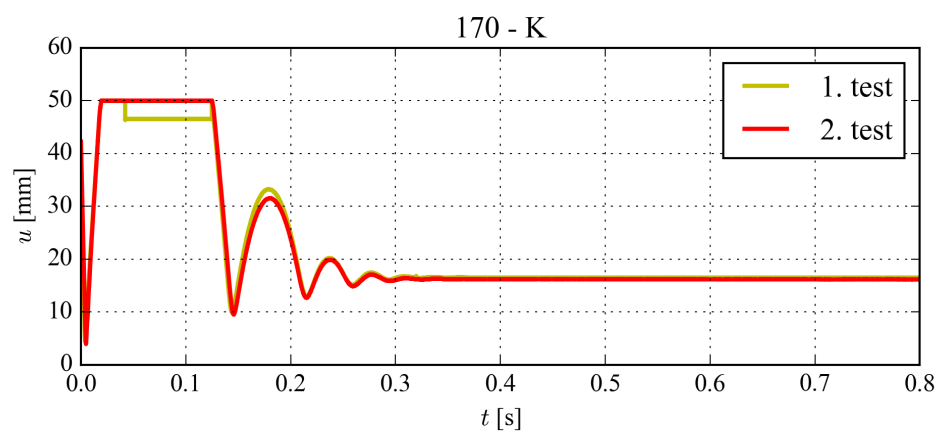


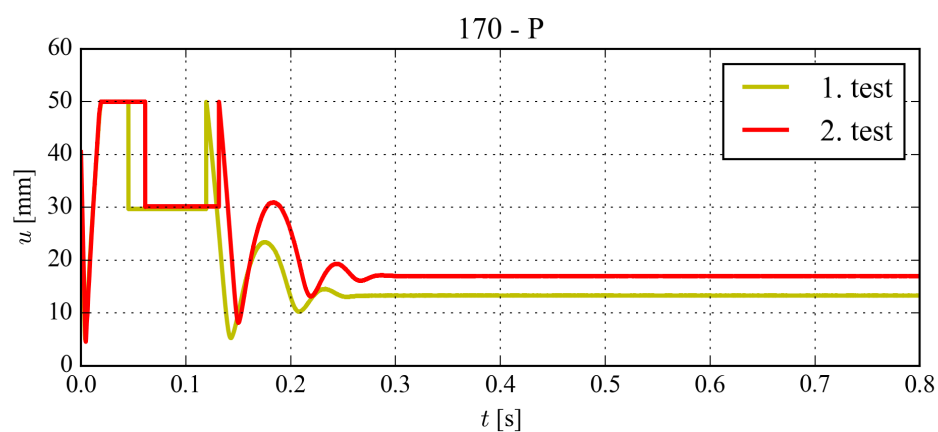
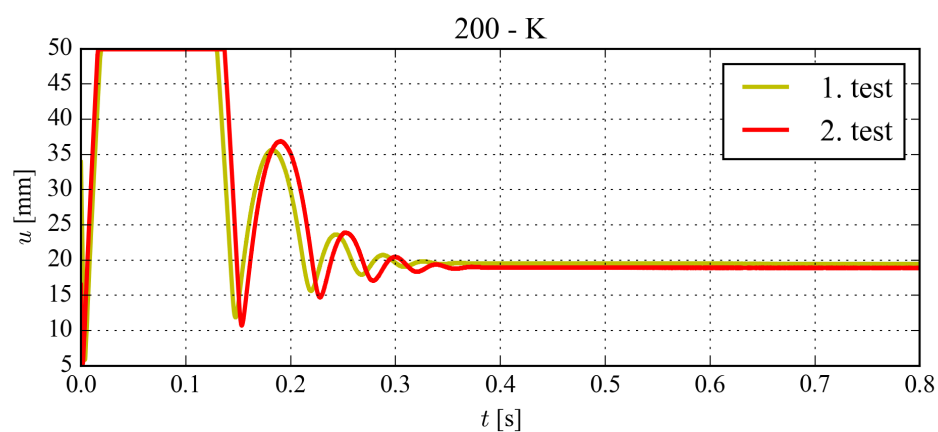
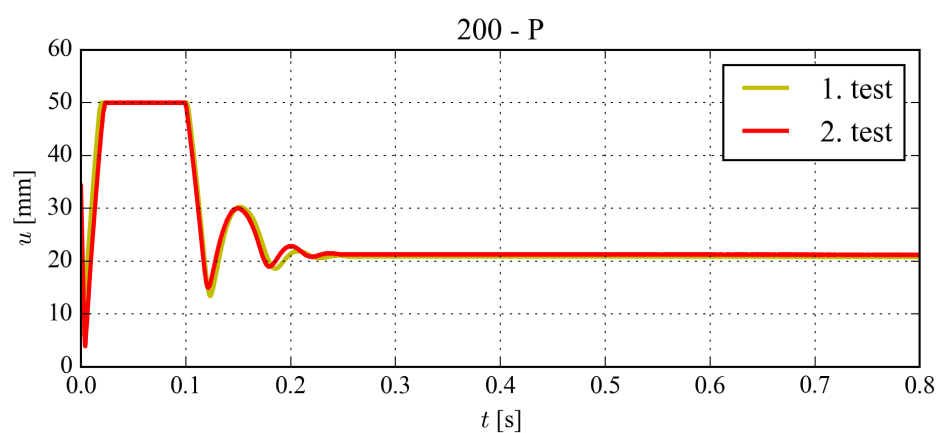
Obr. 6.2.2: Chránič s geometrickými otvory

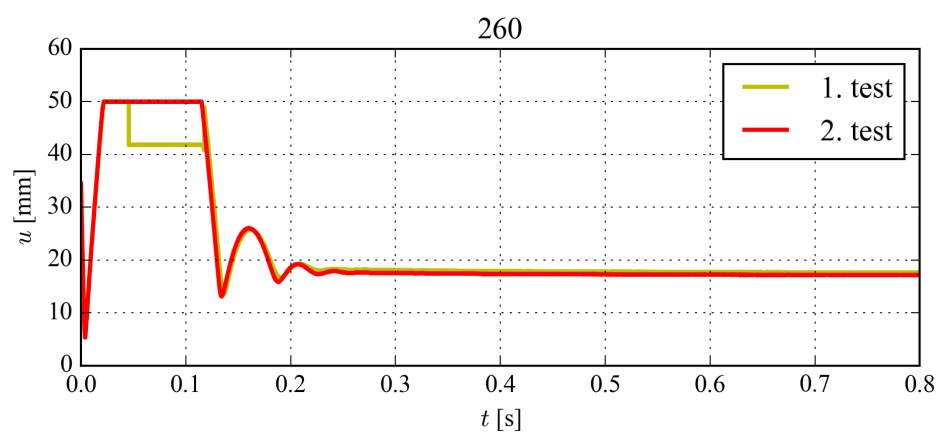
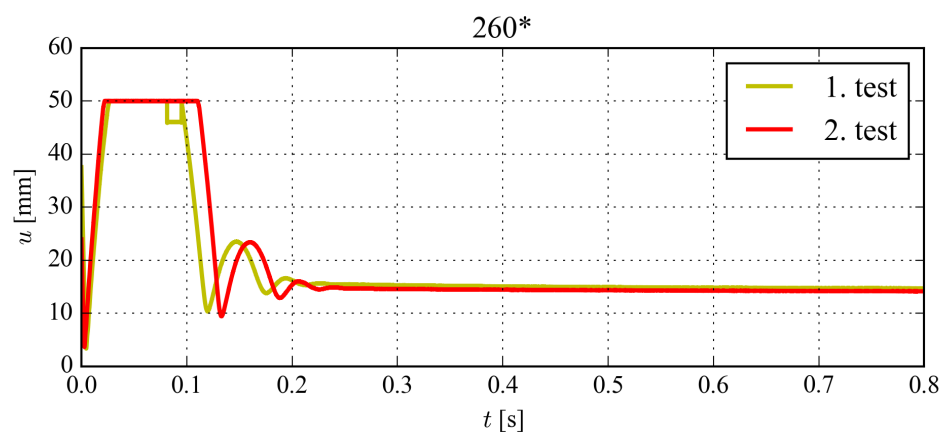
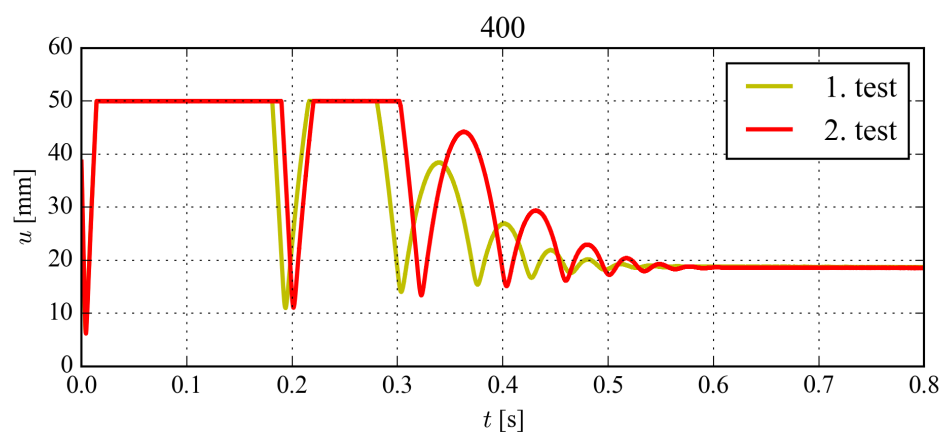


Obr. 6.2.3: Srovnání chráničů - maximální síly

Obr. 6.2.4: Průběh posunutí - chránič s pěnou o hustotě $25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, krycí vrstva kůže

Obr. 6.2.5: Průběh posunutí - chránič s pěnou o hustotě $30 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, krycí vrstva kůžeObr. 6.2.6: Průběh posunutí - chránič s pěnou o hustotě $30 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, krycí vrstva papírObr. 6.2.7: Průběh posunutí - chránič s pěnou o hustotě $170 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, krycí vrstva kůže

Obr. 6.2.8: Průběh posunutí - chránič s pěnou o hustotě $170 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, krycí vrstva papírObr. 6.2.9: Průběh posunutí - chránič s pěnou o hustotě $200 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, krycí vrstva kůžeObr. 6.2.10: Průběh posunutí - chránič s pěnou o hustotě $200 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, krycí vrstva papír

Obr. 6.2.11: Průběh posunutí - chránič s pěnou o hustotě $260 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, bez krycí vrstvyObr. 6.2.12: Průběh posunutí - chránič s pěnou o hustotě $260 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ s otvory, bez krycí vrstvyObr. 6.2.13: Průběh posunutí - chránič s pěnou o hustotě $400 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, bez krycí vrstvy

7 Závěr

Zkoumaná pěna SCL je vhodná pro použití v ochranných prostředcích motocyklistů.

Z provedených experimentů je jasně patrná teplotní citlivost zkoumané pěny SCL v průběhu zatěžování. Při dopadových rychlostech menších než $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ se projevuje vliv teploty jako pozitivní, kdy hodnota přenesené síly mírně klesá. Při vyšších dopadových rychlostech ale dochází k výraznějšímu zvýšení hodnot přenesených sil v závislosti na teplotě materiálu. Lze předpokládat, že s rostoucí dopadovou rychlostí bude nepříznivý vliv teploty stále markantnější, což představuje značné riziko pro motocyklisty. Samotný pěnový chránič by bylo tedy vhodné doplnit o plastovou či kompozitní svrchní vrstvu, jakousi skořápku, která by zejména za vyšších teplot pomáhala působící sílu lépe rozkládat a zároveň sama představovala další tlumicí prvek.

U deformací je vliv teploty jednoznačně negativní, kdy pro všechny případy dopadových rychlostí došlo ke snížení hodnot minim posunutí razníku v závislosti na rostoucí teplotě. Zde opět lze doporučit použití výše zmíněné skořápky, která by případné koncentrované zatížení rozložila na větší plochu chrániče.

Dle realizované části standardní zkoušky je patrné, že chránič SAS-TEC SCL-2 patří do třídy 2, kdy při pádu z 1 m přenesená síla nepřesáhne 20 kN. Bude-li chránič podroben nepovinné části testování z normy ČSN EN 1621-1 na vyšší teplotu $40 \text{ }^\circ\text{C}$ vyžadující výhřev chrániče po 24 hodin před testováním, lze na základě provedených nadstandardních zkoušek usuzovat, že hrozí přechod chrániče do třídy 1, či úplně nesplnění normy.

Model s identifikovanými parametry je vhodný pro popis pádových zkoušek zohledňujících jak rychlost dopadu, tak vliv teploty materiálu. Obecně model přenáší vyšší síly než reálná pěna, jeho použití při návrhu nového chrániče či úpravám stávajícího je tedy na straně vyšší bezpečnosti.

Z provedeného srovnání běžně dostupných chráničů, respektive různých druhů tlumících pěn, vyšla nejlépe pěna SCL, která dokázala přenést nejmenší sílu a současně si zachovala schopnost tlumit náraz při opakovaném zatížení. Geometrické otvory ve struktuře pěny nepříznivě zvýšily hodnotu přenesené síly. Ze srovnání vyšel papír jako lepší krycí materiál než kůže.

Pro získání přesnějšího materiálového modelu by bylo vhodné vstupní parametry modelu rozšířit o data z více tlakových zkoušek, zahrnující především větší rychlosti deformace v závislosti na různých teplotách materiálu.

Údaje získané při tvorbě této práce budou v budoucnu použity při simulacích nehod motocyklistů a poslouží při tvorbě efektivnějších ochranných prvků.

Literatura

- [1] Vaculík, M. Seriál o spotřebě: Je úspornější skútr, nebo auto? In: *Auto.cz*. 18. 5. 2012 [cit. 22. 2. 2019]. Dostupné z <https://www.auto.cz/serial-o-spotrebe-je-uspornejsi-skutr-nebo-auto-67021>
- [2] Ministerstvo dopravy ČR. BESIP: Teplé počasí přineslo zahájení motorkářské sezóny, motocyklisté patří mezi nejohroženější. In: *Ministerstvo dopravy ČR* [online]. 1. 3. 2019 [cit. 22. 2. 2019]. Dostupné z: <https://www.mdcr.cz/Media/Media-a-tiskove-zpravy/BESIP-Teple-pocasi-prineslo-brzke-zahajeni-motork>
- [3] Česko. Zákon č. 361/2000 Sb., o provozu na pozemních komunikacích a o změnách některých zákonů (zákon o silničním provozu). In: *Sbírka zákonů*. 19. 10. 2000. ISSN 1211-1244.
- [4] Erdogan, M. O., Soqut, O., Colak, S., Ayhan, H., Afacan, M. A. a Satilmis, D. Roles of motorcycle type and protective clothing in motorcycle crash injuries. *Emergency Medicine International*. 2013, vol. 2013, s. 1-4. ISSN 2090-2859.
- [5] Rome, L. de. The injury reduction benefits of motorcycle protective clothing. *NTSB 2006 : Proceedings of the Public Forum on Motorcycle Safety*. Washington, D.C., USA: 2006, s. 1-14.
- [6] Fornells, A., Parera, N., Azpeitia, J. A., Ferris, S. a Alba, J. J. Kid-shell: Safety system protection for child passengers travelling on powered two-wheeled vehicles. In: *Proceedings of the 6 th Transport Research Arena*. Warsaw, Poland: Elsevier, 2016, vol. 14, s. 3886 - 3894. ISBN 978-1-5108-2689-2.
- [7] Hynčák L., Bońkowski T., Kottner R. Virtual assessment of motorcycle helmet contribution to decreasing injury risk in impact. *37th Fisita World Automotive Congress*. Chennai, India, 2018. s. 1-6. ISBN 978-095720765-3.
- [8] ČSN EN 1621-1. *Ochranné oděvy pro motocyklisty proti mechanickému nárazu — Část 1: Chrániče kloubů proti nárazu pro motocyklisty — Požadavky na zkušební metody*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [9] Holzer, L. A. , Skrbensky, G. von , Holzer, G. Mechanical testing of different hip protectors according to a European Standard. *Injury*. 2009, vol. 40, no. 11, s. 1172-1175. ISSN 0020-1383.

-
- [10] SAS-TEC body protection system. Shoulder-Protectors. In: *SAS-TEC GmbH ©2018* [online]. [Cit. 10. 3. 2019]. Dostupné z: <https://www.sas-tec.de/en/protectors/shoulder-protectors/>
- [11] Avalor, M., Belingardi, G. a Montanini, R. Characterization of polymeric structural foams under compressive impact loading by means of energy-absorption diagram. *International Journal of Impact Engineering*. 2001, vol. 25, no. 5, s. 455-472. ISSN 0734-743X.
- [12] D3O®. D3O® MATERIAL MATRIX [online]. *Design Blue limited ©2018*. [Cit. 3. 3. 2019]. Dostupné z: <https://www.d3o.com/wp/wp-content/uploads/2019/03/d3o-material-matrix.pdf>
- [13] Vries, D.V.W.M. de. *Characterization of polymeric foams*. Eindhoven, 2009. Disertační práce. Eindhoven University of Technology, Department of Mechanical Engineering, Mechanics of Materials.
- [14] Fernandes, F. A. O., Sousa, R. J. A. de, Willinger, R. a Deck, C. Finite element analysis of helmeted impacts and head injury evaluation with a commercial road helmet. In: *2013 IRCOBI Conference Proceedings - International Research Council on the Biomechanics of Injury*. Gothenburg, Sweden: 2013, s. 431-435. ISSN 0000-2013.
- [15] Miralbes, R. Design of motorcycle rider protection systems using numerical techniques. *Accident Analysis and Prevention*. 2013, vol. 59, s. 94–108. ISSN 0001-4575.
- [16] Aiello, M., Galvanetto, U. a Iannucci, L. Numerical simulations of motorcycle helmet impact tests. *International Journal of Crashworthiness*. 2007, vol. 12, s. 1-7. ISSN 1358-8265.
- [17] Škrlec, A., Klemenc, J. a Fajdiga, M. Parameter identification for a Low-density-foam material model using numerical optimisation procedures. *Engineering Computations*. 2014, vol. 31, no. 7, s. 1532-1549. ISSN 0264-4401.
- [18] Nasim, M., Brasca, M., Khosroshahi, S. F. a Galvanetto, U. Understanding the impact properties of polymeric sandwich structures used for motorcyclists' back protectors. *Polymer Testing*. 2017, vol. 61, s. 249-257. ISSN 0142-9418.
- [19] Vašina, M. Úvod do předmětu enviromentální fyzika. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně [online]. 7. 6. 2010 [cit. 23. 4. 2019]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/env_fyzika/EF_06.pdf

- [20] Kelly, P. Solid Mechanics Part I: An Introduction to Solid Mechanics. Solid mechanics lecture notes. University of Auckland. 2013.
- [21] Brinson, H. F., Brinson, L. C. Polymer Engineering Science and Viscoelasticity. Springer, 2008. ISBN 978-0-387-73860-4.
- [22] Crushable foam plasticity models. 2017 [cit. 3. 3. 2019]. Dostupné z: <https://abaqus-docs.mit.edu/2017/English/SIMACAEMATRefMap/simamat-c-crushfoam.html>
- [23] Machado, G.C., Alves, M.K., Rossic, R., Silva Jr., C.R.A. Numerical modeling of large strain behavior of polymeric crushable foams. *Applied Mathematical Modelling*. 2011, vol. 35, s. 1271-1281. ISSN 0307-904X.
- [24] Kinzl, M., Wolfram, U. a Pahr, D.H. Identification of a crushable foam material model and application to strength and damage prediction of human femur and vertebral body. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*. 2013, vol. 26, s. 136-147. ISSN 1751-6161.
- [25] Daďourek, K. Kompozitní materiály - definice a rozdělení [online]. Doc. Ing. Karel Daďourek, ©2008. [Cit. 3. 3. 2019]. Dostupné z: http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/KM/Kompozity%20Dad/02defrozd.pdf.
- [26] Lobo, H., Croop, B. Selecting material models for the simulation of foams in LS-DYNA. In *7th LS-DYNA Conference*. Salzburg, Austria: DYNAmore GmbH, 2009. ISBN 978-3-9809-9015-8.
- [27] Abaqus Analysis User's Guide. Abaqus 6.14 Online Documentation. Dassault Systèmes, © 2014. [Cit. 3. 3. 2019]. <https://www.sharcnet.ca/Software/Abaqus/6.14.2/v6.14/books/usb/default.htm?startat=pt05ch22s09abm16.html>
- [28] Kottner R., Kaňáková, S., Šoltés, L., Bońkowski, T., Krystek J., Mechanical behaviour of foam used in joint protectors. In: *Proceedings of the 56th Conference on Experimental Stress Analysis*. Harrachov: Technical University of Liberec, 2018, s. 196-201. ISBN 978-1-5108-6534-1.