



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
Fakulta mechatroniky, informatiky  
a mezioborových studií ■

# EXPERIMENTÁLNÍ METODIKA STANOVENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ HOUŽEVNATÝCH PLASTŮ

## Autoreferát disertační práce

*Studijní program:* P3901 Aplikované vědy v inženýrství  
*Studijní obor:* 3901V055 Aplikované vědy v inženýrství  
*Autor práce:* **Ing. Petr Horník**  
*Vedoucí práce:* doc. Ing. Antonín Potěšil, CSc.





## Abstrakt

Tato disertační práce si klade za cíl zpřesnění výsledků numerických simulací fyzických zkoušek nárazníků. Tohoto zpřesnění se snaží dosáhnout zkvalitněním materiálového popisu, jenž vstupuje do konečně-prvkového materiálového modelu. Tématem práce je návrh experimentální metodiky identifikace mechanických vlastností houževnatých polymerních materiálů využívaných při konstrukci nárazníků. U této experimentální metodiky je zároveň kladen důraz na minimalizaci experimentálních prací. To vede ke zkrácení doby experimentů a tím ke snížení nákladů. To je podstatná skutečnost pro využívání této metodiky v praxi.

Zmiňovaná experimentální metodika identifikace mechanických vlastností v sobě obecně zahrnuje volbu, příp. návrh: zkušebních zařízení, typu a podmínek experimentálních zkoušek a jejich provázanost, způsob zpracování naměřených dat a jejich interpretace ve vztahu k používaným typům konečně-prvkových materiálových modelů. Návrh skladby a podmínek experimentálních zkoušek této metodiky vychází z podmínek fyzických zkoušek nárazníků. Tyto podmínky jsou velmi rozličného charakteru z hlediska teploty, rychlosti zatížení (rychlosti deformace) nebo doby působení zatížení. Nárazníky se zkouší na statická a rázová zatížení, ale i na kríp. Teploty se pohybují v rozsahu od  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Experimentální práce probíhají na třech zařízeních (univerzální zkušební zařízení, dynamicko-mechanický analyzátor a padostroj). Padostroj, sloužící k realizaci rázových zkoušek v tahu, byl navržen pro účely této práce.

Na základě experimentálně získaných dat je vytvořen konečně-prvkový materiálový model. Ten je verifikován experimentální rázovou zkouškou nárazníku. Jsou porovnávány výsledky dvou simulací s experimentem. První simulace obsahuje původní konečně-prvkový materiálový model užívaný v dosavadní praxi. Druhá simulace používá nový konečně-prvkový materiálový model vytvořený dle představené experimentální metodiky. Porovnání ukazuje, že nový materiálový model dosahuje přesnějších a kvalitnějších výsledků než model původní. To dokazuje naplnění vytyčeného cíle této práce.

**Klíčová slova:** automobilový nárazník, polymer, mechanické vlastnosti, experiment, padostroj, konečně-prvkový model

## Abstract

Aim of the thesis is to achieve more precise of numerical simulations results of physical car bumper tests. It will be achieved through improving the material description, which is inserted into the finite element material model. The theme of the thesis is to create an experimental methodology for identification of mechanical properties of ductile polymer materials used in the design of the bumpers.

There is also important to minimize of experimental work in this experimental methodology. It leads to shortening of the experiments and thus reduces costs. It is essential to use the methodology in practice.

The mentioned experimental methodology of identifying the mechanical properties generally includes selection or design of: test equipment, the type and conditions of the experiments and their interconnection, the way data processing and interpretation in relation to the used type of finite element material model. Composition and conditions of experimental tests of the methodology is based on the physical car bumper tests. These conditions are very different kind in terms of temperature, load velocity (strain rate) and duration of load. Temperatures range from  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  to  $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Experimental work is performed on three devices (universal testing machine, dynamic-mechanical analyzer and drop tester). Drop tester has designed for the implementation of the tensile impact test for the purposes of this thesis.

Finite element model has based on the experimental data. The model has verified by experimental car bumper impact test. The results of two simulations were compared with experiment. The first simulation was based on the original finite element material model used in current practice. The second simulation used a new finite element material model based on the presented experimental methodology. The comparison shows that the new material model achieves more accurate and better results than the original model. This fact demonstrates the fulfillment of given aim of this thesis.

**Keywords:** car bumper, polymer, mechanical properties, experiment, drop tester, finite element model

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Mechanické vlastnosti polymerů</b>	<b>8</b>
2.1	Youngův modul .....	8
2.2	Poissonův poměr .....	8
2.3	Mez kluzu .....	8
2.4	Mez pevnosti .....	9
2.5	Křípový a relaxační modul .....	9
2.6	Dynamický modul .....	10
2.7	Vliv teploty a rychlosti deformace na mechanické vlastnosti plastů .....	11
2.7.1	Vliv teploty na mechanické vlastnosti plastů .....	11
2.7.2	Vliv rychlosti deformace na mechanické vlastnosti plastů .....	12
2.8	Vliv struktury na mechanické vlastnosti plastů.....	12
2.8.1	Molekulová hmotnost .....	12
2.8.2	Tvar makromolekul .....	12
2.8.3	Nadmolekulární struktura .....	13
2.8.4	Stupeň krystalinity .....	13
2.8.5	Vliv přísad .....	13
<b>3</b>	<b>Materiálové modely ve FEM softwarech</b>	<b>14</b>
3.1	Elastický model .....	14
3.2	Elastoplastický model .....	14
3.3	Lineární viskoelastický model .....	15
3.3.1	Zobecněný Maxwellův model .....	15
3.3.2	Pronyho řada.....	15
3.4	Nelineární viskoelastický model .....	16
3.4.1	G'Sellův model.....	16
<b>4</b>	<b>Zkoušky prováděné v automobilovém průmyslu</b>	<b>17</b>
4.1	Statické zkoušky.....	17
4.2	Dynamické zkoušky .....	17
4.3	Klimatické zkoušky.....	17
<b>5</b>	<b>Experimentální identifikace mechanických vlastností</b>	<b>18</b>
5.1	Univerzální zkušební zařízení LabTest 5.050ST .....	19
5.2	DMA Q800.....	20
5.3	Padostroj.....	22

5.4	Zkoušený materiál .....	25
5.5	Zkušební tělesa .....	25
5.6	Stanovení modulů .....	27
5.6.1	Youngův modul .....	27
5.6.2	Relaxační modul .....	27
5.6.3	Reálná složka dynamického modulu .....	31
5.6.4	Vztah relaxačního a dynamického modulu .....	33
5.7	Viskoelastické chování ve vztahu k elastoplastickému modelu .....	38
5.7.1	Stanovení zbytkové deformace .....	38
5.8	Tahové křivky .....	41
5.8.1	Statická zkouška v tahu .....	41
5.8.2	Rázová zkouška v tahu .....	43
5.8.3	Výsledky tahových zkoušek .....	45
5.9	Anizotropie materiálu .....	48
5.10	Vliv lakování .....	50
<b>6</b>	<b>Verifikace materiálového modelu</b>	<b>52</b>
6.1	Fyzická zkouška nárazníku .....	52
6.2	Simulace zkoušky nárazníku .....	52
6.2.1	Porovnání původního a nového materiálového modelu .....	52
6.3	Výsledky porovnání simulací s experimentem .....	53
<b>7</b>	<b>Závěr</b>	<b>56</b>
	<b>Seznam citovaných publikací</b>	<b>58</b>
	<b>Seznam publikací autora</b>	<b>60</b>

# 1 Úvod

V současné praxi automobilového průmyslu musí každý plastový díl nebo sestava dílů automobilu splňovat určitá kritéria, která jsou dána interními předpisy dané automobilky či mezinárodními normami. Ověřování těchto kritérií probíhá pomocí fyzických zkoušek prototypů či sériových výrobků. Snahou je tyto zkoušky nahradit numerickými simulacemi zejména ve vývojové (prototypové) fázi. To však klade vysoké nároky na přesnost výsledků numerických simulací.

Kvalita (přesnost) výsledků numerických simulací závisí mimo jiné na kvalitě vstupních materiálových dat, které definují deformační chování. Pro jeho popis je klíčová znalost jejich mechanických vlastností. V současné době nelze z dostupných zdrojů čerpat materiálová data, která by měla dostatečnou vypovídající hodnotu. Ani experimentální identifikace materiálových vlastností u certifikovaných zkušeben, které provádějí zkoušky dle normativů, nemusejí poskytovat potřebné vstupy do materiálových modelů numerických simulací.

Hlavním cílem této práce je zpřesnění dosavadních konečně-prvkových výpočtů, a to na základě zpřesnění jejich materiálových vstupů. Materiálovými vstupy je míněn popis mechanických vlastností daného materiálu. Jedná se o materiály typu houževnatých termoplastů, pro které je tato práce vymezena. Pro tyto účely byla navržena experimentální metodika identifikace mechanických vlastností zkoumaných polymerních materiálů. Tato experimentální metodika zohledňuje vlivy technologického charakteru, ale i povahu simulovaných dějů a respektuje vlastnosti používaných konečně-prvkových modelů. Součástí této metodiky je i způsob zpracování naměřených dat s ohledem na znalosti principů z mechaniky viskoelastických látek.

Dále je kladen důraz na efektivitu představované experimentální metodiky. To znamená, že metodika musí využít maximálního možného zjednodušení při dostatečně malém zkreslení výsledků, resp. s maximální přípustnou chybou. To se prakticky projeví zjednodušením a zkrácením experimentálních prací. Přínos disertační práce tedy spočívá ve vytvoření metodiky stanovení mechanických vlastností houževnatých polymerních materiálů pro průmyslovou praxi.

Konkrétní výsledky mohou sloužit ke komerčním účelům a jsou proto důvěrné. Z těchto důvodů jsou hodnoty zde uváděné znormovány a jsou tedy pouze relativní.

## 2 Mechanické vlastnosti polymerů

Mechanické vlastnosti polymerů jsou výsledkem mnoha různých vlivů. Kromě výše uvedených, tedy chemického složení, velikosti makromolekul, molekulární a nadmolekulární struktury a obsahu plniv jsou mechanické vlastnosti polymerů teplotně a časově závislé. Oba tyto vlivy budou blíže rozebrány dále.

### 2.1 Youngův modul

Youngův modul lze stanovit z počáteční lineární části deformační křivky. V oblasti linearity platí Hookův zákon a u polymerů nepřekračuje 1 % deformace [1]. Podmínky a způsob stanovení Youngova modulu předepisuje norma [2]. Takto stanovené hodnoty, uváděné v materiálových listech výrobcem daného polymeru, mají pouze informativní charakter a používají se při vzájemném porovnávání jednotlivých polymerů. Pro materiálové výpočty jsou takové hodnoty nedostatečné. Kromě Youngova modulu v tahu se u plastů také zjišťuje Youngův modul v ohybu, méně často v tlaku.

### 2.2 Poissonův poměr

Podíl relativního příčného zúžení a relativního prodloužení tělesa namáhaného tahem se označuje jako Poissonův poměr  $\mu$ . Ten je závislý na teplotě a na době působení napětí. Poissonův poměr se zvětšuje s rostoucí teplotou a s prodlužující se dobou zatížení. U polymerních materiálů se hodnota Poissonova poměru pohybuje zpravidla mezi 0,3 a 0,5 [3].

Prostřednictvím Youngova modulu a Poissonova poměru lze vyjádřit i další dvě elastické materiálové konstanty, a to smykový modul a objemový modul.

### 2.3 Mez kluzu

Významným bodem na tahové křivce je mez kluzu. Jde o napětí, při kterém se začíná tvořit krček. Vzhledem k průběhu, který je vidět na, se dají definovat dvě meze kluzu. První z nich je dána lokálním maximem napětí a nazývá se tzv. horní mezí kluzu. Pakliže po překročení meze kluzu dochází k poklesu napětí jako v tomto případě, lze určit i dolní mez kluzu, která je dána minimálním napětím v oblasti za horní mezí kluzu. Zde dochází k rozšiřování již vytvořeného krčku. Obě meze kluzu se vyjadřují



smluvním napětím. Mez kluzu se považuje za horní hranici dovoleného napětí při návrhu součástí, protože po jejím překročení dochází k velkým trvalým deformacím.

## 2.4 Mez pevnosti

Mez pevnosti je veličina, která se nejčastěji stanovuje z tahové zkoušky a definuje se jako maximální smluvní napětí, tedy odpovídá maximální naměřené síle vztažené vůči původnímu průřezu tělesa. Tato hodnota nemusí vždy souhlasit s napětím při porušení tělesa.

Výše zmíněné veličiny se běžně zjišťují standardními a zpravidla statickými zkouškami. Vzhledem k tomu, že polymerní materiály mají časově (rychlostně) závislé vlastnosti, je nutné mechanické vlastnosti posuzovat i vzhledem k době (rychlosti) zatěžování. Z těchto důvodů byly vyvinuty speciální experimentální postupy či metody. U nich se sleduje zejména tuhost či poddajnost plastů. Na jedné straně se jedná o experimenty jako je např. dynamicko-mechanická analýza, kde je časové působení velmi krátké a stanovují se zde dynamické moduly. Na straně druhé se provádí i kríповé či relaxační zkoušky, které jsou dlouhodobé a zde se určují kríповé nebo relaxační moduly. Toto je podrobněji popsáno dále.

## 2.5 Kríповý a relaxační modul

Kríp, neboli tečení za studena, je jev, při kterém je těleso dlouhodobě vystaveno konstantnímu statickému zatížení, přičemž dochází v průběhu času k nárůstu deformace. Kríp se projevuje u polymerů, u kterých je pohyblivost makromolekul na takové úrovni, že dochází při konstantním napětí ke změně jejich uspořádání. Z toho plyne, že čím je možnost pohybu makromolekul menší, tím menší je i rychlost deformace a materiál tak vykazuje menší kríp. U semikrystalických polymerů závisí velikost krípu také na stupni krystalinity. Kríp je dále ovlivněn teplotou. S rostoucí teplotou se zvyšuje pohyblivost makromolekul a tím roste rychlost krípu. Pod teplotou zesklnění bývá kríповé chování značně potlačeno.

Kríповé chování je možné vysledovat kríповými zkouškami. U nich se sleduje průběh deformace v závislosti na čase při určité úrovni napětí, která je po celou dobu zkoušky konstantní. Tyto závislosti jsou označovány jako křivky tečení.

Veličina vyjadřující tuhost materiálu při krípu se nazývá kríповý modul. Stejně jako u Youngova modulu je i tento kríповý modul podílem napětí a deformace. Vzhledem k časové závislosti, lze k jedné hodnotě napětí přiřadit nekonečně mnoho hodnot deformací. Z toho vyplývá, že kríповý modul je funkcí času. Hodnota kríповého modulu v konkrétním časovém okamžiku je dána sklonem příslušné izochronní křivky.

Obdobně lze realizovat také relaxační zkoušky. Základní rozdíl spočívá v principu zatěžování. Při relaxaci sledujeme průběh napětí v závislosti na čase, a to při konstantní úrovni deformace. To znamená, že vztah mezi deformací a napětím je zde obrácený oproti kríповé zkoušce. V tomto případě určujeme tzv. relaxační modul.

Kríповé zkoušky jsou časově velmi náročné. Mohou trvat i několik tisíc hodin [1]. Z tohoto důvodu byla vytvořena metodika pro stanovení závislosti kríповého modulu na čase, která umožňuje výrazně zkrátit dobu měření. Tato metodika platí pro lineární viskoelastický materiál a je postavena na dvou superpozičních principech:

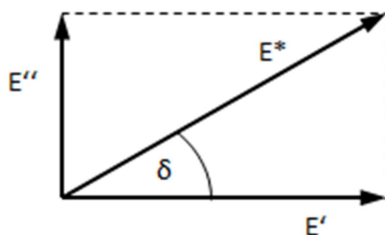
- Boltzmannův princip superpozice, který popisuje odezvu materiálu na historii zatěžování. Obecně říká, že celkový důsledek řady příčin je roven součtu důsledků jednotlivých příčin [4]. Definuje vztahy mezi kríповou poddajností a relaxačním modulem, které jsou uvedeny v [5].
- časově-teplotní princip superpozice (Time Temperature Superposition Principle) [4], [6].

## 2.6 Dynamický modul

Při působícím napětí harmonického (sinusového) charakteru sledujeme zároveň průběh deformace. V případě ideálně pružných materiálů, kde odezva na působící napětí je okamžitá, bude výsledná deformace a napětí dokonale ve fázi. Pro ryze viskózní kapaliny dojde k fázovému posunu průběhu deformace o  $90^\circ$  vůči napětí. U viskoelastických materiálů se část mechanické energie dodané při jednotlivých cyklech přemění v teplo a deformace se za napětím opozdí o nějaký fázový posun. Napětí vždy předbíhá deformaci. Napětí můžeme rozdělit na dvě složky, kde jedna je ve fázi a druhá mimo fázi (předbíhající deformaci o úhel  $\delta$ ). Podíl napětí a deformace se definuje jako tzv. dynamický modul:

$$E^* = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\sigma_A}{\varepsilon_A} e^{i\delta} = \frac{\sigma_A}{\varepsilon_A} (\cos \delta + i \sin \delta) = E' + iE'' \quad (1)$$

Dynamický modul lze vyjádřit vektorově (obr. 1).



obr. 1: Vektorové vyjádření dynamického modulu.

$E'$  (angl. Storage Modulus) je reálná část dynamického modulu. Je mírou elastického odporu materiálu proti deformaci. Určuje hodnotu energie akumulované a uvolněné v jednotce objemu za jednu periodu. Ze strukturního hlediska odráží zdánlivou tuhost makromolekulárních řetězců.

$E''$  (angl. Loss Modulus) je imaginární částí dynamického modulu. Je mírou přenosu energie mezi molekulami. Charakterizuje mechanické ztráty a určuje množství energie, která se přemění na teplo za periodu deformace.

Mechanické tlumení namáhaného vzorku lze charakterizovat také podílem imaginární a reálné složky dynamického modulu, tedy tzv. ztrátovým činitelem  $\tan \delta$ .

$$\tan \delta = \frac{E''}{E'}. \quad (2)$$

## 2.7 Vliv teploty a rychlosti deformace na mechanické vlastnosti plastů

### 2.7.1 Vliv teploty na mechanické vlastnosti plastů

Vlastnosti polymerů jsou výrazně závislé na teplotě. Některé mechanické vlastnosti, jako např. pevnost či Youngův modul, se zvyšující teplotou mohou v určité oblasti prudce klesnout. Těmto oblastem, kde se vlastnosti mění skokově, říkáme přechodové (tranzitní) teploty.

Vzhledem k tomu, že každý semikrystalický polymer obsahuje určitou část amorfního podílu, lze u nich stanovit tzv. teplotu zesklenní (skelného přechodu)  $T_g$ . Změny mechanických vlastností způsobené přechodem přes teplotu zesklenní se týkají pouze amorfni fáze. Z toho plyne, že čím vyšší bude stupeň krystalinity, resp. čím nižší podíl amorfni složky bude obsažen v polymeru, tím menší budou změny při  $T_g$ .

Pod teplotou  $T_g$  je polymer tvrdý, křehký a má vysoký Youngův modul. V přechodové oblasti kolem  $T_g$  Youngův modul výrazně klesá. Nad touto teplotou je polymer v houževnatém stavu.

Teplotu zesklenní lze uměle snížit např. přidáním změkčovadel, jehož částice oddalují od sebe makromolekuly a klesá tak mezimolekulární soudržnost. Jiný způsob je pomocí kopolymerace monomerů zvyšující pohyblivost makromolekul [1].

### **2.7.2 Vliv rychlosti deformace na mechanické vlastnosti plastů**

Vzhledem k časové závislosti mechanických vlastností plastů je rychlost deformace dalším podstatným činitelem při deformačním chování. Rychlost deformace ovlivňuje celý průběh tahové křivky. S rostoucí rychlostí deformace se zvyšuje Youngův modul i mez kluzu a snižuje se celková tažnost. Čím je rychlost deformace vyšší, tedy kratší doba působení vnějšího zatížení, tím méně se uplatňují časově závislé složky deformace.

## **2.8 Vliv struktury na mechanické vlastnosti plastů**

Vlastnosti plastu jsou odvislé od mnoha rozličných faktorů zahrnujících chemické složení i strukturu jako takovou. Na strukturu plastu je třeba nahlížet jak na úrovni molekulární, tj. na makromolekulu jako samostatný útvar, tak i na úrovni nadmolekulární, tj. z hlediska vzájemné interakce makromolekul. Struktura na nižší úrovni vždy ovlivňuje způsob uspořádání na úrovni vyšší.

### **2.8.1 Molekulová hmotnost**

Podstatnou vlastností makromolekul je jejich velikost, resp. molekulová hmotnost. Velikost makromolekul přímo souvisí s mechanickými a fyzikálními vlastnostmi polymerů. Z hlediska zlepšení mechanických vlastností je žádoucí, aby molekulová hmotnost byla co největší, ovšem příliš vysoká molekulová hmotnost zhoršuje zpracovatelnost polymeru. Proto se v praxi volí kompromis mezi oběma požadavky.

### **2.8.2 Tvar makromolekul**

Dalším důležitým faktorem ovlivňující vlastnosti polymerů je tvar makromolekul. Ten může být:

- a) lineární (makromolekulární řetězec hladký, zpravidla jde o tvar nitky sbaleného do klubka)

- b) rozvětvený (na základním řetězci napojeny boční větve)
- c) zesíťovaný (propojení sousedních makromolekul pomocí chemické vazby, typické pro reaktoplasty, vlastnosti závisí na hustotě sítě)

### 2.8.3 Nadmolekulární struktura

Významný vliv na vlastnosti polymerů má jejich nadmolekulární struktura (morfologie), resp. míra uspořádanosti makromolekul. Lze rozlišovat dva mezní stavy:

- a) amorfní struktura (makromolekuly zcela neuspořádané)
- b) semikrystalická struktura (makromolekuly vykazují určitou míru uspořádanosti, která je definována stupněm krystalinity)

### 2.8.4 Stupeň krystalinity

U semikrystalických polymerů se zavádí veličina označovaná jako stupeň krystalinity, který vyjadřuje procentuální podíl krystalické (uspořádané) fáze v materiálu. Zbýlý podíl v polymeru tvoří amorfni (neuspořádaná) složka.

Vzhledem k tomu, že v krystalických oblastech jsou makromolekuly těsněji uspořádány než v oblastech amorfni, tak i soudržné síly jsou zde větší. Čím vyšší je tedy stupeň krystalinity (podíl krystalických fází), tím vyšší je pevnost, tuhost a tvrdost polymeru. Zároveň klesá houževnatost a tažnost polymeru. I přes zmíněné rozdíly obou fází zcela amorfni polymer (tedy s nulovým podílem krystalické fáze) má vyšší mechanické vlastnosti než polymer semikrystalický [1].

### 2.8.5 Vliv přísad

Plasty lze rozdělit podle přísad na dvě skupiny, plněné a neplněné. Plněné plasty se vyznačují tím, že ovlivňují fyzikální i mechanické vlastnosti plasty.

Existuje celá řada plniv. Vzhledem k této práci stojí za zmínku zejména talek, který je velmi využívaný. Talek je anorganické minerální plnivo na bázi křemičitanů přidávané k polymerům. Talek je příčinou zjemnění krystalické struktury polymerů. Zvyšuje tuhost a mez kluzu. Snižuje tažnost a rázovou houževnatost. Ovlivňuje křipové chování, tepelnou stabilitu, teplotní roztažnost aj.

### 3 Materiálové modely ve FEM softwarech

Základním předpokladem správných výsledků numerických simulací je kvalitní popis deformačního chování materiálu. Jeho kvalita je dána v první řadě dostatečně správnými a přesnými materiálovými daty, která jsou zjištěná experimentálně na základě provedených zkoušek. Takto stanovená data slouží jako vstup pro tvorbu materiálového modelu. Zde se dostáváme k další podstatné věci, a tou je samotná volba materiálového modelu. Konečně-prvkové (FEM) softwary nabízejí celou řadu těchto modelů a je na rozhodnutí každého výpočtáře, který zvolí. Volba typu modelu by se měla odvíjet podle:

- typu modelovaného materiálu,
- simulovaného děje (charakteru zatížení),
- míry deformace.

V následujícím textu budou představeny některé materiálové modely, které se využívají při numerických simulacích.

#### 3.1 Elastický model

Odovídá chování ideálně pružného tělesa. Platí zde Hookův zákon. Materiál je charakterizován modulem (Youngovým, smykovým a objemovým) a Poissonovým poměrem. Pro teplotní zatížení se zadává součinitel teplotní délkové roztažnosti.

Vzhledem k tomu, že se jedná o lineární model, který není časově závislý, což neodpovídá chování houževnatým semikrystalickým termoplastům, lze ho použít jen v omezené míře. Je vhodné ho užít pouze pro krátkodobá zatížení, kde se výrazněji neprojeví časově závislé vlastnosti. Dále slouží pouze pro relativně malé deformace, které odpovídají lineární závislosti napětí na deformaci a kde při odlehčení deformace zcela vymizí.

#### 3.2 Elastoplastický model

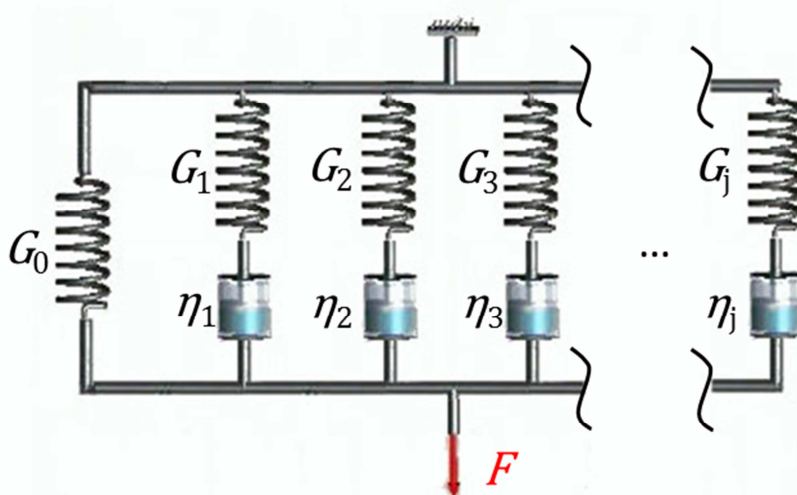
Je charakterizován materiálovou deformační křivkou až do okamžiku porušení materiálu. Youngův modul je dán směrnici této křivky z počátku. Je možné ho použít pro velké deformace. Tento model, sám o sobě, není časově závislý. Není tedy vhodný pro simulace dlouhodobých dějů u plastů.

### 3.3 Lineární viskoelastický model

Využívá se model Pronyho řady. Je vhodný k simulaci dlouhodobých dějů (kríp, relaxace), kde míra deformace nepřekračuje oblast lineární viskoelasticity.

#### 3.3.1 Zobecněný Maxwellův model

Zobecněný Maxwellův model, také známý jako Maxwell-Wiechertův model [7], je nejobecnějším tvarem lineárního viskoelastického modelu. Bere v úvahu, že k uvolnění napětí nedochází v jednom okamžiku, ale je rozloženo v čase. To se děje kvůli různé délce makromolekul. Tento model má takové množství dvojic prvků pružina-tlumič, aby dostatečně přesně vystihl časovou závislost poklesu napětí.



obr. 2: Maxwell-Wiechertův model.

#### 3.3.2 Pronyho řada

Relaxační chování dobře vystihuje zobecněný Maxwellův model. Na základě tohoto modelu lze časový průběh relaxačního modulu aproximovat podle vztahů tzv. Pronyho řady [8] (v [6] nazýváno jako relaxační a retardační spektra):

$$E(t) = E_0 - \sum_{i=1}^N (E_{i-1} - E_i) \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right), \quad (3)$$

kde  $E_0$  je okamžitý modul, který odpovídá bezprostředně po zatížení (v čase 0 s),  $\tau_i$  je relaxační časový úsek,  $(E_{i-1} - E_i)$  je úbytek relaxačního modulu v příslušném časovém úseku  $\tau_i$ ,  $t$  je uplynulá doba.

## 3.4 Nelineární viskoelastický model

### 3.4.1 G'Sellův model

Jedná se o jeden z materiálových modelů, který je využíván v softwaru PAM-CRASH (označené č. 121). Parametry, které se dosazují do vztahu tohoto materiálového modelu, se dají určit prostřednictvím tahových křivek. Tento materiálový model je vhodný pro termoplasty, neboť zahrnuje změnu Youngova modulu v závislosti na podmínkách zatížení. Je popsán G'Sell-Jonasovým vztahem [9], [10], [11], [12], [13], [14]:

$$\sigma = K \cdot e^{\left(\frac{\beta}{T}\right)} \cdot (1 - e^{-(w \cdot \varepsilon)}) \cdot e^{h_1 \cdot \varepsilon^2} \cdot \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)^m, \quad (4)$$

kde  $K$  je koeficient konzistence,  $w$  je koeficient viskoelastivity,  $h_1$  je koeficient deformačního zpevnění,  $m$  je koeficient citlivosti na rychlost deformace,  $\beta$  je koeficient vlivu teploty.

Model může být rozdělen na několik částí. První část reflektuje vliv teploty. Druhá část popisuje chování materiálu v oblasti do meze kluzu. Třetí část zohledňuje deformační zpevnění v oblasti za mezí kluzu. Čtvrtá část popisuje vliv rychlosti deformace. Model není závislý na stanovení meze kluzu. Počáteční hodnota modulu pružnosti je rovna součinu:

$$E = K \cdot w \quad (5)$$

Pro samotný popis křivky stačí stanovit pouze tři parametry.

$$\sigma = K \cdot (1 - e^{-(w \cdot \varepsilon)}) \cdot e^{h_1 \cdot \varepsilon^2} \quad (6)$$



## 4 Zkoušky prováděné v automobilovém průmyslu

V automobilovém průmyslu se provádí celá řada zkoušek různého charakteru. Zaměříme-li se pouze na zkoušky mechanické na konkrétním dílu (v našem případě na nárazník), tak i zde se realizují zkoušky rozličného druhu. Liší se z hlediska charakteru a rychlosti působení vnější síly, teploty nebo doby působení.

### 4.1 Statické zkoušky

Statické zkoušky obvykle probíhají tak, že se tlačí definovaným zatěžovacím tělesem na určitou plochu nárazníku po určitou dobu (řádově v sekundách). Tyto zkoušky se provádějí při různých teplotách (daných předpisem).

U takovýchto statických zkoušek jsou dána následující kritéria pro hodnocení. Nárazník musí vykazovat stabilní uchycení ke karoserii, velikost spár mezi jednotlivými díly musí být v toleranci a jakékoliv trvalé deformace či poškození jsou nepřijatelné.

### 4.2 Dynamické zkoušky

V případě dynamického zatížení se u předního i zadního nárazníku provádějí nárazové zkoušky podle předpisu Evropské hospodářské komise ECE-R 42. Účelem této zkoušky je simulovat podmínky čelního nárazu do jiného vozidla nebo nárazu při couvání. Nárazová rychlost zde dosahuje až 4 km/hod [15].

Provádí se i další dynamické zkoušky podobného charakteru jako u ECE-R 42, např. kyvadlové testy (za různých teplot). Hodnotí se, zdali úderem kyvadla nedojde k viditelnému poškození, deformaci nebo tříštivému lomu.

### 4.3 Klimatické zkoušky

Provádí se ale i zkoušky klimatické dlouhodobé, kde je nárazník vystaven teplotnímu cyklickému zatížení. Zkoušky mají simulovat stavy v provozu při extrémních teplotách.

Jako příklad můžeme uvést klimatickou zkoušku se střídavým teplotním cyklem dle předpisu VW označovanou jako PV 1200 [16]. Při zkoušce je sestava nárazníku namontována na přípravek napodobující uchycení na karoserii. Test trvá 240 hodin a teplota se zde mění v rozsahu od -40 do +80 °C. Test se skládá z 20 stejných cyklů.

Hodnotí se např. průběhy spár mezi jednotlivými díly, zdali nedošlo k nějakému poškození, tvarové změně či optickým vadám povrchu.

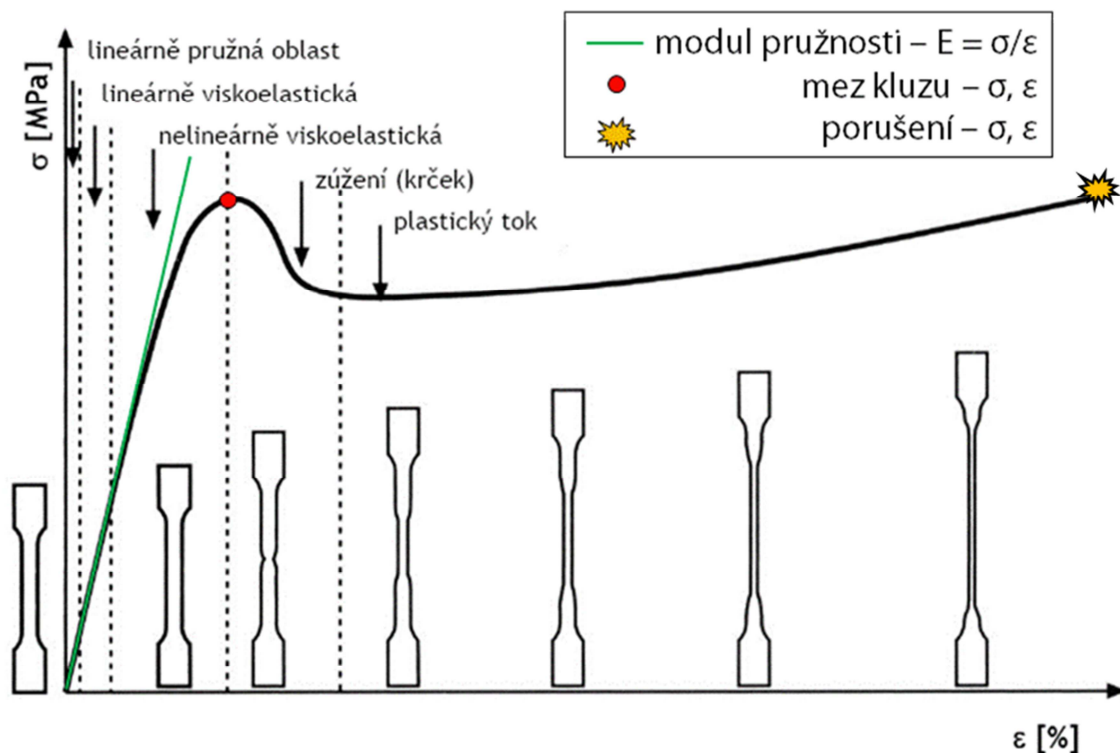
## 5 Experimentální identifikace mechanických vlastností

Jedním z důležitých cílů této práce je sestavení materiálových charakteristik v rozsahu teplot od  $-40$  do  $+80$  °C a rychlosti deformace do  $10^2$  s<sup>-1</sup>. Materiálovou charakteristikou je v našem případě myšlena tahová deformační křivka, tedy závislost napětí na deformaci při jednoosém tahu. Tato křivka je charakterizována několika veličinami, které byly blíže popsány v kapitole 2. Jedná se o Youngův modul, mez kluzu, mez při porušení materiálu a mez pevnosti. Všechny zmíněné veličiny lze teoreticky určit z tahové zkoušky. Vzhledem k obtížnějšímu měření Youngova modulu v tahu, je výhodnější stanovovat Youngův modul z ohybové zkoušky. Z toho tedy vyplývá, že tahovou křivku budeme rekonstruovat ze dvou měřených částí. První část reprezentuje počáteční oblast tahové křivky, tedy zjednodušeně řečeno vratnou elastickou deformaci, která je charakterizována Youngovým modulem. Tato hodnota představuje směrnici tečny v (počátečním) bodě na tahové křivce. Na obr. 3 je vyznačena zelenou přímkou. Druhou část křivky představuje oblast od meze kluzu až do porušení materiálu, tedy oblast, kde se uplatňují zejména velké nevratné deformace.

Pro identifikaci Youngova modulu při nižších rychlostech deformace (řádově do  $10^{-2}$  s<sup>-1</sup>) je prováděna zkouška tříbodovým ohybem, a to na univerzálním zkušebním zařízení LabTest 5.050ST od Labortech. Pro vyšší rychlosti deformace poslouží ke stanovení elastických vlastností polymerních materiálů dynamicko-mechanická analýza na přístroji DMA Q800 od TA Instruments.

Celkové tahové křivky při nižších rychlostech deformace v řádu do  $1$  s<sup>-1</sup> se měří rovněž na univerzálním zkušebním zařízení LabTest 5.050ST. Aby bylo možné provádět tahovou zkoušku i při vyšších rychlostech deformace do  $10^2$  s<sup>-1</sup>, bylo pro účely této práce vyvinuto zkušební zařízení – padostroj ve firmě LENAM, s.r.o. Rozsah zkoušek je názorně popsán v tab. 1.

Zkušební zařízení disponují teplotní komorou, která umožňuje provádět zkoušky v požadovaném teplotním rozsahu. Bližší popis těchto zařízení je popsán níže.



obr. 3: Deformační křivka semikrystalického termoplastu [17].

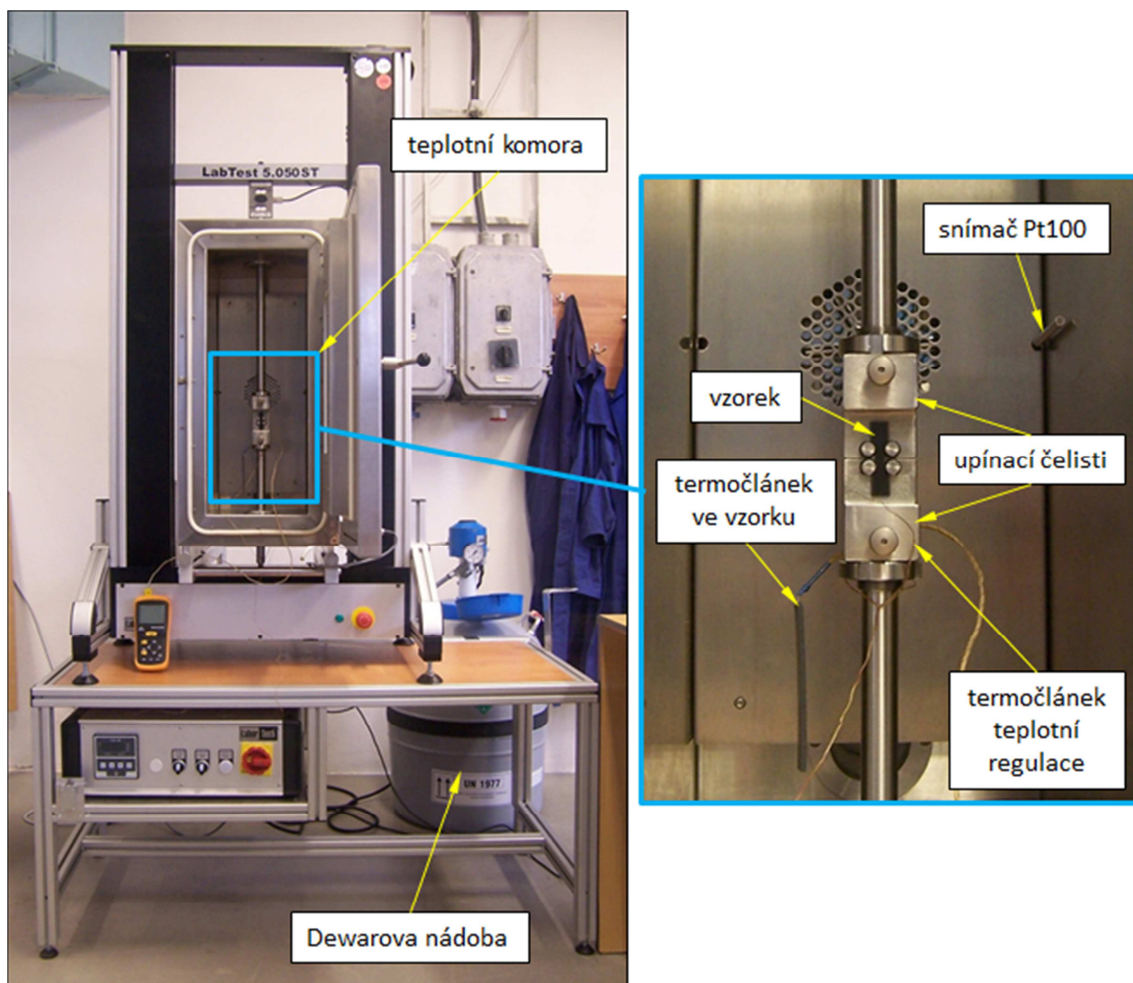
tab. 1: Rozsah zkoušek.

Veličina	Zatížení	Zkouška	Zařízení
Youngův / dynamický modul	kvazistatické	ohybová	LabTest 5.050ST
	dynamické	ohybová	DMA Q800
křivka (mez kluzu, porušení)	kvazistatické	tahová	LabTest 5.050ST
	dynamické	tahová	padostroj

## 5.1 Univerzální zkušební zařízení LabTest 5.050ST

Jedná se o standardní stolní provedení trhacího stroje s rozsahem použitelnosti do 5 kN zatížení. Součástí zařízení je také teplotní komora, která umožňuje provádět zkoušky v teplotním rozsahu od -70 do +250 °C. Snížených teplot (pod úroveň pokojové teploty) je dosahováno pomocí tekutého dusíku. Ta umožňuje měřit v rozsahu teplot od -70 do 250 °C, což spolehlivě pokrývá požadovaný rozsah. Teplotní komora je standardně (od výrobce) vybavena odporovým teplotním snímačem Pt 100, na základě kterého probíhá regulace teploty. Tento snímač měří teplotu prostředí (vzduchu) a je umístěn u boční stěny uvnitř komory (viz obr. 4). Tato koncepce byla změněna, a to

na základě negativních zkušeností zejména při zkouškách za snížených teplot. Odporový snímač Pt100 byl nahrazen termočlánkem typu K, jehož odezva na změnu teploty byla dostatečně rychlá. Tento termočlánek se umísťuje do blízkosti zkušební vzorku. Abychom měli jistotu, že vzorek se stihl dostatečně vytemperovat a jeho teplota tak odpovídá teplotě okolí, byl do komory umístěn ještě referenční vzorek. Do něj byl zasunut další termočlánek. Ten pak měřil teplotu uvnitř referenčního vzorku. Zkouška tak mohla započít až v okamžiku, kdy se údaje z obou termočlánků shodovaly. Rozmístění teplotních snímačů je na obr. 4.



obr. 4: Univerzální zkušební zařízení LabTest 5.050ST s teplotní komorou.

## 5.2 DMA Q800

Přístroj DMA Q800 od firmy TA Instruments (viz obr. 5) slouží k dynamicko-mechanické analýze (Dynamic Mechanical Analysis, zkr. DMA). Pomocí tohoto přístroje se měří dynamický modul v závislosti na teplotě a frekvenci zatěžování.

Součástí přístroje je integrovaná teplotní komora. Pro aplikaci zkoušek za snížených teplot je možné připojit Dewarovu nádobu s kapalným dusíkem.

Zařízení umožňuje realizovat zkoušky v tahu, tlaku, ohybu a smyku. Pro naše účely byly využity dva upínací přípravky pro ohybové a tahové namáhání.

Měření na DMA je možno provádět v různých provozních režimech, podle toho jaké závislosti a informace chceme získat. Pro účely našeho zkoumání využijeme tzv. multi-frekvenční režim, který slouží k vyhodnocení viskoelastických vlastností jako funkce frekvence při konstantní amplitudě. Měření probíhá při více frekvencích při pokojové teplotě.

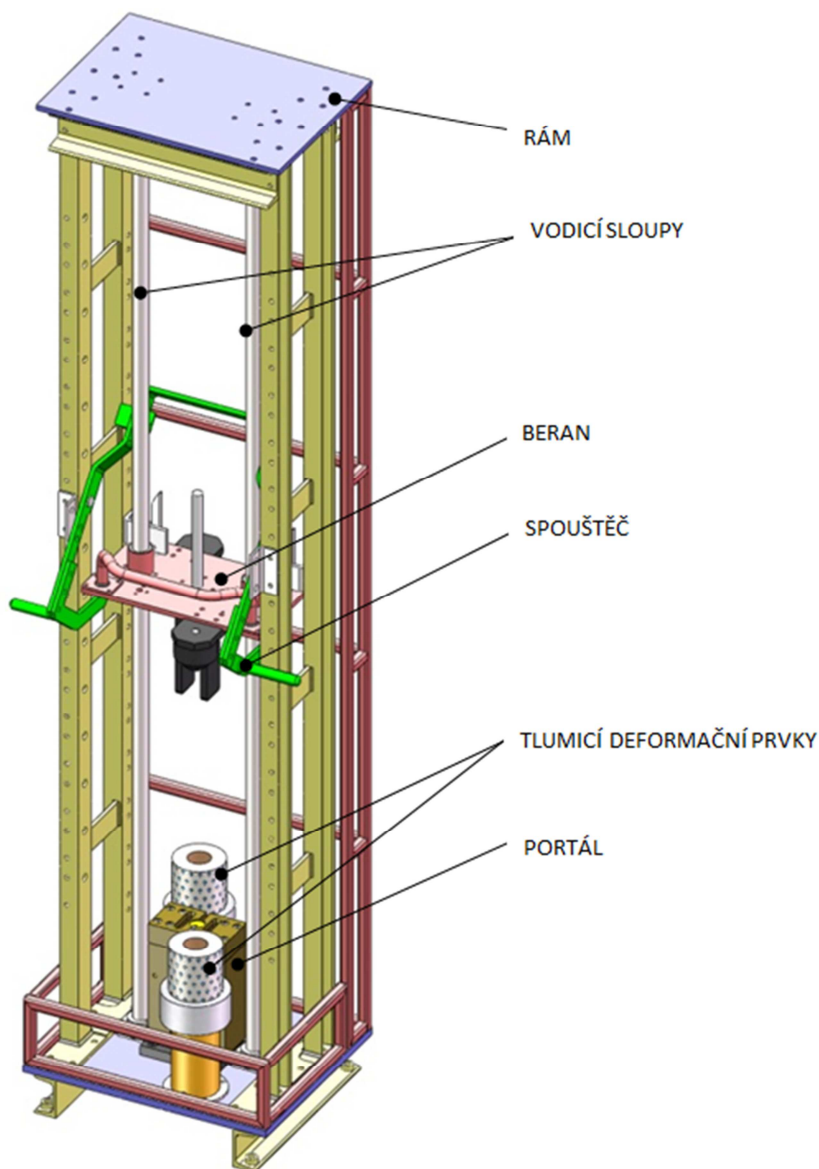


obr. 5: DMA Q800 od firmy TA Instruments.

### 5.3 Padostroj

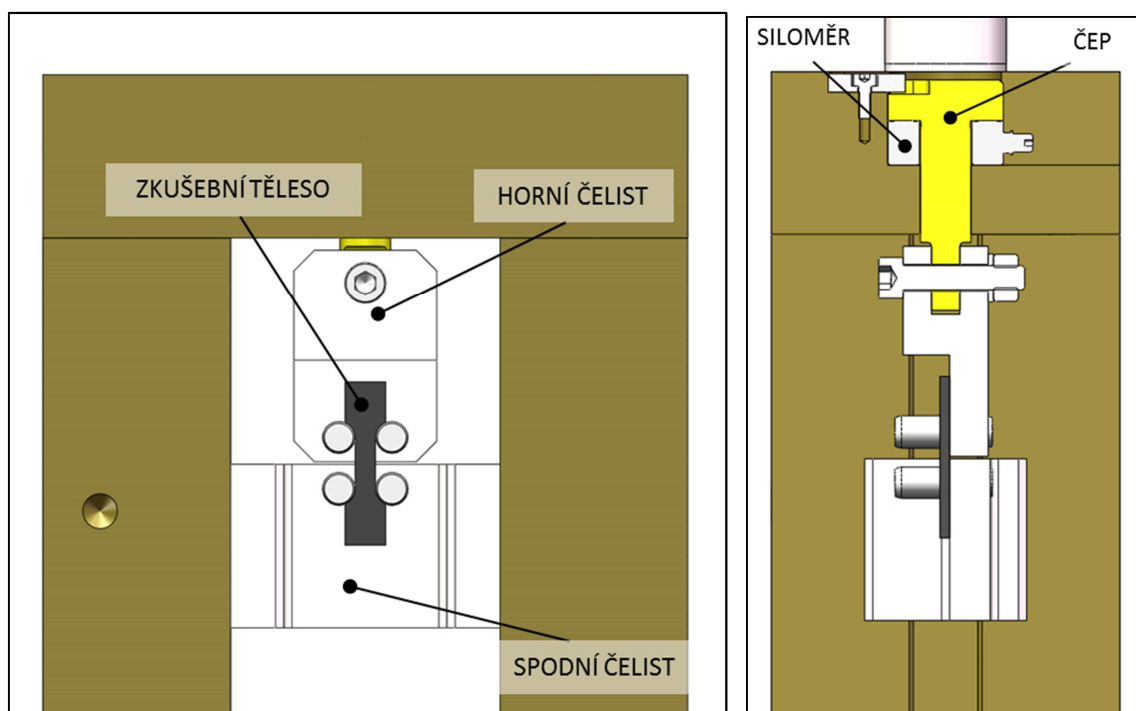
Pro účely stanovení tahových křivek při vyšších rychlostech deformace bylo navrženo speciální mechanické zkušební zařízení. Jedná se o tzv. padostroj, jenž umožňuje zkoušet polymerní materiály při jednoosém tahovém namáhání. Zde je nutné zmínit, že padostroj, resp. jeho konstrukční návrh a realizace byl jedním z dílčích cílů této práce, na němž se její autor podílel.

Princip činnosti padostroje spočívá ve využití kinetické energie padajícího beranu k tažení zkušební vzorku. Konstrukční uspořádání padostroje ukazuje obr. 6. Padostroj se skládá z ocelového rámu, jehož součástí jsou vodící sloupy. Po nich pojíždí beran, který je valivě uložený přes kuličková pouzdra.



obr. 6: Popis padostroje.

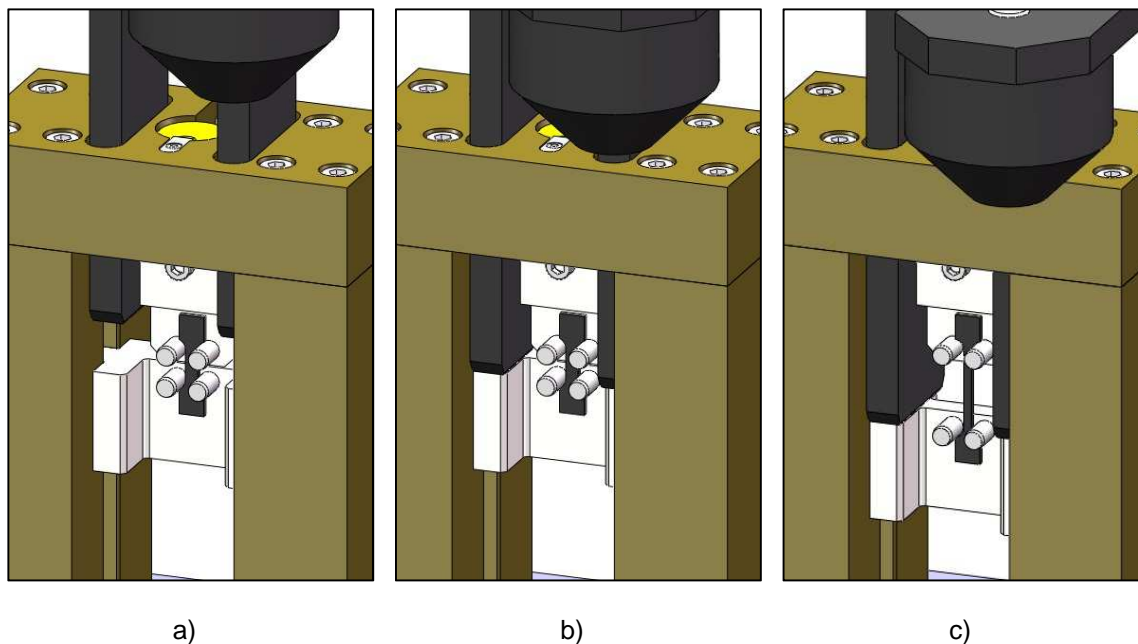
Zkušební vzorek se zakládá do speciálního upínacího přípravku, který se nachází v portálu padostroje a je vytvořen na míru zkoušeným tělesům. Upínací přípravek se skládá ze dvou dílů a vytváří obdobu horní a dolní čelisti, avšak s tvarovou vazbou. To znamená, že vzorek pouze visí na čepech čelistí v místě jeho rozšíření (viz obr. 7). Horní čelist je nepohyblivá ve směru působící síly a umožňuje pouze výkyvný pohyb. Zároveň je spojena přes čep s hlavou s portálem připojeným k rámu stroje. Pod hlavou tohoto čepu je umístěn piezoelektrický kapacitní snímač ozn. 9031A od firmy Kistler, který je vzhledem ke svému principu vhodný právě pro rázová namáhání.



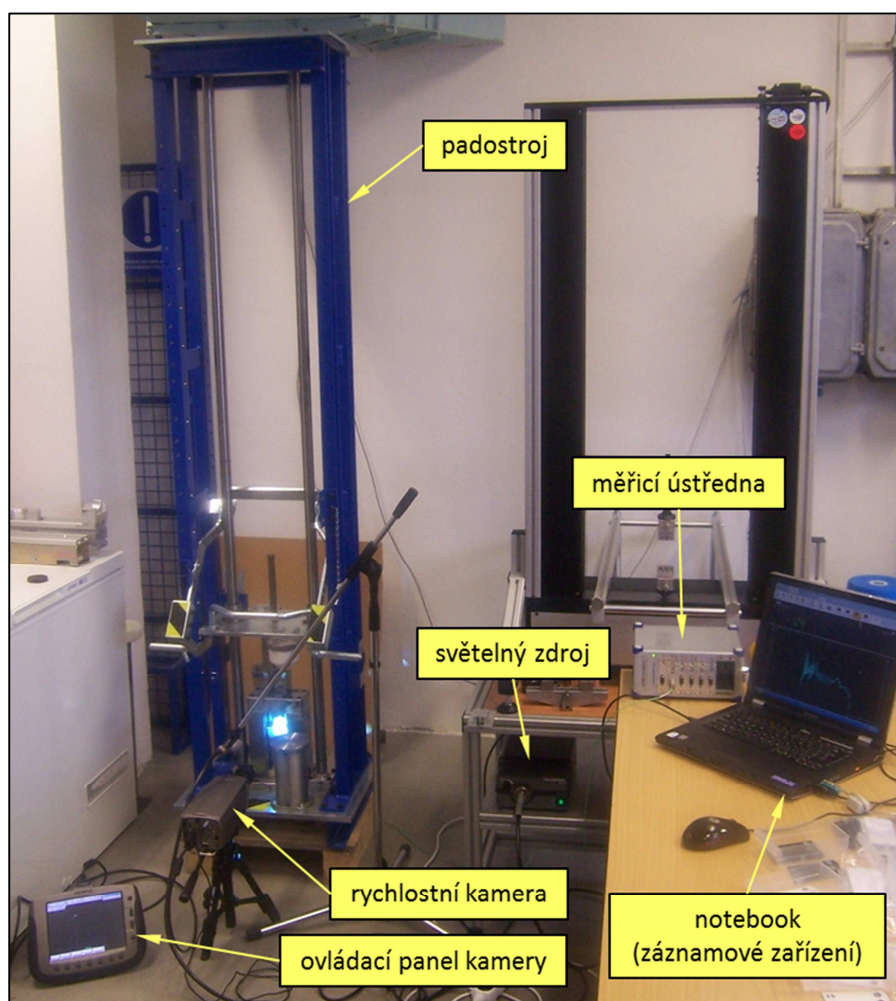
obr. 7: Upínací přípravek portálu padostroje (přední pohled – vlevo, boční řez portálem vpravo).

Kontaktní části beranu projedou skrz otvory v portálu (obr. 8 - a) a dopadají na krajní vodorovné plochy spodní čelisti (obr. 8 - b). Podobný princip byl použit i v [18], [19]. V okamžiku kontaktu beran začne unášet spodní čelist s upnutým vzorkem (obr. 8 - c), čímž dojde k tažení vzorku až do jeho přetržení. Když dojde k natahování zkušebního tělesa, síla působí přes zkušební vzorek na horní čelist a dále se síla přenáší na čep s hlavou. Při zatížení pak hlava čepu působí tlakovou silou na siloměrný snímač.

Rázová zkouška je doprovázena i videozáznamem z vysokorychlostní kamery OLYMPUS i-SPEED 2 se snímkovací frekvencí 5.000 fps. Reálné experimentální uspořádání je vidět na obr. 9.



obr. 8: Průnik beranu do portálu – a) stav před zatížením vzorku, b) okamžik dopadu funkčních částí beranu na plochu spodní čelisti, c) unášení spodní čelisti a průběh tažení.



obr. 9: Experimentální uspořádání rázových zkoušek v tahu.



## 5.4 Zkoušený materiál

Pro zkoušky je vybrán plast s obchodním názvem Sumika D320G02. Jedná se o směs PP/EPDM (polypropylén/etylén-propylén-dien) s 15 % talku (dle materiálového listu). Přidáním EPDM do PP se zvyšuje rázová odolnost (houževnatost) plastu [20]. Umožňuje využití materiálu v širším rozsahu provozních teplot, tedy i pod teplotu zesklenní samotného PP, kde materiál křehne. Materiál PP/EPDM se v automobilovém průmyslu často využívá při konstrukci nárazníků.

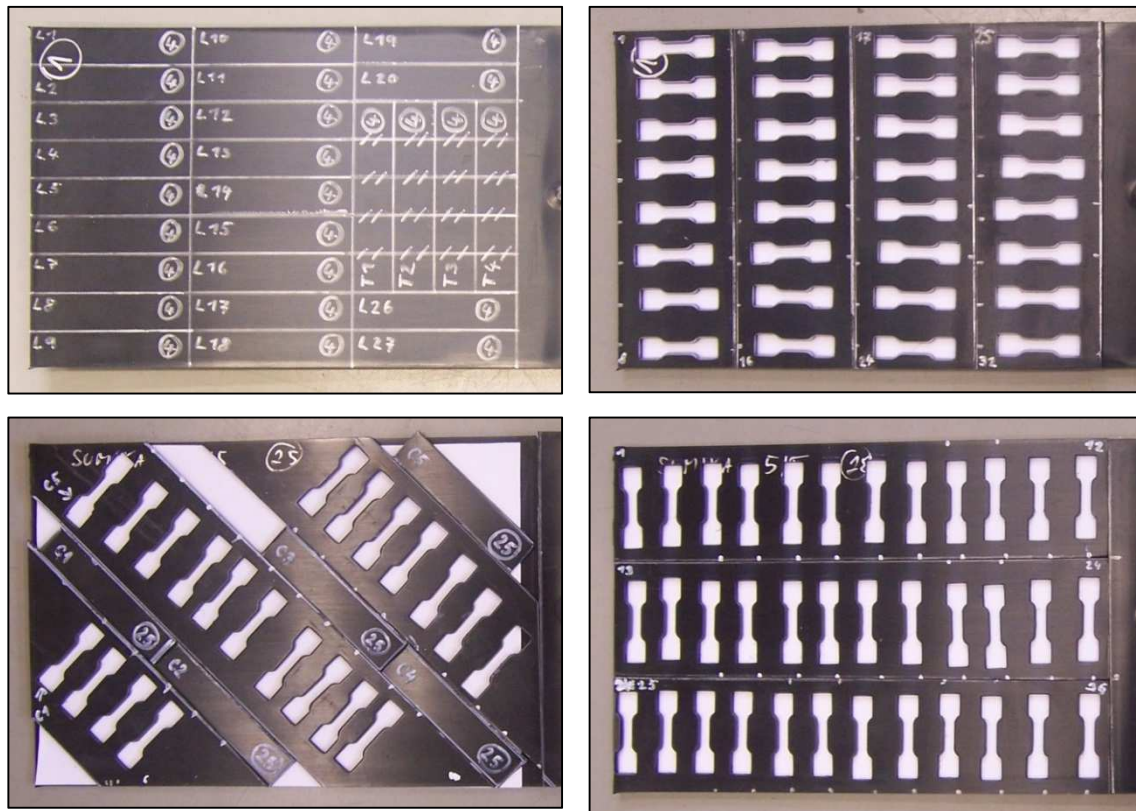
## 5.5 Zkušební tělesa

Aby bylo možné při testování polymerních materiálů zohlednit různé technologické vlivy, je nutné odebírat zkušební tělesa přímo z výrobků, jak je doloženo např. v [21], [22]. Výrobkem v tomto případě by mohl být vstříkovaný nárazník vozidla. Tato varianta má však své nevýhody. Tou je jednak ztížená dostupnost a nutnost vyčlenění vyrobených nárazníků pro testovací účely, což způsobuje finanční zátěž. Dále je odběr vzorků komplikován tvarem nárazníku, protože pro zkušební tělesa je potřeba, aby byly vytvořeny z rovných ploch. Tyto důvody vedly k náhradní variantě. Tou je výroba vstříkovaných zkušebních desek, kde jsou zachovány obdobné podmínky technologického procesu jako při vstříkování samotného nárazníku. Výrobu těchto desek, stejně jako výrobu nárazníků, zajišťuje firma Magna Exteriors & Interiors (Bohemia) s.r.o.

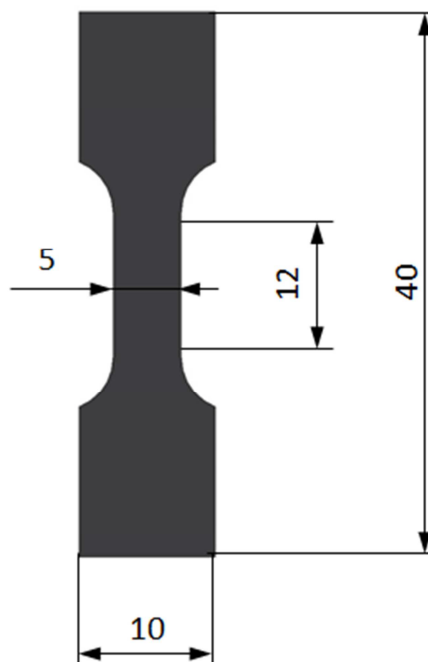
Z vystříknutých desek se vyhotovují dva typy zkušebních těles, a to pro tahovou a ohybovou zkoušku. Rozměry zkušebního tělesa pro tah ukazuje obr. 11. Tloušťka vzorků je dána tloušťkou desky. Tloušťka desky byla navržena tak, aby odpovídala tloušťce reálných nárazníků. Vzorky pro zkoušku v tahu jsou menších rozměrů ze dvou důvodů. Jedním je využití většího počtu vyhotovených vzorků z jednoho polotovaru (zkušební desky). Dalším důvodem je, že snížením měřené délky vzorku dosáhneme zvýšení rychlosti deformace. Rozměry vzorku pro ohybovou zkoušku jsou opět voleny vzhledem k velikosti polotovaru.

Vzorky pro tahovou zkoušku jsou z desky vystříhány pomocí ručního hydraulického lisu se střížným nástrojem. Ohybové vzorky se nastříhají na pákových nůžkách a následně se boční hrany vzorku ofrézují.

Pro ocenění vlivu anizotropie materiálu byly vzorky odebrány ve třech různých směrech, a to ve směru podélném, příčném a šikmém vůči plnění dutiny vstřikovací formy. Orientace jednotlivých vzorků je patrná z obr. 10.



obr. 10: Rozmístění ohybových a tahových zkušebních těles s různou orientací.



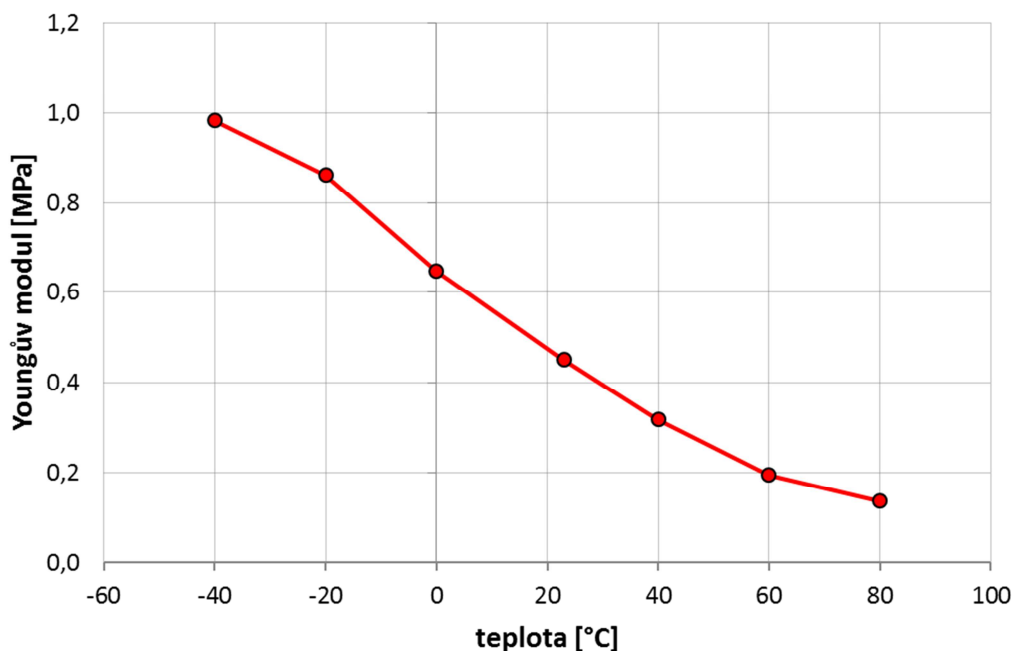
obr. 11: Rozměry zkušebního tělesa pro tah.

## 5.6 Stanovení modulů

### 5.6.1 Youngův modul

Youngův modul je určen na základě zkoušky tříbodovým ohybem na zařízení LabTest 5.050ST. Zkoušky jsou prováděny na sedmi teplotách, a to na -40, -20, 0, +23, +40, +60 a +80 °C. Rychlost zatížení je pro všechny měřené vzorky určena na 312 mm/min (= 5,2 mm/s). Ta je volena tak, aby rychlost deformace krajního vlákna (tedy vlákna s maximálním napětím) odpovídala rychlosti deformace při tahových zkouškách. Ta činí  $0,0167 \text{ s}^{-1}$ .

Průběh Youngova modulu v závislosti na teplotě stanovené ze zkoušky tříbodovým ohybem ukazuje obr. 12. Uvedené hodnoty jsou průměrem ze tří měření.



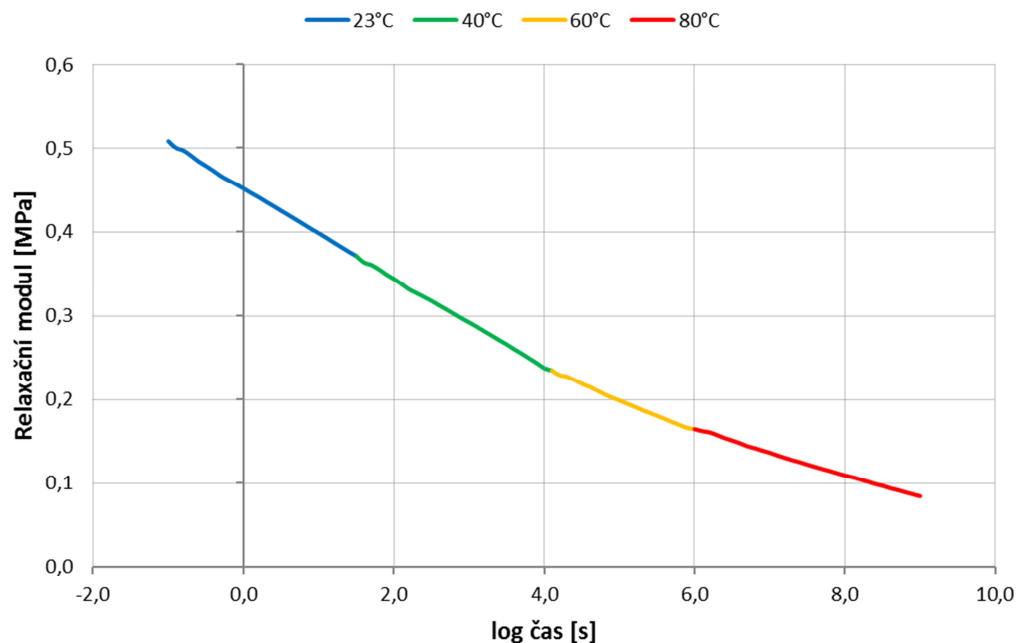
obr. 12: Závislost Youngova modulu na teplotě.

### 5.6.2 Relaxační modul

V našem případě jsme se rozhodli pro stanovení relaxačního modulu, tzn. pro zkoušku, kdy je vzorek zatížen deformací o stálé hodnotě během celého průběhu zkoušky a sleduje se pokles napětí v čase. K této zkoušce bylo využito univerzálního zkušebního zařízení LabTest 5.050ST, kde je vzorek zatěžován tahem.

Relaxační zkoušky se provádějí za účelem sestavení tzv. master-křivky. K tomu je zapotřebí změřit průběhy relaxačních modulů na více teplotách. Proto byly navrženy

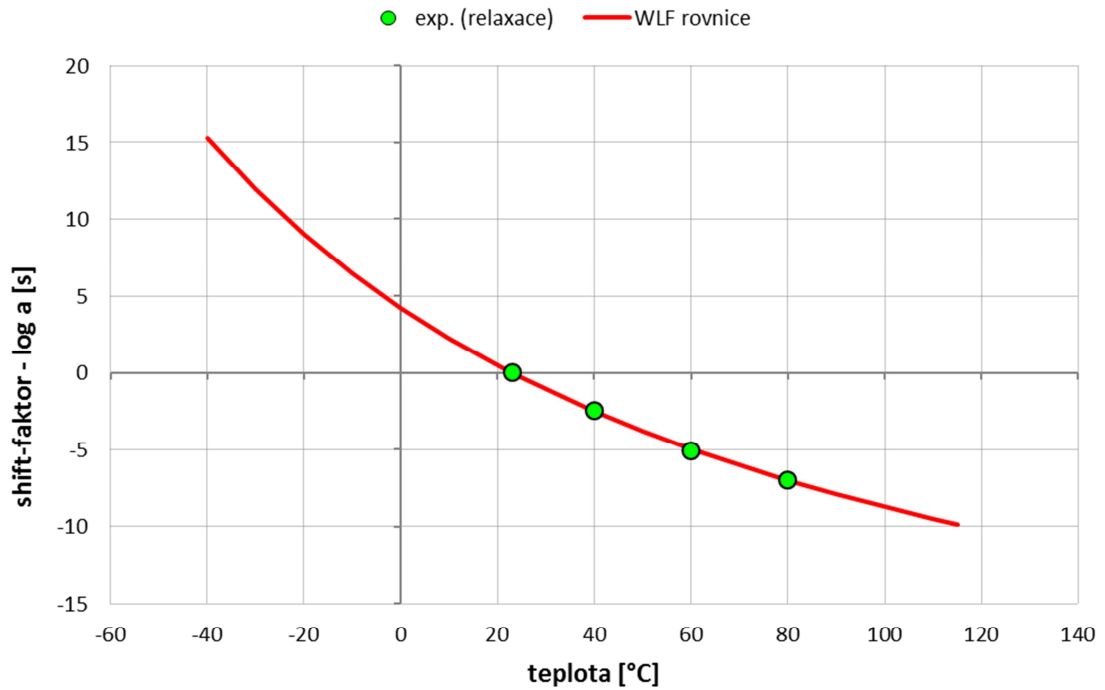
zkoušky na čtyřech teplotách (23, 40, 60 a 80 °C), kde každá zkouška trvá 1 hodinu. Výstupem relaxační zkoušky je časová závislost relaxačního modulu. Následně se z naměřených průběhů sestaví master-křivka (viz obr. 13).



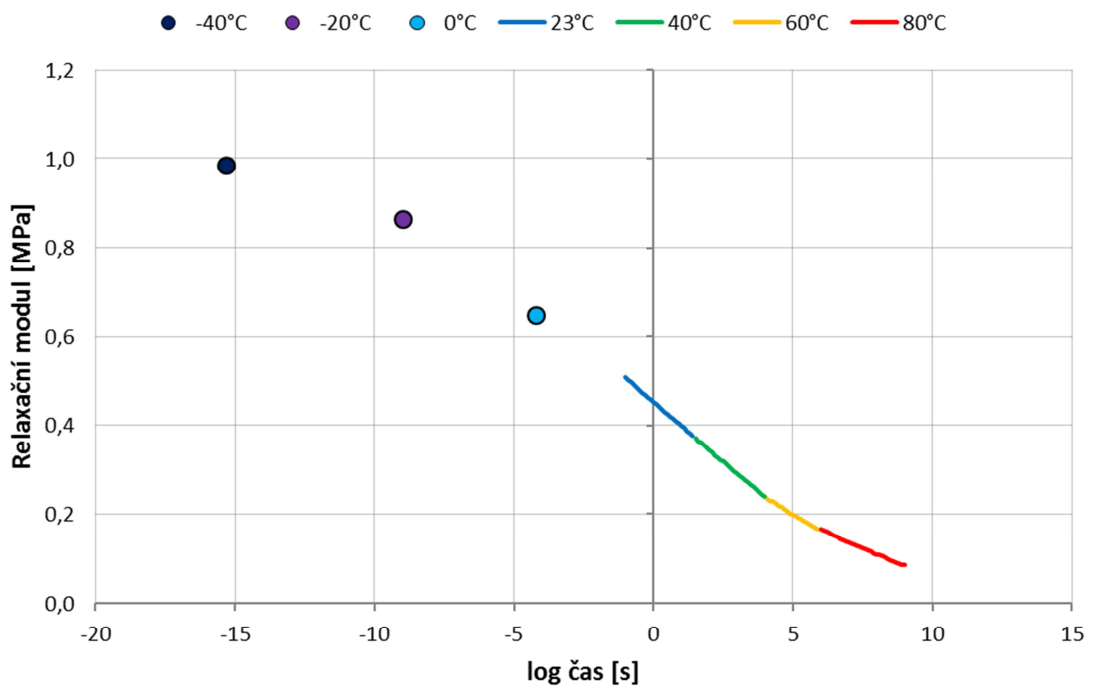
obr. 13: Sestavení master-křivky

Z naměřených průběhů relaxačního modulu na čtyřech teplotách a sestavením master-křivky získáme čtyři hodnoty shift-faktoru (viz zelené body na obr. 14). Dosazením těchto hodnot shift-faktoru a příslušných teplot do WLF rovnice (12) hledáme metodou nejmenších čtverců parametry  $C_1$  a  $C_2$  WLF rovnice, která popisuje závislost shift-faktoru na teplotě. Tato závislost je graficky znázorněna na obr. 14.

Relaxační chování pro všechny teploty popisuje pouze jedna jediná křivka (master-křivka), která se posunuje po časové ose dle shift-faktoru. Pro teploty nižší než je teplota referenční (v našem případě se jedná o pokojovou teplotu 23 °C) se master-křivka posunuje po ose  $x$  směrem doprava. Pro záporné teploty je zapotřebí znát i levou část křivky odpovídající velmi krátkým časům. K tomu nám poslouží znalost WLF rovnice a hodnoty Youngova modulu zjištěných při záporných teplotách. Pro známé hodnoty Youngova modulu na teplotách 0, -20, -40 °C vypočteme příslušné hodnoty shift-faktoru. Master-křivku pak doplníme o tyto tři hodnoty modulu posunuté od referenční křivky o příslušné hodnoty shift-faktorů (obr. 15). Rozšířenou master-křivku pro referenční teplotu 23 °C vidíme na obr. 15.



obr. 14: Závislost shift-faktoru na teplotě dle WLF rovnice.



obr. 15: Rozšíření master-křivky o body Youngova modulu ze statické zkoušky.

V konečně-prvkových softwarech je master-křivka popsána tzv. Pronyho řadou, dle vztahu (3) se třemi hledanými parametry -  $E_0$ ,  $E_i$ ,  $\tau_i$ . Parametr  $E_0$  je okamžitý modul, který odpovídá okamžiku bezprostředně po zatížení a odpovídá horní asymptotě

křivky. Hodnota  $E_0$  ovlivňuje počáteční tvar křivky, tedy oblast, pro kterou nemáme experimentální data. K odhadu hodnoty parametru  $E_0$  nám pomůže aproximace experimentálních dat křivkou příbuzného charakteru (jako master-křivka) popsanou rovnicí v obecném tvaru:

$$f(x) = \frac{a}{(1 + bc^{-x})}, \quad (7)$$

kde parametr  $a$  je asymptotou křivky a v tomto případě je tento parametr shodný s hodnotou  $E_0$ . Parametry  $b$  a  $c$  udávají tvar a polohu křivky.

Do rovnice (7) můžeme dosadit:

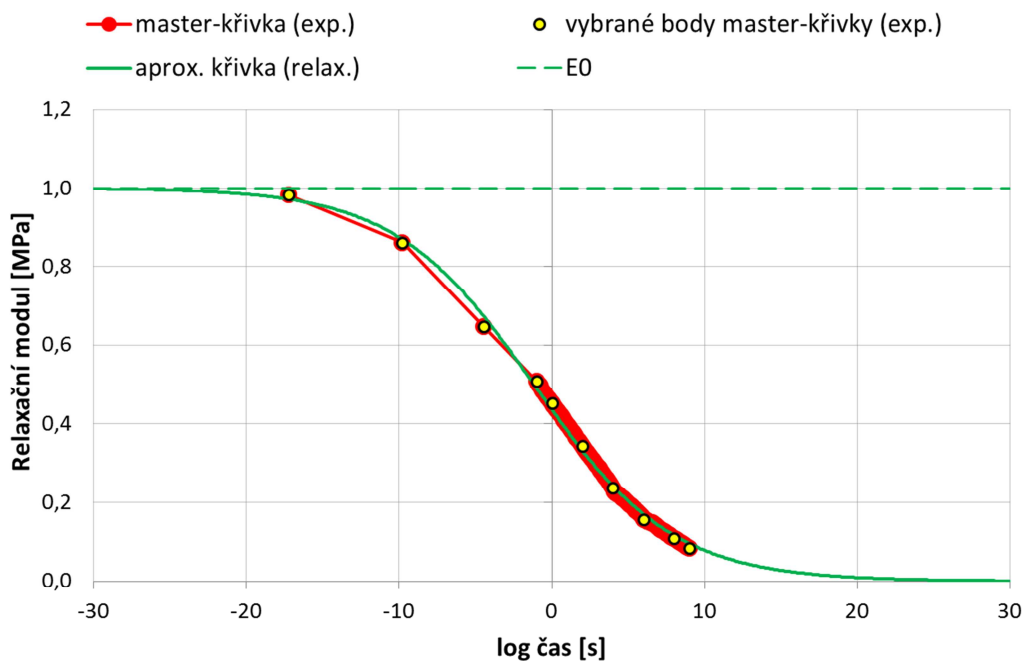
$$E(t) = \frac{E_0}{\left(1 + b_t c_t^{-(\log t)}\right)}, \quad (8)$$

kde nezávisle proměnnou tvoří čas  $t$ . Parametry  $b$  a  $c$  budou hledané hodnoty při aproximaci metodou nejmenších čtverců.

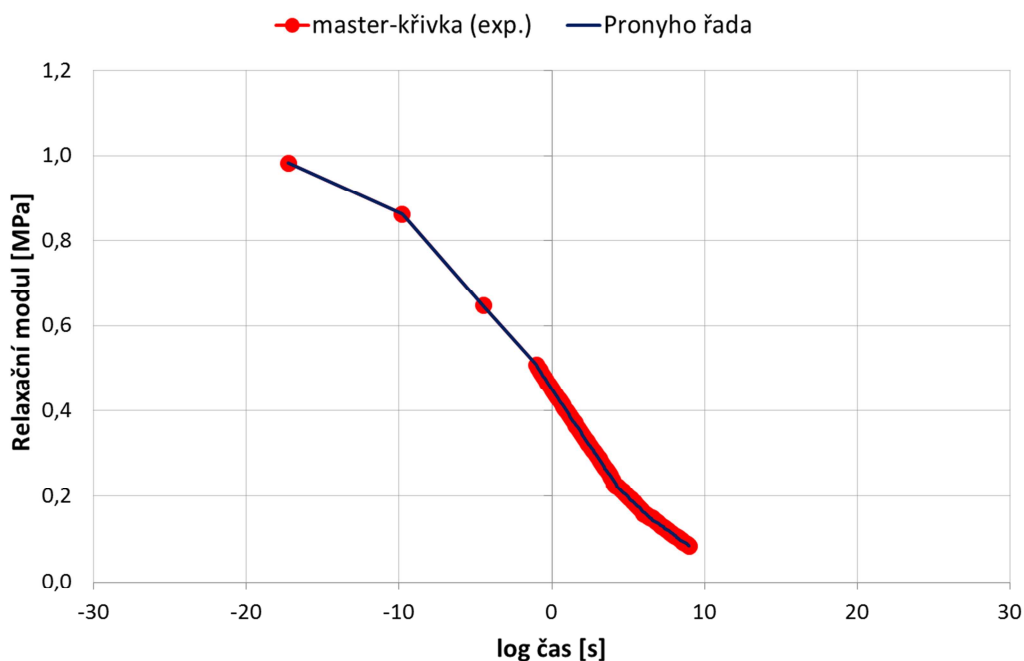
Než tuto aproximaci provedeme, tak naměřená data zredukujeme do několika bodů v rozsahu celé křivky. Důvodem tohoto kroku je malá hustota experimentálně zjištěných hodnot v horní části křivky. To by mělo za následek malý význam těchto hodnot při aproximaci metodou nejmenších čtverců. Je tedy žádoucí mít naměřený průběh popsany pouze několika poměrně rovnoměrně vzdálenými body. Tyto body (vyznačeny žlutě) a výsledek aproximace (zelená křivka) je patrný z obr. 16.

Tímto krokem jsme stanovili parametr  $E_0$ . Nyní přejdeme k aproximaci master-křivky Pronyho řadou, kde budeme hledat parametry  $E_i$ ,  $\tau_i$ . Výsledek této aproximace je vidět na obr. 17.

V této chvíli máme prostřednictvím Pronyho řady a WLF rovnice kompletně popsány relaxační či kríkové děje při různých teplotách.



obr. 16: Aproximace master-křivky.



obr. 17: Aproximace master-křivky Pronyho řadou.

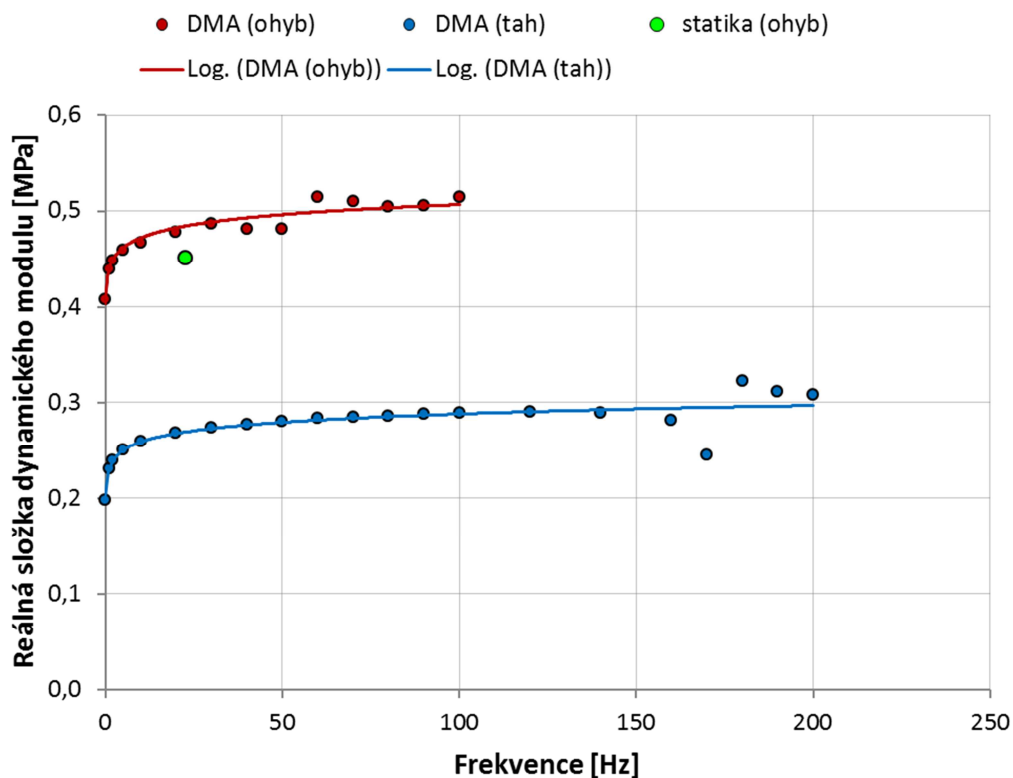
### 5.6.3 Reálná složka dynamického modulu

Výhodou zkoušky tříbodovým ohybem na DMA je podobné uspořádání jako u statické zkoušky tříbodovým ohybem. Díky příbuznému způsobu namáhání tak lze porovnávat hodnotu reálné složky dynamického modulu a Youngova modulu získaného

ze statické zkoušky. Mezi nevýhody měření v ohybu patří dosažení nižších rychlostí deformace a jeho nespolehlivost při vyšších frekvencích, kdy pravděpodobně dochází ke ztrátě kontaktu mezi vzorkem a zatěžovacím členem.

Naproti tomu výhodou tahového namáhání je dosažení vyšších rychlostí deformace (při stejných frekvencích) oproti ohybové zkoušce. Reálná složka dynamického modulu získaná z tahového namáhání nemusí odpovídat Youngovu modulu ze statické tahové zkoušky. Důvodem je rozdílné uspořádání zkoušky. Rozdíl spočívá v uchycení vzorku a odečítání deformace z posuvu čelistí.

Přestože tahová zkouška na DMA nemusí poskytovat z hlediska absolutních hodnot modulu přesné výsledky, dává nám zajímavý poznatek z hlediska vývoje těchto hodnot v závislosti na frekvenci zatěžování, resp. rychlosti deformace. Zmiňovaný vliv způsobu zatížení (resp. upínacích přípravků) na absolutní měřené hodnoty je patrný i v [23], což dokazují i naměřené průběhy (viz obr. 18).

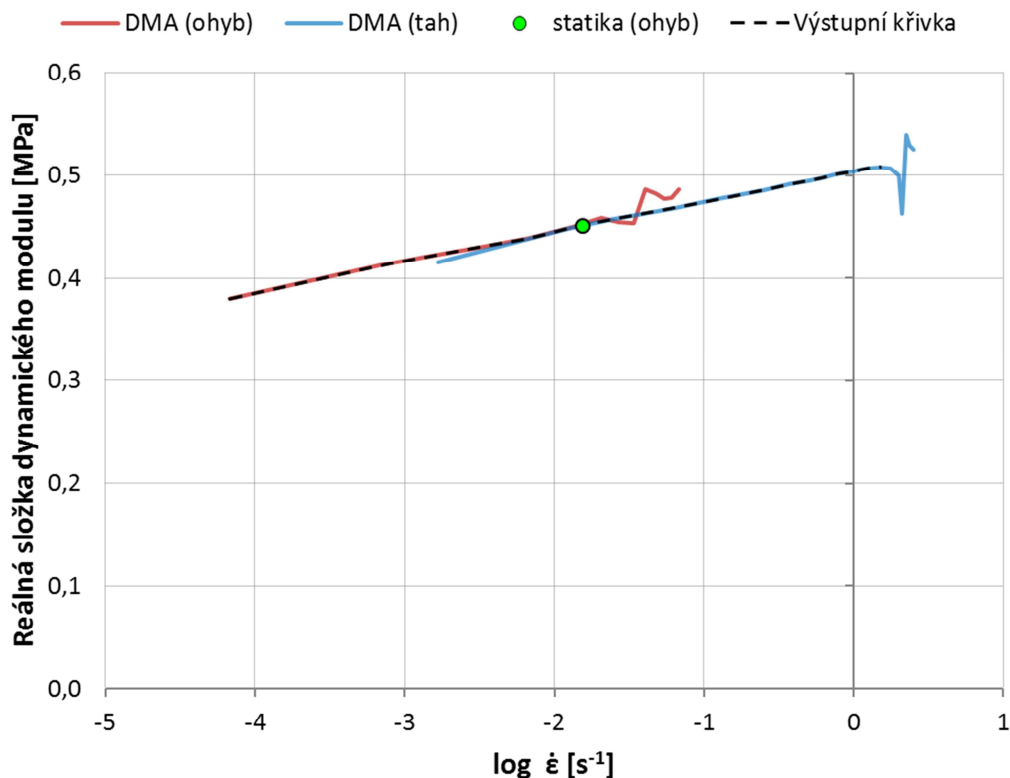


obr. 18: Frekvenční závislosti reálné složky dynamického modulu měřeného na DMA.

Frekvenci přepočteme na rychlost deformace a tu převedeme do logaritmické stupnice. Tím dostáváme pro zkoušený materiál a daný rychlostní rozsah průběhy prakticky lineárního charakteru, jak bylo uvedeno např. i v [21], [24]. Z grafu je vidět,



že průběh zjištěný ohybovou zkouškou má prakticky stejnou směrnici jako průběh z tahové zkoušky. Ohybovou zkouškou lze stanovit průběh reálných hodnot modulu, ale pouze pro nižší hodnoty rozsahu rychlosti deformace. Zatímco tahová zkouška je z hlediska absolutních hodnot zatížena metodickou chybou, lze ji však využít jako ukazatel trendu hodnot, a to pro řádově vyšší rychlosti deformace než u zkoušky ohybové. Pro další práci je nutné naměřená data sjednotit, a to využitím znalosti statistické hodnoty Youngova modulu zjištěné statickou ohybovou zkouškou a obou trendů hodnot stanovených z DMA. Posuneme průběh tahové i ohybové křivky z DMA po ose y tak, aby protínal staticky změřenou hodnotu modulu (zelený bod). Oba průběhy pak na sebe vzájemně plynule navazují a tím získáme prodloužený průběh reálných hodnot modulu, jak ukazuje obr. 19. Vypustíme-li koncové části obou křivek, kde se při vysokých frekvencích vyskytuje rozkolísání hodnot vlivem větší chyby měření, získáme tak jednu výstupní křivku (viz obr. 19).



obr. 19: Sloučení křivek z DMA.

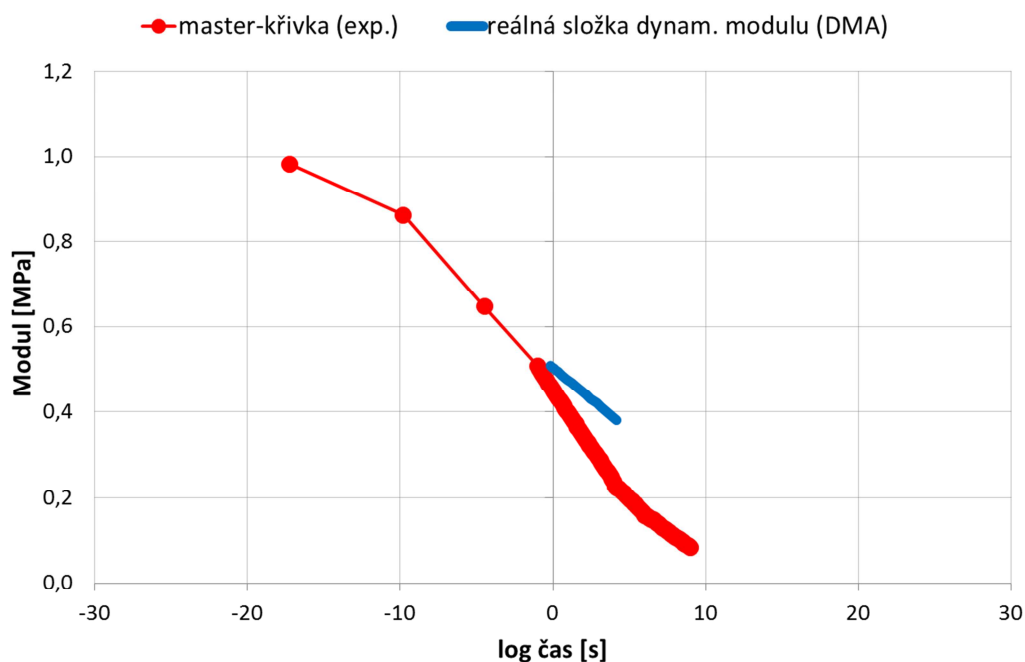
#### 5.6.4 Vztah relaxačního a dynamického modulu

Doposud jsme získali časovou závislost modulu, a to v dostatečně velkém rozpětí. Avšak rychlostní závislost modulu, stanovená z DMA, nepokrývá požadovaný rozsah

rychlostí deformace. Zejména nám chybí hodnoty při vyšších rychlostech deformace v řádech  $10^1$  až  $10^2 \text{ s}^{-1}$ .

Experimentální stanovení Youngova modulu při vyšších rychlostech je relativně náročné z hlediska metodiky i experimentálního vybavení. Proto byl vypracován způsob určení rychlostní závislosti Youngova modulu odvozením z jeho časového průběhu. Abychom mohli s oběma průběhy vzájemně pracovat, nejprve sjednotíme rozměry obou nezávisle proměnných (čas, rychlost deformace), a to tím, že z rychlosti deformace vytvoříme převrácenou hodnotu. Rozměr převrácené hodnoty rychlosti deformace je tudíž v sekundách stejně jako rozměr času. Reálnou složku dynamického modulu stanovenou z DMA, vyjádřenou v závislosti na převrácené hodnotě rychlosti deformace, vyneseme do grafu s master-křivkou (z obr. 15). Oba průběhy jsou vidět na obr. 20.

Z grafu (obr. 20) je patrné, že modul v závislosti na čase a na rychlosti deformace má jiný trend, avšak celkový charakter obou křivek bude podobný, jak se uvádí v [3], [25].



obr. 20: Vztah relaxačního modulu a reálné složky dynamického modulu.

Abychom našli vzájemný vztah obou průběhů, budeme je aproximovat stejnou rovnicí (7) pouze s rozdílnými hodnotami parametrů  $b$ ,  $c$ . Vztah pro časovou závislost modulu byl již vyjádřen vztahem (8). Funkci modulu v závislosti na rychlosti deformace lze zapsat takto:

$$E(\dot{\varepsilon}) = \frac{E_0}{\left(1 + b_{\dot{\varepsilon}} c_{\dot{\varepsilon}}^{(\log \dot{\varepsilon})}\right)}, \quad (9)$$

Grafické znázornění časové a rychlostní závislosti modulu pro teplotu 23 °C je na obr. 21.

Tvar funkce modulu závislého na čase se pro jiné teploty nemění, pouze se celá křivka posouvá po časové ose v závislosti na teplotě. Tuto závislost popisuje WLF rovnice (12). Stejným způsobem stanovíme i teplotní závislost funkce modulu závislého na rychlosti deformace. K tomu nám poslouží znalost sedmi naměřených hodnot Youngova modulu na různých teplotách (zelené body v grafu na obr. 22). Tyto hodnoty odpovídají jedné rychlosti deformace (0,017 s<sup>-1</sup>), která je pro nás zároveň referenční hodnotou. Určíme logaritmické převrácené hodnoty rychlosti deformace, které odpovídají hodnotám modulu na křivce. Tyto hodnoty lze matematicky vyjádřit ze vztahu (9):

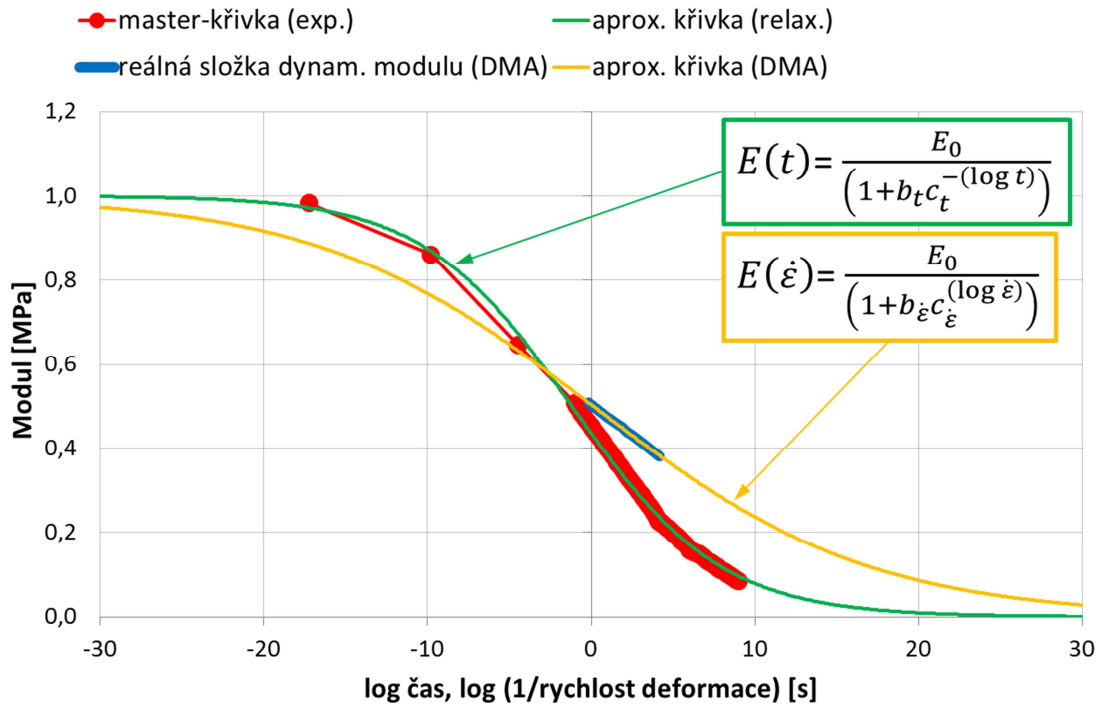
$$\log(\dot{\varepsilon}^{-1})_T = -\frac{\ln \left[ \left( \frac{E_0}{E_T} - 1 \right) \frac{1}{b_{\dot{\varepsilon}}} \right]}{\ln c_{\dot{\varepsilon}}}, \quad (10)$$

kde  $E_T$  vyjadřuje hodnotu Youngova modulu ze statické zkoušky (tedy pro referenční rychlost deformace 0,017 s<sup>-1</sup>) na příslušné teplotě, kterou označuje index  $T$ . V našem případě se jedná o teplotu -40, -20, 0, +23, +40, +60 či +80 °C.

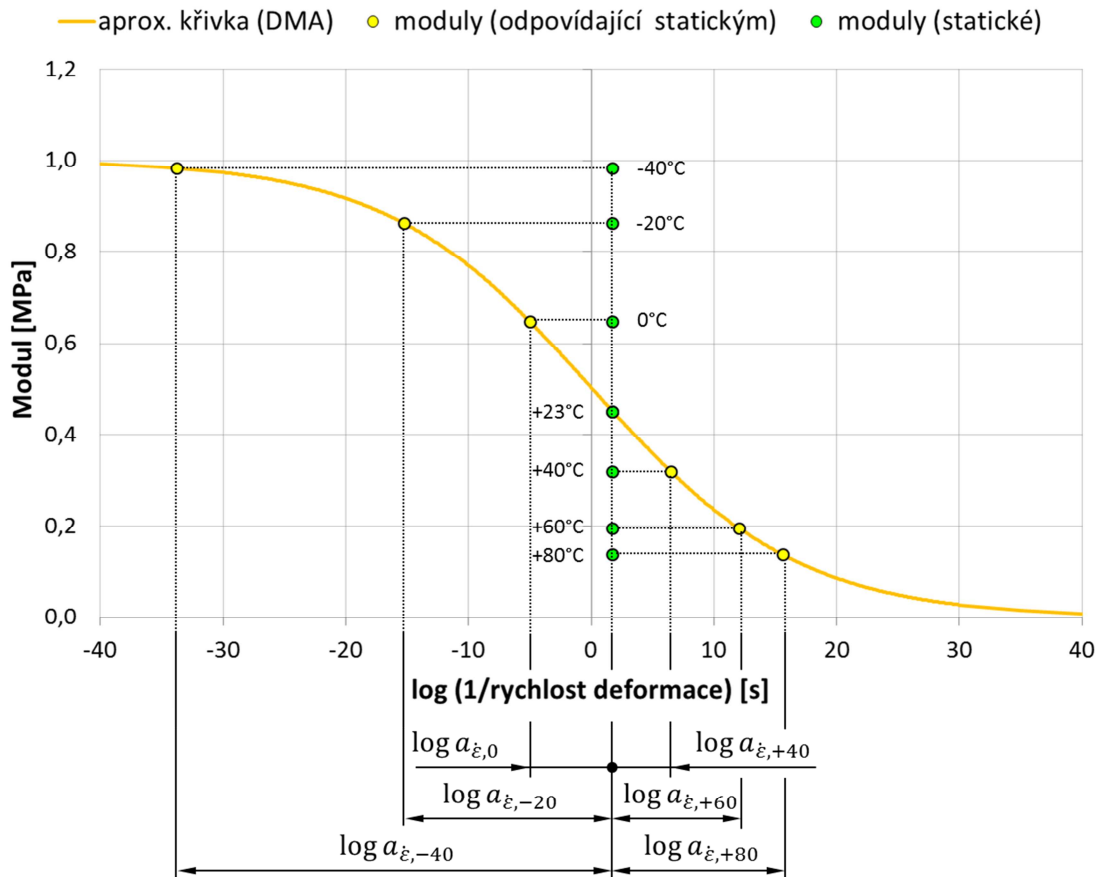
Nyní lze určit hodnoty shift-faktoru rychlosti deformace  $\log a_{\dot{\varepsilon},T}$  pro dané teploty  $T$ :

$$\log a_{\dot{\varepsilon},T} = \log(\dot{\varepsilon}^{-1})_T - \log(\dot{\varepsilon}^{-1})_{ref}, \quad (11)$$

kde  $\log(\dot{\varepsilon}^{-1})_{ref}$  je referenční logaritmická převrácená hodnota rychlosti deformace. Princip stanovení hodnot shift-faktoru rychlosti deformace  $\log a_{\dot{\varepsilon},T}$  je také patrný z obr. 22.



obr. 21: Aproximační křivky funkcí obou modulů.



obr. 22: Znázornění odečtu hodnot shift-faktoru rychlosti deformace.

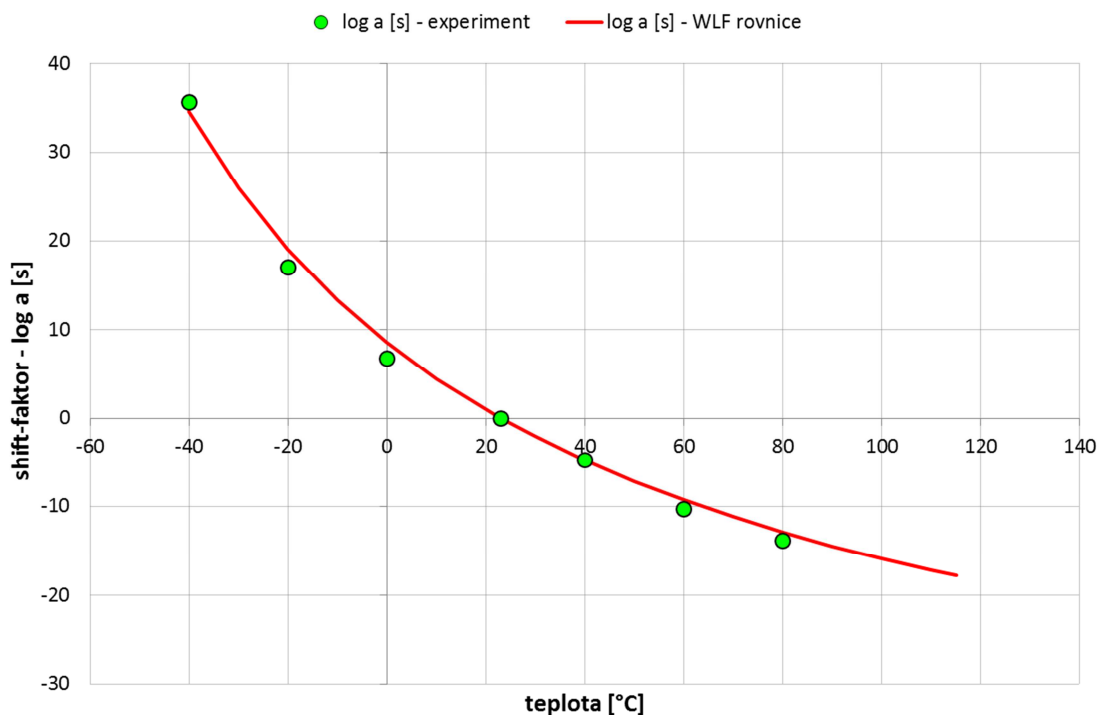
Teplotní závislost shift-faktoru rychlosti deformace můžeme popsat analogicky jako pro určení shift-faktoru času WLF vztahem:

$$\log a_{\dot{\varepsilon}} = -\frac{C_{1,\dot{\varepsilon}}(T - T_{ref})}{C_{2,\dot{\varepsilon}} + (T - T_{ref})} \quad (12)$$

kde  $C_{1,\dot{\varepsilon}}$  a  $C_{2,\dot{\varepsilon}}$  jsou parametry rovnice,  $T_{ref}$  je konstanta a určuje zvolenou referenční teplotu,  $T$  je teplota (nezávisle proměnná), pro kterou hledáme hodnotu shift-faktoru.

Hodnoty parametrů  $C_{1,\dot{\varepsilon}}$  a  $C_{2,\dot{\varepsilon}}$  určíme metodou nejmenších čtverců. Porovnání hodnot shift-faktorů a aproximační křivky dle adaptovaného WLF vztahu (12) je vidět na obr. 23.

Díky výše uvedeným závislostem dle (9) a (12) jsme již schopni určit hodnotu Youngova modulu prakticky pro libovolnou rychlost deformace a teplotu. Této znalosti bude posléze využito při tvorbě konečně-prvkového materiálového modelu zejména při rázových zkouškách za snížených či zvýšených teplot.



obr. 23: Porovnání hodnot shift-faktorů rychlosti deformace a aproximační křivky dle WLF vztahu adaptovaného pro rychlost deformace.

## 5.7 Viskoelastické chování ve vztahu k elastoplastickému modelu

Pro popis materiálu slouží především závislost napětí na přetvoření zjištěná z tahové zkoušky. Získaná naměřená tahová křivka se dále zrekonstruuje pro účely numerických simulací. Rekonstrukci těchto naměřených křivek je třeba provádět s ohledem na použitý materiálový model. Jeho volba závisí mimo jiné na dané úloze. Tím je myšlen například charakter namáhání či hodnotící kritéria zkoušky. Při zkouškách automobilových nárazníků bývá jedním z důležitých kritérií zbytková deformace po provedení zkoušky.

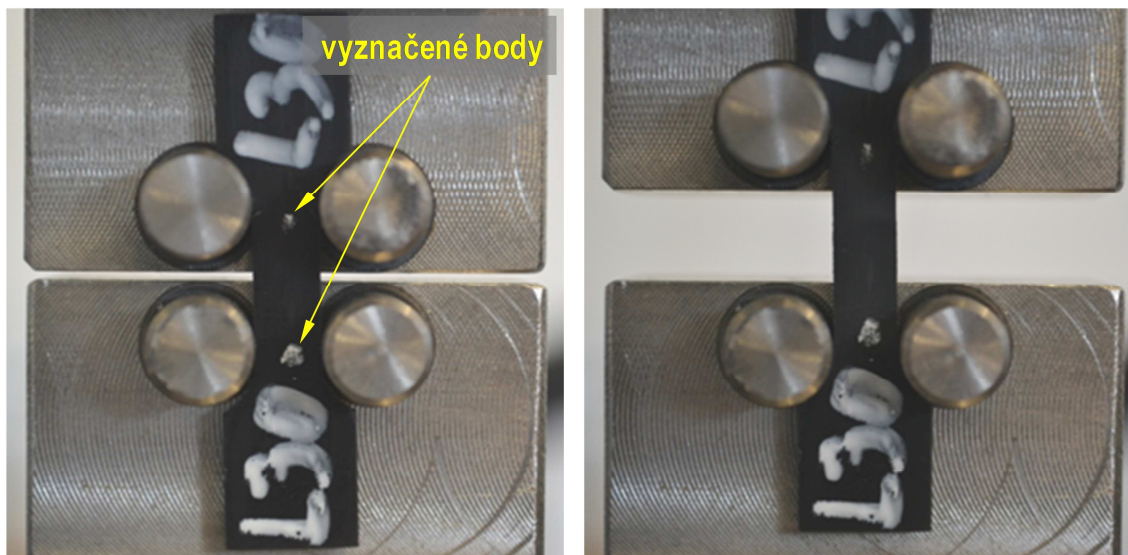
V praxi se velmi často setkáváme s využíváním elastoplastických modelů pro modelování viskoelastických materiálů.

Vyvstává zde otázka, kde na tahové křivce je mez, kdy materiál po odlehčení nevykazuje trvalou deformaci. Vzhledem k tomu, že zbytková deformace je funkcí času, je zapotřebí si ještě definovat časový úsek, po kterém budeme zbytkovou deformaci sledovat. Toto lze vyšetřit experimentální cestou.

### 5.7.1 Stanovení zbytkové deformace

Zkouška pro stanovení zbytkové deformace při tahu je prováděna na zkušebním zařízení LabTest 5.050ST. To znamená na stejném stroji jako tahové zkoušky a se stejnými čelistmi. Deformace vzorku byla vyhodnocena optickým měřením prostřednictvím obrazu pořízeného fotoaparátem Nikon D3100 s rozlišením 15 Mpx (4.608 x 3.072 pixelů).

Zkoušky probíhají při pokojové teplotě. Snímána je síla. Pro měření deformace byly zkušební vzorky černé barvy opatřeny bílými body zhruba ve vzájemné vzdálenosti 10 mm (viz obr. 24 – vlevo: stav před zatížením, vpravo: stav po zatížení). Měří se poloha (pořadové číslo) charakteristického pixelu v ose  $y$  u obou vyznačených bodů. Přepočet (kalibrace) pixelů na milimetry se provádí přes převodní konstantu [pix/mm], která se stanoví změřením počtu pixelů v dané ose pro nějaký charakteristický rozměr (v tomto případě šířka čelisti = 40 mm). 1 pixel tak odpovídá zhruba 0,01 mm.



obr. 24: Namáhání zkušební vzorku – před zatížením (vlevo), po zatížení (vpravo).

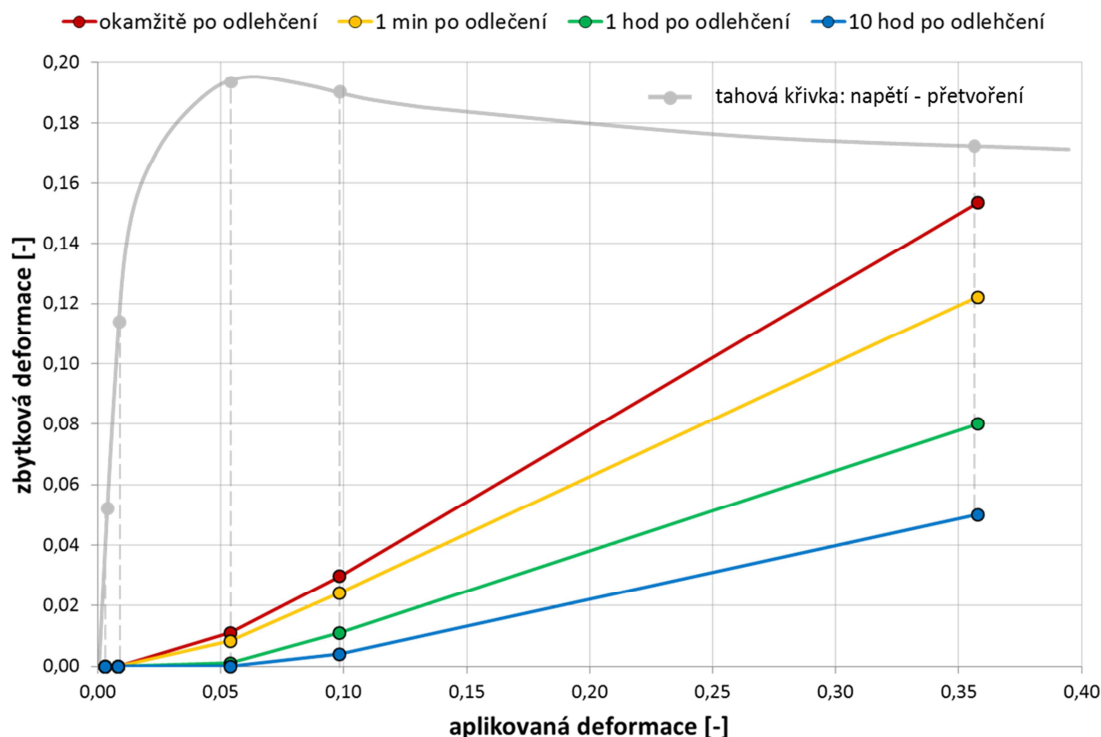
Režim zkoušky je následující. Zkouška má čtyři fáze:

1. stav před zatížením – pořízení snímku,
2. zatížení na požadovanou úroveň (rychlost zatížení je 5,2 mm/min jako při tahové zkoušce) – pořízení snímku,
3. odlehčení na nulovou hodnotu napětí – pořízení snímku,
4. časová prodleva – snímky pořízeny v čase 1 min, 1 hod a 10 hod po odlehčení (pro sledování zpožděně elastické deformace).

V každé fázi je pořízen jeden snímek.

Bylo realizováno pět takovýchto zkoušek, pokaždé s jinou úrovní napětí či deformace. Pro malé deformace (do meze kluzu) byly stanoveny tři úrovně napětí (v 1/3, a ve 2/3 meze kluzu a těsně před mezí kluzu). Pro větší deformace byly zvoleny dvě úrovně přetvoření, a to 10 a 35 %. Na každou zkoušku byl užit nový zkušební vzorek.

Z výsledků realizovaných měření plyne, že při zatížení do úrovně 2/3 meze kluzu materiál nevykazuje v bezprostředním okamžiku po odlehčení žádnou zbytkovou deformaci. Avšak na úrovni těsně před mezí kluzu je po odlehčení mírná deformace již patrná a vymizí až po čase v řádu několika hodin od okamžiku odebrání zatížení. Při zatížení v oblasti za mezí kluzu deformace podle předpokladu zůstává i po dlouhé době po odlehčení, přestože se s časem výrazně snižuje. Tyto výsledky jsou graficky znázorněny na obr. 25.

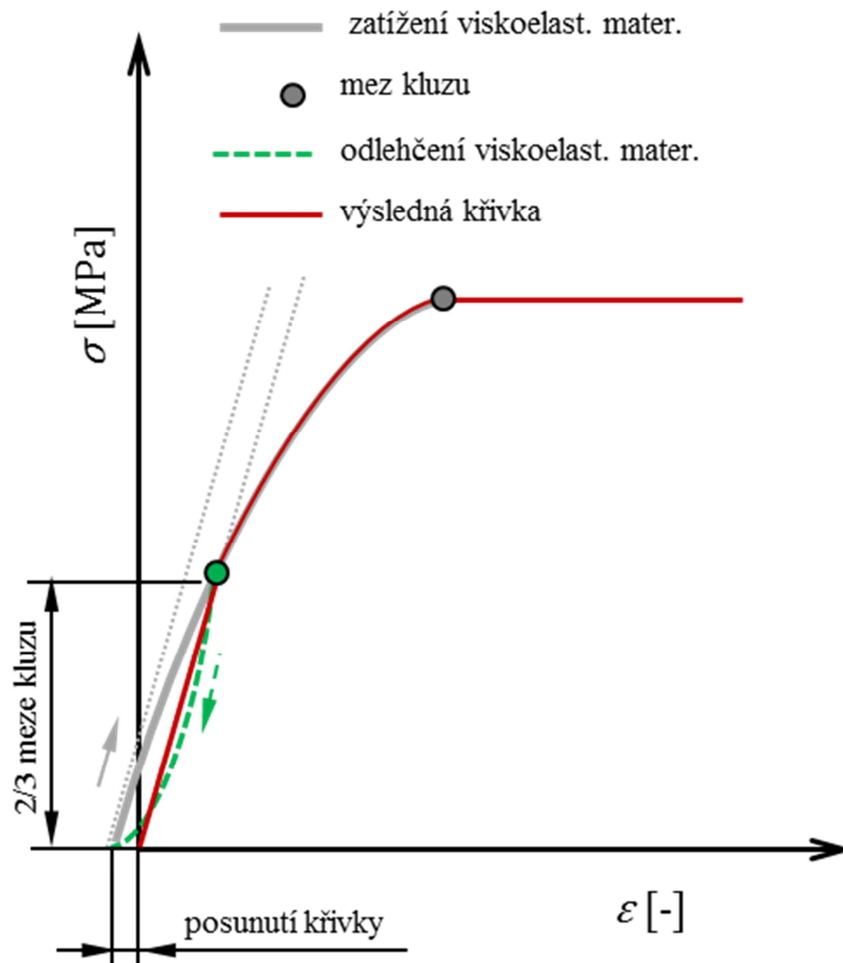


obr. 25: Zbytková deformace v závislosti na aplikované deformaci a na čase.

Na základě výše zjištěných informací, můžeme upravit tahovou křivku pro účely elastoplastického modelu posunutím křivky po ose  $x$  doleva tak, aby průsečík směrnice vycházející z počátku protínal tahovou křivku na úrovni napětí ve  $2/3$  meze kluzu (viz obr. 26). To znamená, že vyvolaná deformace odpovídající hodnotě napětí menší než  $2/3$  meze kluzu, nevyvolá žádnou zbytkovou deformaci. Pokud bychom (podle takto upravené tahové křivky) působením zatížení způsobili deformaci v blízkosti pod mezi kluzu, pak elastoplastický model po odlehčení materiálu vykáže trvalou deformaci. V reálu tomu tak není, jak ukazují naměřené výsledky. U viskoelastického materiálu takováto deformace časem (řádově hodiny) vymizí.

Z výše uvedených důvodů je nutné obezřetně interpretovat výsledky numerických simulací s použitým elastoplastickým modelem na viskoelastický materiál.





obr. 26: Úprava tahové křivky pro účely elastoplastického modelu.

## 5.8 Tahové křivky

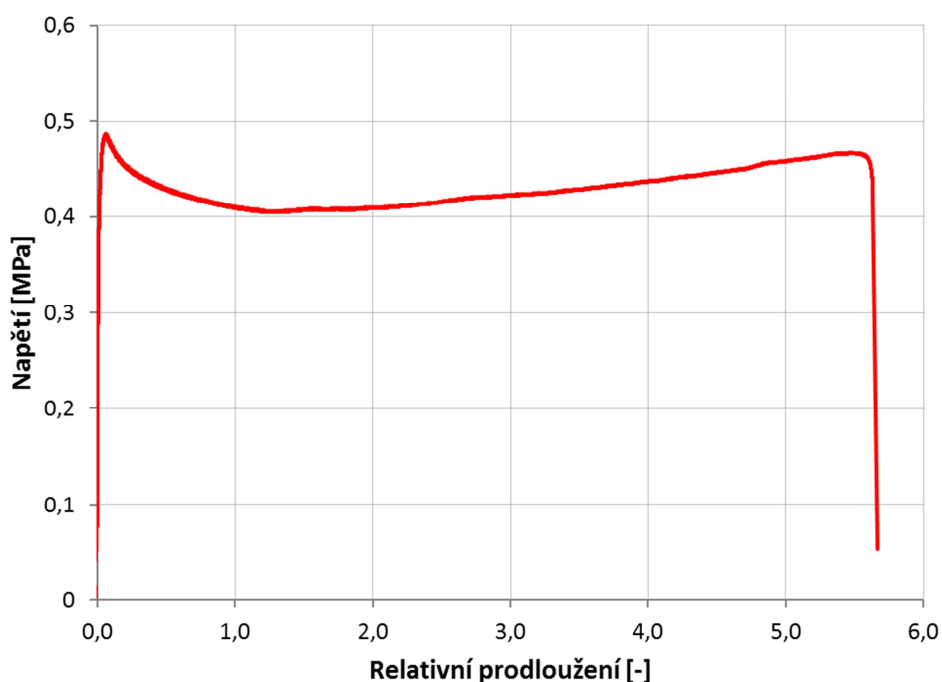
Mechanické vlastnosti materiálu popisuje zejména tahová křivka vyjadřující závislost napětí na deformaci. K tomuto účelu se provádějí tahové zkoušky. Abychom získali mechanické vlastnosti v závislosti na teplotě a na rychlosti deformace, byly zkoušky prováděny při různých teplotách v rozsahu od  $-40$  do  $+80$  °C a různou rychlostí deformace řádově od  $10^{-2}$  do  $10^2$  s $^{-1}$ .

### 5.8.1 Statická zkouška v tahu

Statické zkoušky v tahu probíhají na univerzálním zkušebním zařízení LabTest 5.050ST a slouží zejména k určení meze kluzu a tažnosti materiálu. Zde jsou realizovány zkoušky za různých teplot při dvou rychlostech deformace, a to  $0,0167$  a  $2,1$  s $^{-1}$ . První rychlost deformace je volena dle normy pro zkoušení plastů a odpovídá rychlosti zatížení  $5,2$  mm/min. Druhá rychlost deformace je dána maximální rychlostí

posuvu příčnicku stroje, která činí 25 mm/s. Tahové zkoušky se realizují bez použití průtahoměru. Snímána je síla a posuv čelistí. Vzdálenost čelistí je 12 mm. Při všech zkouškách byl použit speciální typ čelistí (viz obr. 4).

Na obr. 27 je vykreslen naměřený pracovní tahový diagram. Napětí je zde vypočteno z měřené síly a původního průřezu zkušební tělesa. Relativní prodloužení je stanoveno z posuvu čelistí. Zelené body na křivce znázorňují mez kluzu a okamžik porušení vzorku.



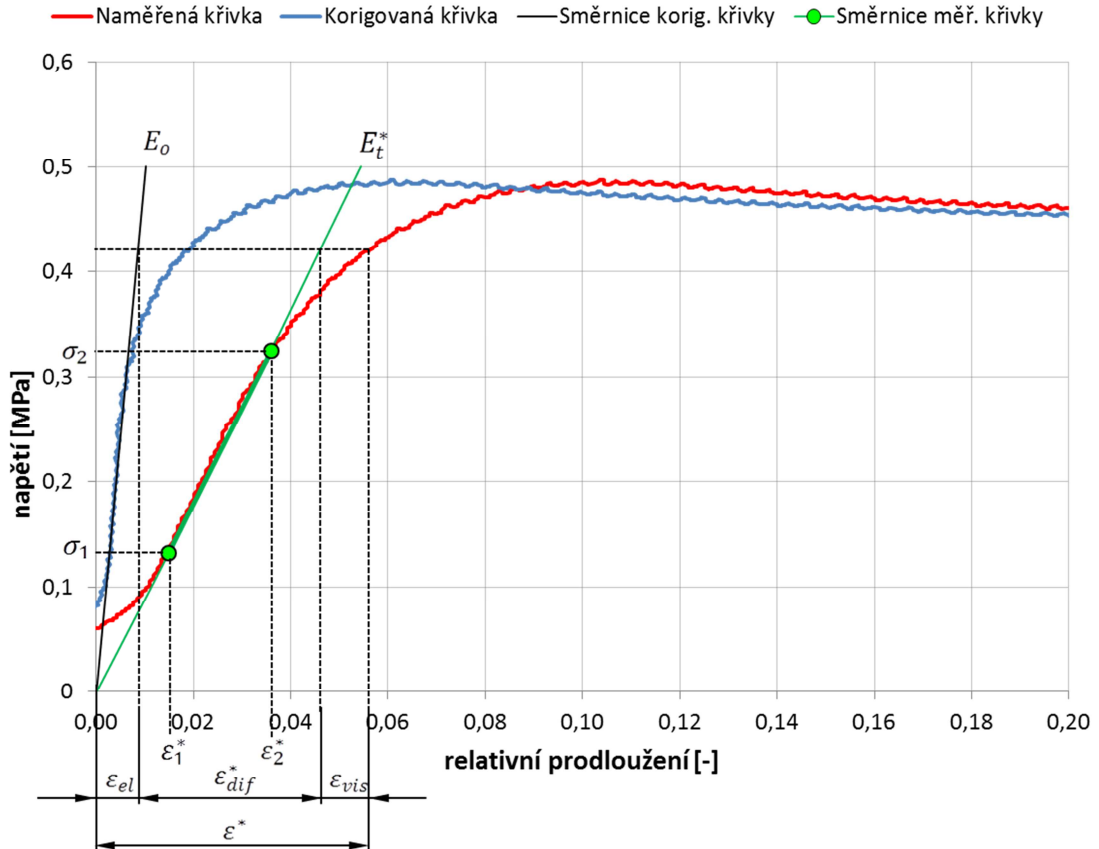
obr. 27: Pracovní tahový diagram.

### 5.8.1.1. Rekonstrukce tahových křivek

Tahové křivky pro účely numerických simulací budeme rekonstruovat na základě výsledku tahových zkoušek a měření Youngových modulů z ohybových zkoušek. Jak již bylo napsáno výše, při tahových zkouškách je měřena deformace z posuvu čelistí (ze vzájemné vzdálenosti upínacích kolíků) a nikoli přímo na vzorku. Údaj z posuvu čelistí nám nedává přesnou informaci o deformaci vzorku. Při tahovém zatížení dochází k tažení materiálu i na úrovni upínacích kolíků čelisti. Proto provedeme korekci deformace. Celkovou deformaci zkušební vzorku tak získáme z rovnice:

$$\varepsilon = \varepsilon^* - \frac{\sigma}{E_t^*} + \frac{\sigma}{E_o}. \quad (13)$$

Korekce tahové křivky a význam jednotlivých veličin je zřejmý z obr. 28.



obr. 28: Znáornění korekce tahové deformační křivky.

### 5.8.1.2. Výpočet skutečného napětí a skutečného přetvoření

Po korekci tahové křivky a jejím vyhlazení můžeme přepočítat závislost napětí - relativní prodloužení na závislost skutečné napětí - skutečné přetvoření. Vyjdeme ze zákona zachování objemu [18]:

Vztah pro výpočet skutečného napětí:

$$\sigma = \sigma_0(\varepsilon_0 + 1). \quad (14)$$

Vztah pro výpočet skutečného přetvoření:

$$\varepsilon = \ln(\varepsilon_0 + 1). \quad (15)$$

### 5.8.2 Rázová zkouška v tahu

Rázové zkoušky v tahu se provádějí na mechanickém padostroji a slouží k určení meze kluzu a tažnosti. Podrobnosti o zařízení byly uvedeny v kapitole 5.3. Koncepce čelistí je shodná jako u zkoušek statických. Při zatížení je snímána síla v čase. Záznam z vysokorychlostní kamery slouží pro stanovení rychlosti zatížení (a z něj určeného

prodloužení) a pro ověření předpokladu konstantní rychlosti deformace v průběhu zkoušky.

Rázové zkoušky v tahu probíhají při třech teplotách, které odpovídají zkouškám nárazníků. Jedná se o pokojovou (23 °C), zvýšenou (65 °C) a sníženou (-10 °C) teplotu.

Ukázka naměřené tahové křivky je na obr. 29 (červená křivka). Oscilace pozorované na tomto průběhu jsou způsobeny šířením rázové vlny od dopadu beranu na spodní čelist.

Naměřenou závislost smluvního napětí na relativním prodloužení je pro další práci nutné dále zpracovat. Nejprve průběh přepočteme dle zákona o zachování objemu na závislost skutečné napětí – skutečné přetvoření. K tomu využijeme zákon o zachování objemu, znalost modulu odpovídající zkoušené rychlosti deformace, a to dosazením do vztahu (9). Stanovený modul nám poslouží při následné aproximaci G'Sellovým vztahem (6). Nejprve z rovnice (5) vyjádříme koeficient viskoelastivity:

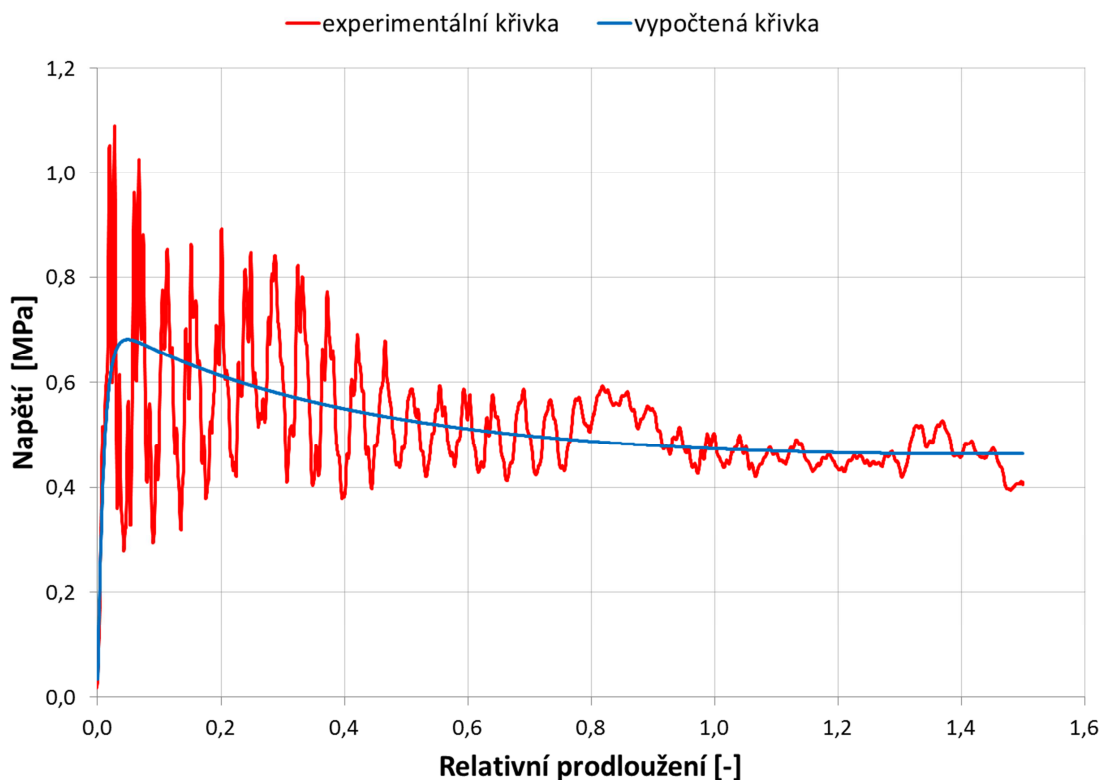
$$w = \frac{E}{K} \quad (16)$$

Dosazením vztahu (16) do rovnice (6) získáme:

$$\sigma = K \cdot \left(1 - e^{-\left(\frac{E}{K} \cdot \varepsilon\right)}\right) \cdot e^{h_1 \cdot \varepsilon^2} \quad (17)$$

Nyní v rovnici (17) figurují pouze dva parametry, a to  $K$  (koeficient konzistence) a  $h_1$  (koeficient deformačního zpevnění). Tyto dva parametry hledáme při aproximaci křivky pomocí metody nejmenších čtverců.

Abychom získali závislost smluvního napětí na relativním prodloužení, aproximační křivku zpětně přepočítáme opět dle vztahů (14) a (15) vycházejících ze zákona zachování objemu. Porovnání takto vypočtené křivky a křivky naměřené je vidět na obr. 29.

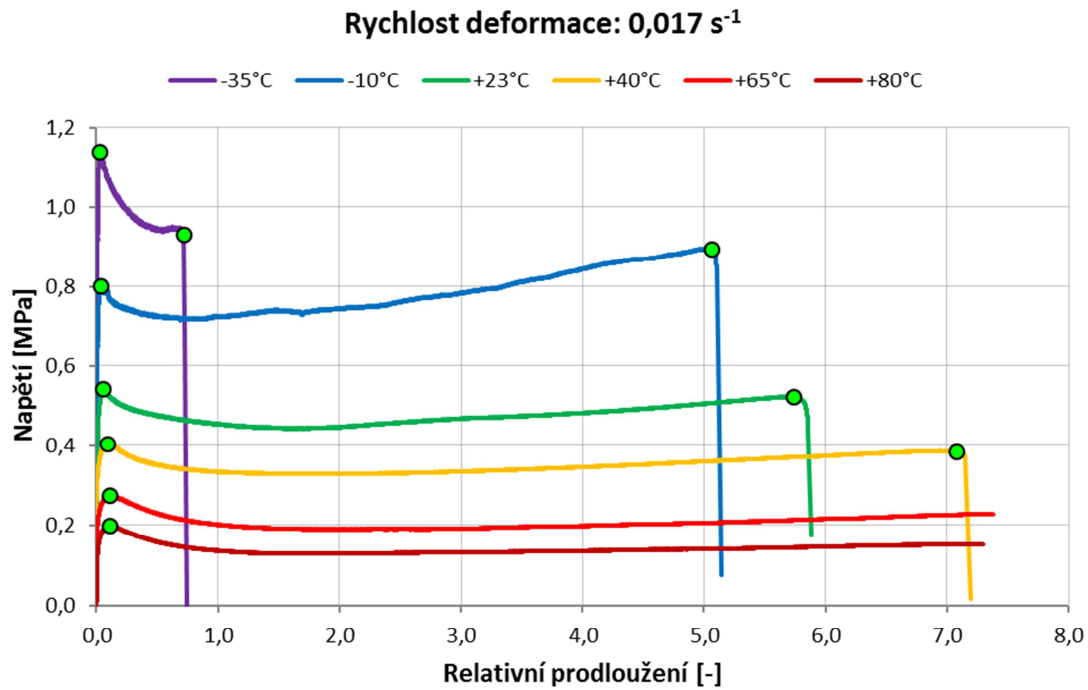


obr. 29: Porovnání naměřené a vypočtené křivky rázové zkoušky v tahu.

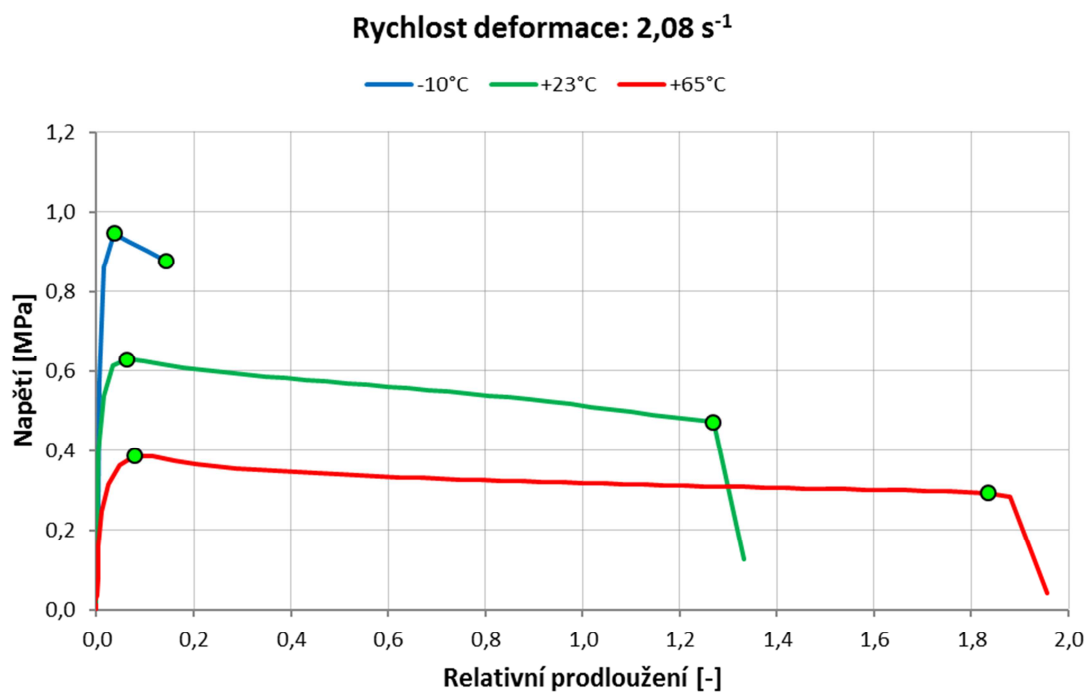
### 5.8.3 Výsledky tahových zkoušek

Tahové zkoušky byly prováděny pro tři rychlosti deformace (0,017; 2,08 a  $100 \text{ s}^{-1}$ ) a pro tři základní teploty (-10, +23, +65 °C). Při nejnižší rychlosti deformace ( $0,017 \text{ s}^{-1}$ ) byl materiál zkoušen kromě zmíněných teplot ještě při -35, +40, +80 °C. Pro každou rychlost deformace a teplotu byla testována sada sedmi vzorků. Z naměřených výsledků byly pozorovány teplotní a rychlostní závislosti tahových křivek (viz obr. 30 až obr. 32). Každá křivka uváděná v těchto grafech je vybrána ze sady sedmi měření.

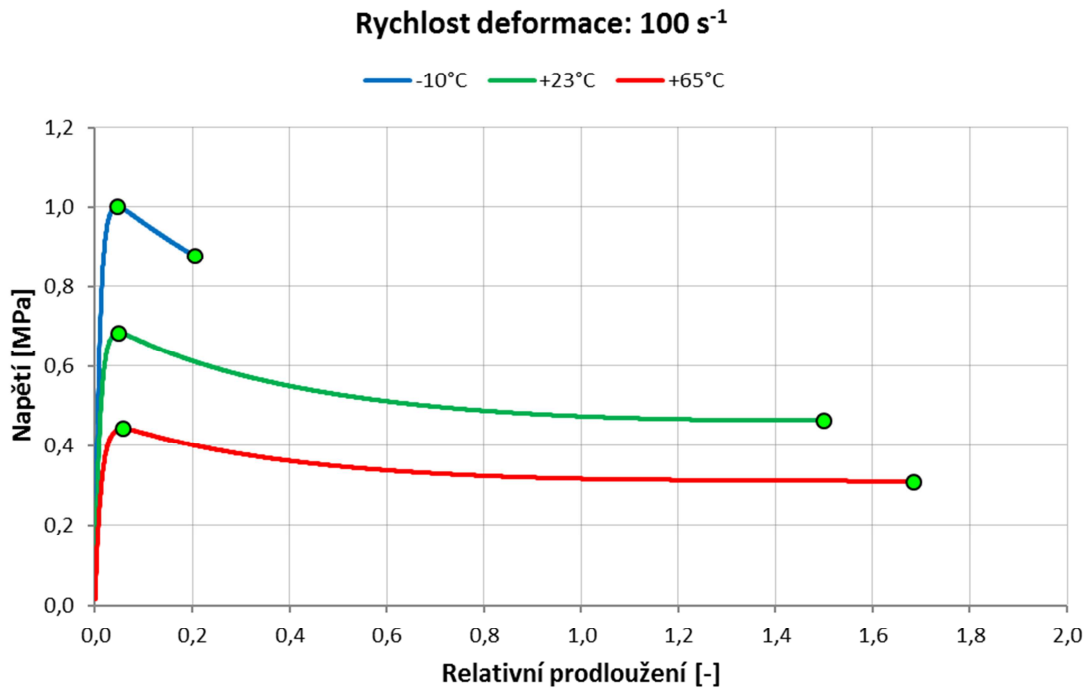
Na tahových křivkách jsou sledovány zejména dva body, a to mez kluzu a okamžik porušení (viz obr. 33 až obr. 34). V grafech jsou uváděny průměrné hodnoty z dané sady měření. Zatímco napětí na mezi kluzu nevykazuje velký rozptyl naměřených hodnot, tak u celkového prodloužení je tomu naopak, což u takovýchto polymerních materiálů je vlivem nehomogenní struktury obvyklé.



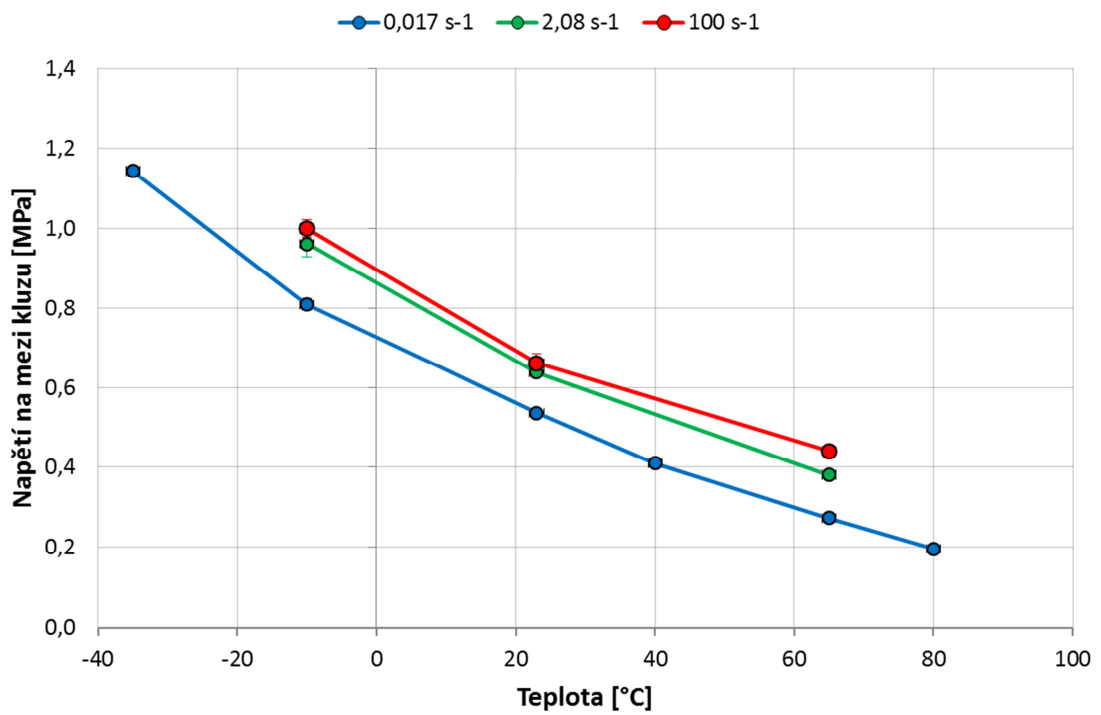
obr. 30: Teplotní závislost tahových křivek při rychlosti deformace 0,017 s<sup>-1</sup>.



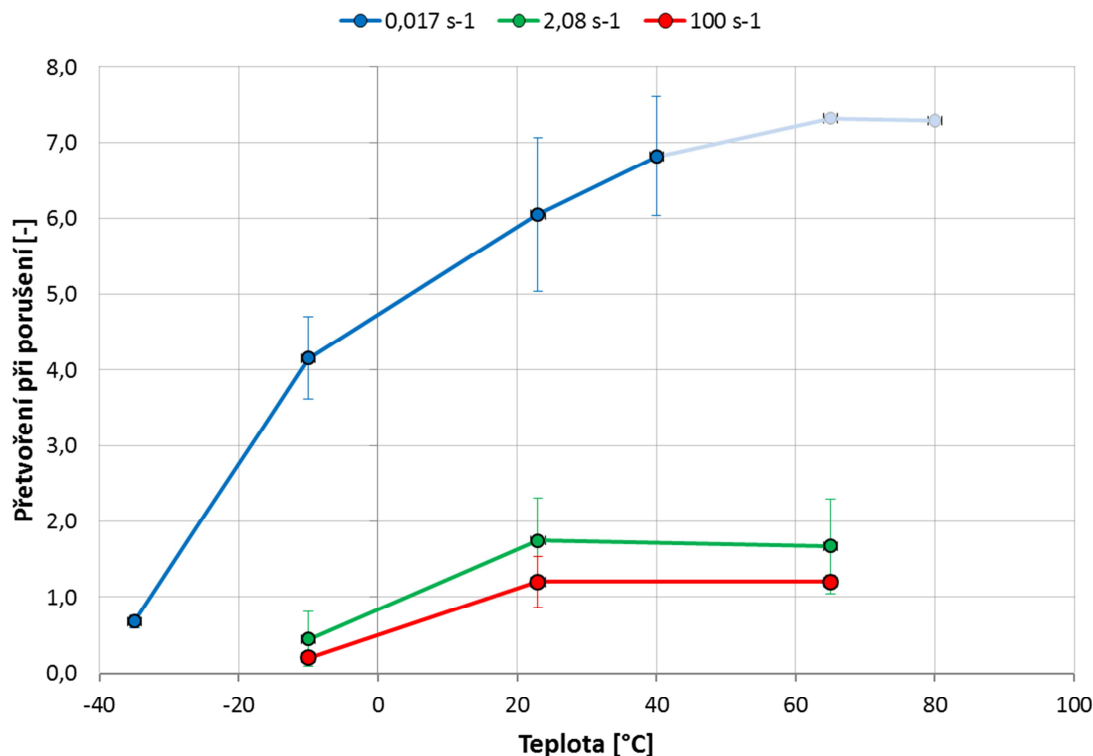
obr. 31: Teplotní závislost tahových křivek při rychlosti deformace 2,08 s<sup>-1</sup>.



obr. 32: Teplotní závislost tahových křivek při rychlosti deformace  $100 \text{ s}^{-1}$ .



obr. 33: Rychlostní závislosti napětí na mezi kluzu na teplotě.



obr. 34: Rychlostní závislosti přetvoření při porušení na teplotě.

## 5.9 Anizotropie materiálu

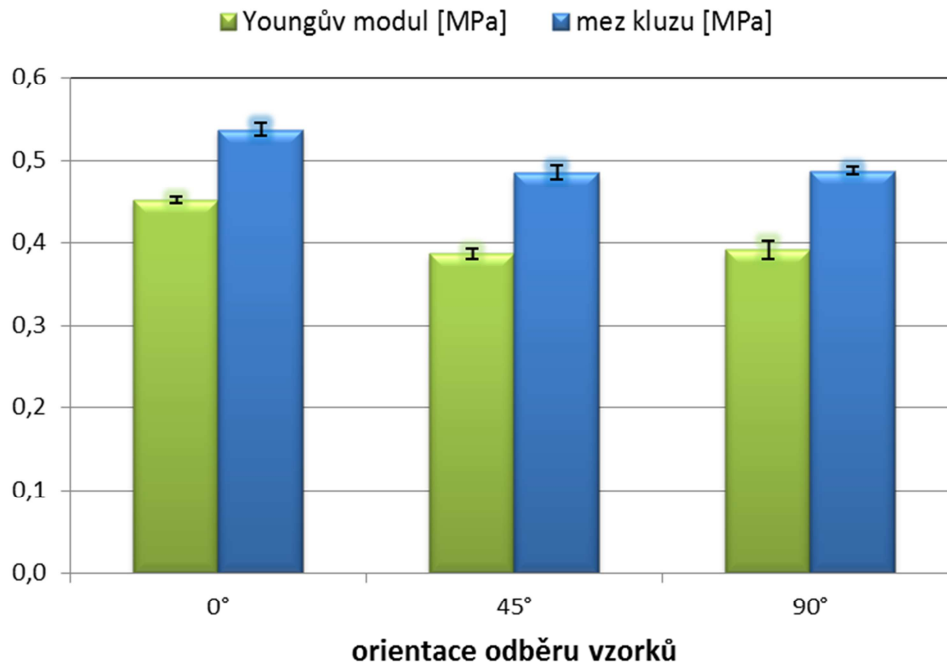
Technologie výroby vstřikováním (potažmo geometrie výrobku) se projevuje anizotropií materiálu u hotového vylisku. To znamená, že materiál má různé mechanické vlastnosti v různých směrech. Z toho důvodu je třeba provádět zkoušky na vzorcích s různou orientací (viz obr. 10).

Závislosti Youngova modulu, meze kluzu, přetvoření při porušení na orientaci odběru zkušební tělesa jsou zachyceny ve sloupcových grafech na obr. 35 a obr. 36.

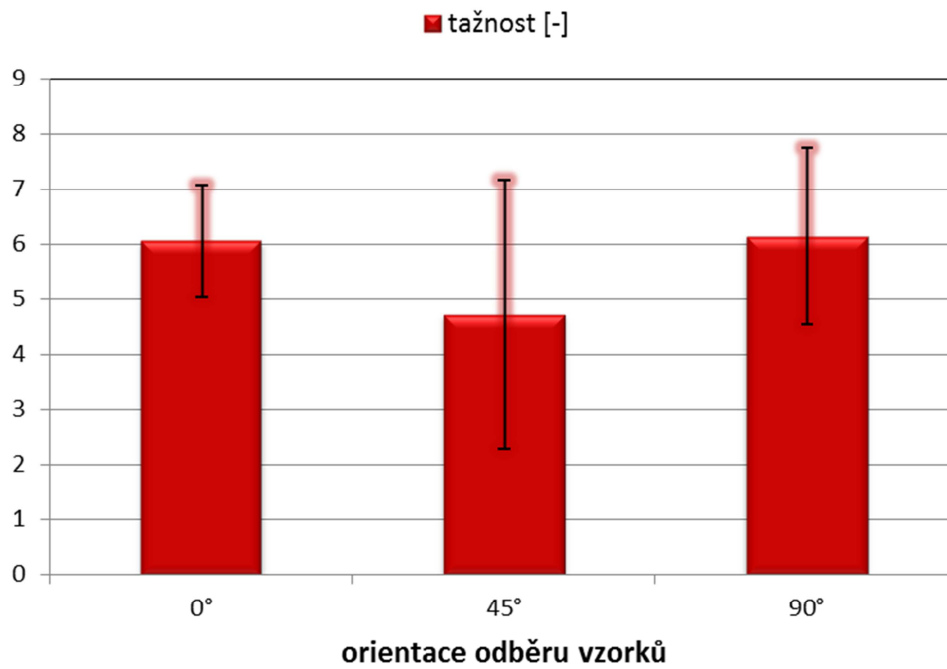
Z uvedených výsledků plyne, že jsou patrné rozdíly mezi zkušebními tělesy s různou orientací. Tím byl prokázán vliv technologie výroby související se směrem plnění a následného procesu chladnutí taveniny polymeru v dutině formy při vstřikování.

Velikost Youngova modulu se v závislosti na orientaci mění až o 14 % (vůči směru 0°) a napětí na mezi kluzu až o 10 %. Změna velikosti přetvoření při porušení vlivem orientace nebyla vzhledem k velkým rozptylům prokázána. Zmíněné závěry jsou podepřeny analýzou rozptylu s jednoduchým tříděním (one-way ANOVA).





obr. 35: Youngův modul a mez kluzu v závislosti na orientaci odběru vzorku.



obr. 36: Přetvoření při porušení (tažnost) v závislosti na orientaci odběru vzorku.

## 5.10 Vliv lakování

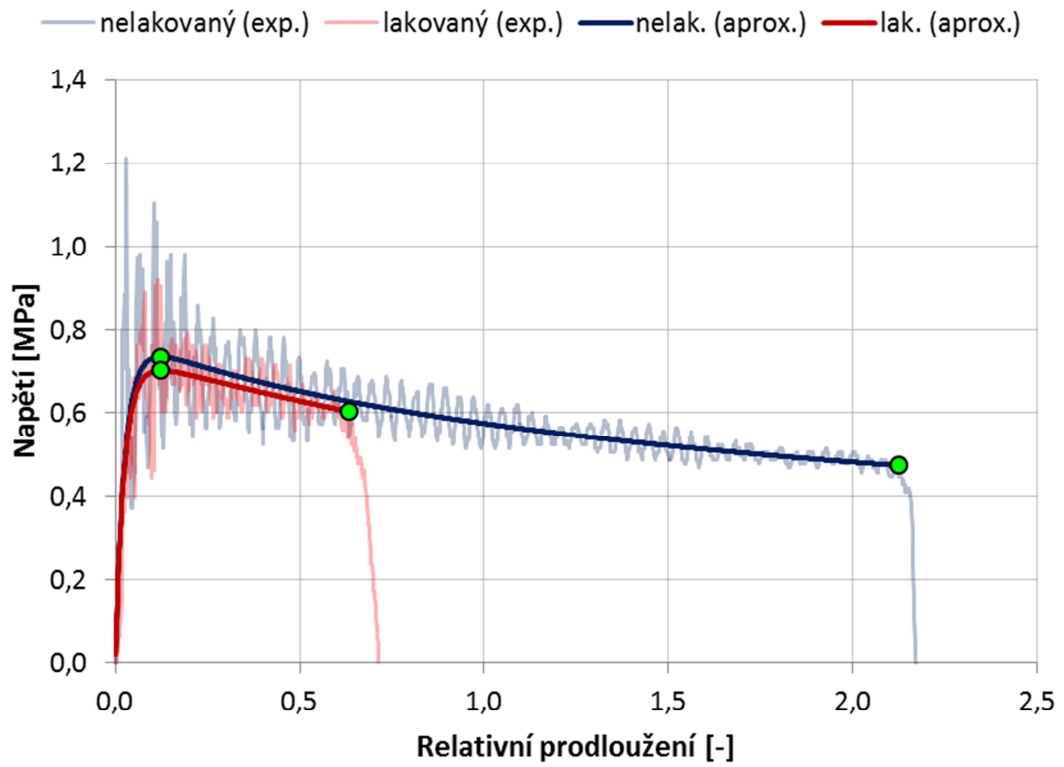
Další otázka, která byla řešena, se týká pouze pohledových plastových dílů nárazníku. Právě tyto výlisky (na rozdíl od nepohledových) jsou navíc lakovány. Nabízí se otázka, zdali vrstva laku nějakým způsobem ovlivňuje mechanické vlastnosti vyrobeného dílu. Tento vliv zpravidla není v praxi při tvorbě konečně-prvkového materiálového modelu zohledňován.

Pro účely experimentu byla zkušební tělesa odebírána ze dvou typů výlisků (v tomto případě se jednalo o část zadního nárazníku). Oba dva výlisky byly ze stejného materiálu (jednalo se o Borcom<sup>TM</sup> WE007AE – mikrokompozit na bázi PP), ovšem jeden byl po vystříknutí následně lakován, zatímco druhý zůstal nelakovaný.

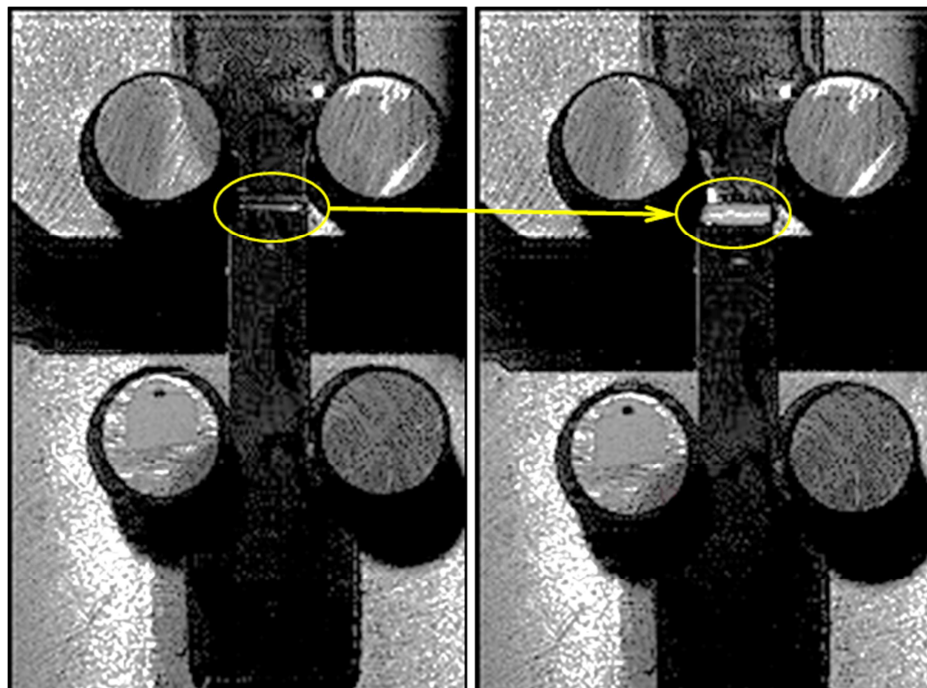
Ocenění vlivu vrstvy laku proběhlo na základě rázových tahových zkoušek provedených na padostroji. Porovnávaly se dvě skupiny po sedmi vzorcích. První skupinu tvořila zkušební tělesa lakovaná a druhou skupinu nelakovaná. Ukázka porovnání průběhu rázové tahové zkoušky mezi lakovaným a nelakovaným vzorkem je vidět na obr. 37. Z tohoto porovnání je patrné, že vrstva laku výrazně ovlivňuje okamžik porušení. Lakované vzorky vykazují výrazně nižší tažnost. Přetvoření při porušení je přibližně třikrát nižší u vzorků lakovaných oproti nelakovaným. Tato skutečnost byla charakteristická pro všechny zkoušené vzorky. Naproti tomu z hlediska napětí nebyl zpozorován rozdíl mezi materiálem lakovaným a nelakovaným. To znamená, že vliv lakování neovlivňuje velikost napětí na mezi kluzu.

Příčinu zmiňovaného jevu, tedy snížení tažnosti lakovaných vzorků, objasňuje záznam z rychlostní kamery pořízený během zkoušky. Na tomto záznamu je vidět iniciace a průběh porušení lakovaného vzorku. V průběhu tažení dochází s blížícím se vyčerpáním plasticity vrstvy laku k jeho lokální deformaci, což způsobuje koncentraci napětí v tomto místě, až dojde k porušení laku. Koncentrace napětí v místě porušení laku tak bezprostředně poté způsobí i porušení samotného plastového vzorku. Iniciace trhliny ve vrstvě laku a její šíření do plastového vzorku je vidět na snímcích na obr. 38. Tyto snímky jsou od sebe časově vzdáleny o 1 ms. Zkušební vzorek je lakován pouze z jedné (pohledové) strany.

Ze záznamu z vysokorychlostní kamery je zřejmé, že u nelakovaného vzorku je v převážné části zkoušky deformace homogenní po celé délce vzorku a nedochází tak ke koncentraci napětí do jednoho místa, jak tomu je v případě zkoušky lakovaného vzorku.



obr. 37: Porovnání naměřené deformační křivky lakovaného a nelakovaného vzorku.



obr. 38: Iniclace trhliny ve vrstvě laku (vlevo) až po její šíření do plastového vzorku (vpravo).

## 6 Verifikace materiálového modelu

Pro ověření správnosti vytvořeného konečně-prvkového materiálového modelu sestaveného na základě představené experimentální metodiky je nutné provést srovnání mezi experimentem a jeho numerickou simulací. Experimentem bude v tomto případě deformační zkouška sestavy nárazníku, která bude popsána dále.

Práce si klade za cíl zpřesnění výsledků simulací, které probíhají s dosavadním materiálovým modelem užívaným v praxi automobilového průmyslu. Proto je třeba zároveň porovnat výsledky dvou simulací, a to s dosud užívaným materiálovým modelem a s materiálovým modelem nově vytvořeným, vůči výsledkům experimentu.

Nejprve je vhodné popsat výše zmiňovaný pojem materiálový model. Tento pojem zahrnuje:

- 1) typ materiálového modelu, který je nabízen v komerčně dostupných konečně-prvkových softwarech,
- 2) dosazení experimentálně stanovených hodnot materiálových parametrů (Youngův modul, Poissonovo číslo, součinitel teplotní délkové roztažnosti, hustota materiálu apod.) a závislostí skutečného napětí na skutečném přetvoření pro různé teploty a rychlosti deformace.

### 6.1 Fyzická zkouška nárazníku

Pro verifikaci materiálového modelu slouží výsledky kyvadlového testu předního nárazníku při teplotě  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Princip této zkoušky byl již popsán v kap. 4.2.

Většina dílů nárazníku je ze zkoumaného materiálu Sumika D320 G02 (PP + EPDM + 15% talku).

### 6.2 Simulace zkoušky nárazníku

Simulace zkoušky nárazníku probíhá v softwaru PAM-CRASH. Plošné plastové díly jsou modelovány prostřednictvím skořepinových (shell) elementů.

#### 6.2.1 Porovnání původního a nového materiálového modelu

Základní rozdíly mezi původním a nově vytvořeným materiálovým modelem jsou shrnuty v tab. 2.

tab. 2: Porovnání výpočtových materiálových modelů.

Závislosti zahrnuté v materiálovém modelu			
sledovaná závislost		materiálový model	
		původní	nový
změna Youngova modulu v závislosti na:	teplotě	ANO	ANO
	rychlosti deformace	NE	ANO
změna křivky zpevnění v závislosti na:	teplotě	ANO	ANO
	rychlosti deformace	ANO*	ANO
přetvoření při porušení v závislosti na:	teplotě	NE	ANO
	rychlosti deformace	NE	ANO

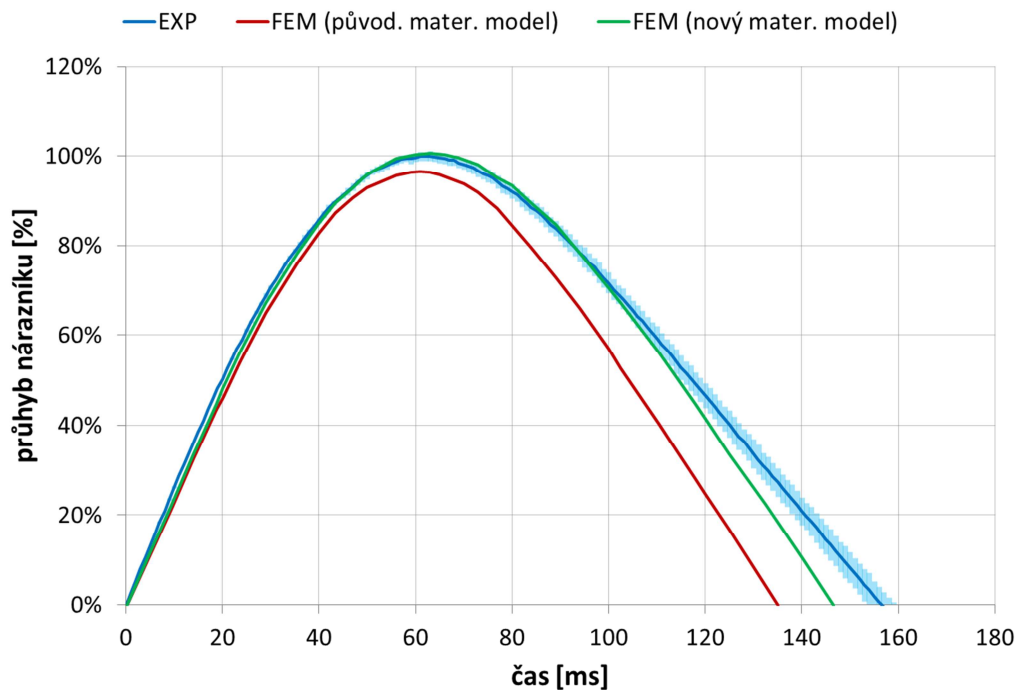
\* - využit analytický model zpevnění Cowper-Symonds

### 6.3 Výsledky porovnání simulací s experimentem

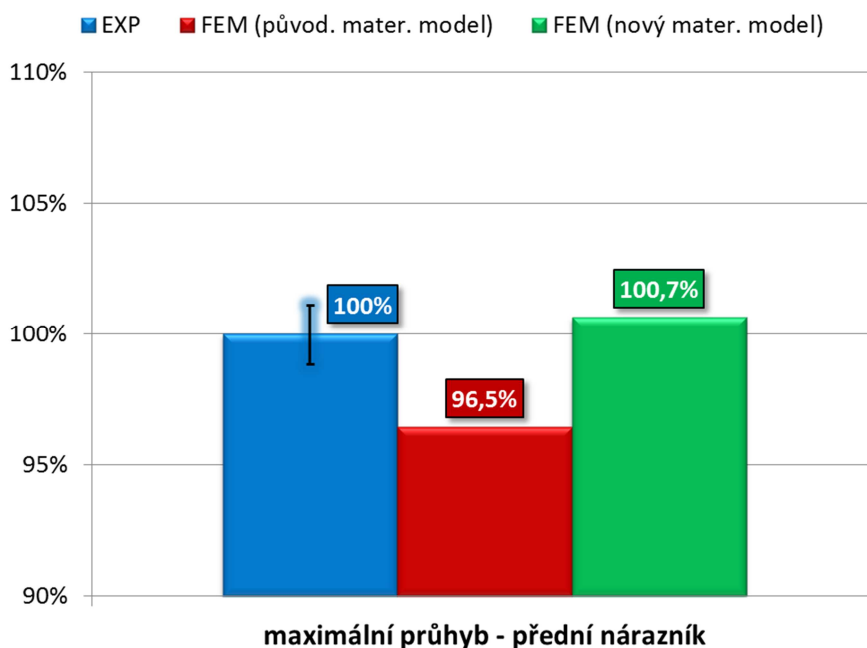
Průběh rázové zkoušky nárazníku lze popsat na základě změřeného průniku kyvadla do nárazníku zaznamenaného v čase. Jedná se tedy o průhyb nárazníku v místě zatížení. Odtud se vyhodnotí maximální hodnota tohoto průhybu.

Porovnání průběhu průhybu v čase pro experiment a pro simulace s původním a novým materiálovým modelem je vidět na obr. 39. Experiment byl prováděn třikrát. Na obr. 40 je uvedeno srovnání maximální hodnoty průhybu opět pro experiment a obě simulace. Pro účely těchto vyhodnocení byly absolutní hodnoty průhybů v milimetrech přepočteny poměrově na procenta. Průměrné hodnotě průhybu z experimentů bylo přiřazeno 100 % a hodnoty ze simulací byly rovněž vyjádřeny v procentech a vztaženy právě k hodnotě z experimentu. U experimentu jsou v grafu na obr. 40 uvedeny chybové úsečky vyjadřující výběrovou směrodatnou odchylku, jejíž hodnota je 1,1 %. Simulace s původním materiálovým modelem vykazuje hodnoty průhybu nižší o 3,5 % oproti experimentu. V případě simulace s novým materiálovým modelem jsou hodnoty průhybu vyšší o 0,7 % oproti experimentu.

Z výše uvedeného plyne, že nový materiálový model dává přesnější výsledky než materiálový model původní. Odchylka výsledku simulace s novým materiálovým modelem od experimentu je pouze 0,7 %. Zde je nutné zdůraznit, že tato hodnota je nižší, než je výběrová směrodatná odchylka experimentálních výsledků, která činí 1,1 %.



obr. 39: Porovnání výsledků simulací s experimentem – časový průběh průhybu předního nárazníku (křivka z experimentu představuje průměrnou křivku ze tří měření, světle-modrá oblast pod křivkou reprezentuje výběrovou směrodatnou odchylku).



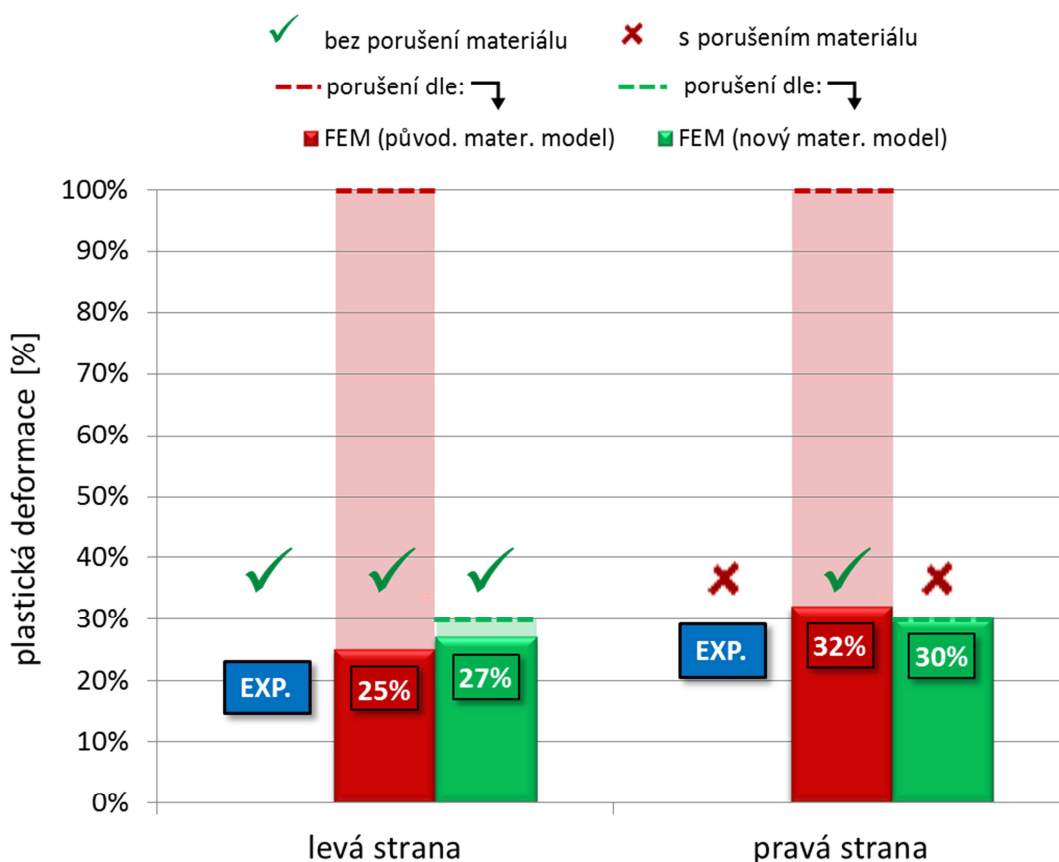
obr. 40: Porovnání výsledků simulací s experimentem – maximální průhyb předního nárazníku.

Hodnotícím kritériem rázové zkoušky nárazníku je viditelná deformace nebo poškození materiálu. Výsledek experimentu se vyhodnocuje bezprostředně po zkoušce vizuální prohlídkou jednotlivých dílů.

U materiálu Sumika D320 G02 (PP + EPDM + TD15%) došlo v experimentu v jednom případě k poškození jednoho z dílů na pravé straně nárazníku. Na symetricky opačné straně porušení nenastalo.

V obou simulacích (s původním i novým materiálovým modelem) byla největší plastická deformace zaznamenána na shodném místě jako u experimentu.

Porovnáme-li obě simulace (s původním a novým materiálovým modelem) s experimentem ve vztahu ke sledovaným kritickým místům (viz obr. 41), vidíme, že z hlediska plastických deformací oba modely vykazují podobné hodnoty. Avšak ve výsledku simulace s původním materiálovým modelem chybí podstatná informace, jež by vyjadřovala rizika potenciálního poškození materiálu, a to díky neznalosti hodnot přetvoření při porušení. Naproti tomu výsledek simulace s novým materiálovým modelem, jenž zahrnuje znalost hodnot porušení materiálu, vykazuje velmi dobrou shodu s experimentem z hlediska identifikace porušení. Nový materiálový model tak dává podstatnou informaci o riziku potenciálního poškození při predikci fyzických zkoušek nárazníků na rozdíl od původního materiálového modelu.



obr. 41: Porovnání výsledků obou simulací s experimentem (údaje se vztahují ke krajnímu klipu spodní mřížky nárazníku na levé a pravé straně).

## 7 Závěr

Disertační práce je zaměřena na tvorbu experimentální metodiky identifikace mechanických vlastností polymerních materiálů. Tato metodika je vytvářena za účelem získání materiálového popisu sloužícího jako vstup do materiálových modelů využívaných v konečně-prvkových softwarech. Tato práce se soustředí na houževnaté polymerní materiály, které se využívají v automobilovém průmyslu při konstrukci nárazníků. Vzhledem k tomu, že navrhovaná experimentální metodika je zaměřena na průmyslovou praxi, byl kladen velký důraz na efektivitu této metodiky, tzn. na minimalizaci experimentálních prací, v jejímž důsledku dochází ke zkrácení doby experimentů.

Zmiňovaná experimentální metodika identifikace mechanických vlastností v sobě obecně zahrnuje volbu, příp. návrh: zkušebních zařízení, typu a podmínek experimentálních zkoušek a jejich provázanost, způsob zpracování naměřených dat a jejich interpretace ve vztahu k používaným typům konečně-prvkových materiálových modelů. Návrh skladby a podmínek experimentálních zkoušek této metodiky vychází z podmínek (teplotních a rychlostních) fyzických zkoušek nárazníků. Dle požadovaných rychlostí experimentální práce byly provozovány na třech zkušebních zařízeních, a to na univerzálním zkušebním zařízení, dynamicko-mechanickém analyzátoru a padostroji. Zde je nutné zmínit, že padostroj, resp. jeho konstrukční návrh a realizace byl jedním z dílčích cílů této práce, na němž se autor podílel.

Aby bylo možné zohlednit technologické vlivy (při vstřikování) na mechanické vlastnosti plastů, je nutné vzorky odebírat z reálných výrobků, protože mají shodnou tloušťku a podobné výrobní podmínky (technologické parametry při vstřikování). Pro posouzení vlivu anizotropie je žádoucí vzorky odebírat ve třech různých směrech (0, 45, 90°) vůči směru plnění dutiny formy.

Co se týká skladby provedených experimentálních prací, tak ty lze rozdělit na dvě skupiny podle míry deformace. Zjednodušeně řečeno se jedná o oblast malých deformací (lineární viskoelasticity) a oblast rozvinutých (nevratných) deformací. Oblast lineární viskoelasticity je charakterizována Youngovým modulem, zatímco rozvinuté deformace jsou vyjádřeny tahovou křivkou přetvoření.

V případě měření tahových křivek přetvoření byly provedeny zkoušky při různých teplotách v rozsahu -40 až +80 °C a různých rychlostech deformace v rozsahu  $10^{-2}$  až  $10^2 \text{ s}^{-1}$ . Ve shodném teplotním rozsahu byly identifikovány hodnoty Youngova



modulu. Jeho rychlostní závislost byla stanovena na základě kombinace měření frekvenční závislosti reálné složky dynamického modulu a časové závislosti relaxačního modulu. Řešení bylo provedeno na základě vytvořených aproximačních vztahů časové a frekvenční závislosti.

Pro tvorbu konečně-prvkového materiálového modelu bylo třeba zrekonstruovat tahové křivky pro různé rychlosti deformace a různé teploty podle naměřených dat. Složením výsledků z měření ohybových modulů a tahových křivek přetvoření vždy pro příslušnou teplotu a rychlost deformace byly sestaveny tahové křivky, které se vložily do materiálového modelu.

Sestavený konečně-prvkový materiálový model vytvořený dle představené experimentální metodiky byl verifikován na základě porovnání fyzické zkoušky předního nárazníku osobního vozidla a její numerické simulace. Verifikace výsledků numerických simulací experimentem dokládá, že bylo dosaženo cíle této disertační práce. To znamená, že došlo ke zpřesnění výsledků numerických simulací oproti stávající situaci. Tohoto zlepšení bylo docíleno zkvalitněním vstupních dat do konečně-prvkového materiálového modelu, a to na základě navržené experimentální metodiky pro identifikaci mechanických vlastností houževnatých polymerních materiálů využívaných v automobilovém průmyslu při konstrukci nárazníků vozidel. Použitím nově vytvořeného konečně-prvkového materiálového modelu přineslo nejen zlepšení výsledků oproti materiálovému modelu užívanému v dosavadní praxi, ale zároveň výbornou shodu mezi simulací a experimentem.

Zároveň je třeba dodat, že vytvořená experimentální metodika byla navržena tak, aby minimalizovala experimentální práce, což vede k úspoře energie a času. Těto úspory bylo dosaženo na základě vhodně uspořádaných zkoušek a jejich vzájemné provázanosti, kde výstup z jedné zkoušky doplňuje výsledek jiné zkoušky. Zde je využito i ověřených teoretických poznatků aplikovaných do této metodiky a některých zjednodušujících předpokladů. Míra tohoto zjednodušení však neovlivňuje znatelným způsobem dosažené výsledky. Rovněž bylo docíleno zkrácení manipulačních časů, a to návrhem tvarových čelistí. Úspora času i energií vede ke snížení nákladů při identifikaci materiálových vlastností, což je důležité pro využití této metodiky v praxi.

## Seznam citovaných publikací

1. KREBS, J. *Teorie zpracování nekovových materiálů*. 3. Liberec: TUL, 2006. ISBN 80-7372-133-3.
2. ČSN EN ISO 178: *Plasty - stanovení ohybových vlastností*. [Norma]. 2003.
3. BRINSON, H. F. a L. C. BRINSON. *Polymer Engineering Science and Viscoelasticity - An Introduction*. New York: Springer Science+Business Media, LLC, 2008. ISBN 978-0-387-73860-4.
4. MEISSNER, B. a V. ZILVAR. *Fyzika polymerů..* Praha: SNTL, 1987.
5. ROYLANCE, D. Massachusetts Institute of Technology. In: *Engineering Viscoelasticity* [online]. Cambridge: 2001 [cit. 2013-květen].
6. POTĚŠIL, A. *Základy teorie viskoelasticity a dynamická odezva plastů*. [Habilitační práce]. Liberec: Vysoká škola strojní a textilní v Liberci, 1993.
7. Wikipedia. *Viscoelasticity* [online]. [cit. 2013-Duben]. Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/Viscoelasticity>
8. *LS-DYNA Keyword User's Manual, Volume II*. [Manuál]. [cit. 2014-září]. Dostupné z: <http://www.dynasupport.com/manuals/ls-dyna-manuals/ls-dyna-manual-r-7.1-vol-ii>
9. BECKER, F. A. KRAATZ a J. WIESER. Determination of the Behaviour of Thermoplastics at High Strain-Rates Using the Invariant Theory. In: *LS-DYNA Anwenderforum*. Bamberg: 2008.
10. ESI GROUP. *Virtual Performance Solution 2013 - Volume IV (Material Modelling - 2D)*. [Manuál]. 2013.
11. TRUFASU, D. , et al. Parameters Identification of Mechanical Behaviour Law For Polyether-Ether-Ketone Composites. In: *Proceedings of the 22nd International DAAAM Symposium*. Vienna: DAAAM International, 2011. ISSN 1726-9679.
12. DOBREA, D. V. et al. *Experimental and Numerical Analysis with MSC Marc Software for the Characterization of ....* [Dokument]. 2012.
13. SPINGLER, G. *Numerical Modelling of Polymer Materials for Crash Applications*. [Dokument]. 2006.
14. POTĚŠIL, A. R. JELÍNEK a V. HUMEN. Evaluation of Maxwell Material Parameters. In: *Proceedings of Experimental Stress Analysis 2009*. Liberec: 2009. ISBN 978-80-7372-483-2.
15. UNITED NATIONS. UNECE. In: *UN Vehicle regulations* [online]. [cit. 2013-Listopad]. Dostupné z: <http://www.unece.org/trans/main/wp29/wp29regs/r042e.pdf>
16. VOLKSWAGEN AG. *PV 1200: Vehicle Parts - Testing of Resistance to Enviromental Cycle Test (+80/-40) °C*. [Norma]. 2004.
17. *Plasty* [online]. Dostupné také z: <http://www.ateam.zcu.cz/download/plasty.pdf>

18. HORNÍK, P. *Vypracování metodiky zkoušení mechanických vlastností plechů při vyšších rychlostech deformace*. [Diplomová práce]. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2008.
19. DUNCAN, B. C. *Methods for Measuring Strains at High Rates*. [Report]. Teddington, Middlesex, UK: National Physical Laboratory, 1998. ISSN 1361-4061.
20. JAFARI, S. H. a A. K. GUPTA. Impact Strength and Dynamic Mechanical Properties Correlation in Elastomer-Modified Polypropylene. In: *Journal of Applied Polymer Science*, sv. LXXVIII. 2000, s. 962-71.
21. DEAN, G. a R. MERA. *Determination of Material Properties and Parameters Required for the Simulation of Impact ...*. [Report]. Teddington, Middlesex, UK: National Physical Laboratory, 2004. ISSN 1744-0270.
22. NATIONAL PHYSICAL LABORATORY. In: *Modelling the Behaviour of Plastics for Design under Impact* [online]. [cit. 2013-Únor]. Dostupné z: [http://www.npl.co.uk/upload/pdf/modelling\\_behaviour.pdf](http://www.npl.co.uk/upload/pdf/modelling_behaviour.pdf)
23. SOUKUPOVÁ, K. *Hodnocení mechanických vlastností plastů v závislosti na teplotě a rychlosti zatěžování*. [Diplomová práce]. Liberec: TUL, 2010.
24. MULLIKEN, A. D. *Low to High Strain Rate Deformation of Amorphous Polymers: Experiments and Modeling*. [Disertační práce]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2004.
25. LAKES, R. *Viscoelastic Materials*. New York: Cambridge University Press, 2009. ISBN 978-0-521-88568-3.

## Seznam publikací autora

1. HORNÍK, P.: *Vypracování metodiky zkoušení mechanických vlastností plechů při vyšších rychlostech deformace*. [Diplomová práce], TUL, Liberec 2008.
2. HORNÍK, P.: Identification of Impact Resistance of Plastics for the Purposes of FE Computations. In: *Proceedings of 49th International Scientific Conference EXPERIMENTAL STRESS ANALYSIS 2011*. Znojmo: Brno University of Technology, 2011, s. 97-100. ISBN 978-80-214-4275-7.
3. LUFINKA, A., HORNÍK, P.: Measurement of Properties of a Sandwich Material Specimen. In: *Proceedings of 49th International Scientific Conference EXPERIMENTAL STRESS ANALYSIS 2011*. Znojmo, Brno University of Technology, 2011, s. 191-194. ISBN 978-80-214-4275-7.
4. KOLEKTIV AUTORŮ: *Ohřevy radiací - teorie a průmyslová praxe*. Technická univerzita v Liberci, 2012. ISBN 978-80-7372-884-7.
5. POTĚŠIL, A., HORNÍK, P., HUŠEK, M.: Analysis of a Dynamic Response of a Car Door Impact into the Lock. In: *Proceedings of 51th International Scientific Conference EXPERIMENTAL STRESS ANALYSIS 2013*. Litoměřice: Jan Evangelista Purkyně University, 2013. ISBN 978-80-741-4579-7.
6. POTĚŠIL, A., HORNÍK, P., HUŠEK, M.: Analysis of a Dynamic Response of a Car Door Impact into the Lock. In: *Applied Mechanics and Materials Vol. 486 in 2014 with the title Experimental Stress Analysis 51*. Trans Tech Publications Ltd., 2014. ISSN: 1662-7482.
7. HORNÍK, P., POTĚŠIL, A. Split Disk Ring Tension Test - Diskuze. In: *Konference mechanika kompozitních materiálů a konstrukcí*. Beroun: Západočeská univerzita v Plzni, 2014, str. 27-30, ISBN 978-80-261-0355-4.
8. HORNÍK, P. Experimental Methodology For Determination of Ductile Thermoplastics Mechanical Properties. In: *Proceedings of 52th International Scientific Conference EXPERIMENTAL STRESS ANALYSIS 2014*. Mariánské Lázně, 2014. ISBN 978-80-231-0377-6.
9. HORNÍK, P. Experimental Determination of Mechanical Properties for the Purposes of Numerical Simulations of a Car Bumper Tests. In: *Applied Mechanics and Materials Vol. 732 in 2015 with the title Applied Methods of the Analysis of Static and Dynamic Loads of Structures and Machine*. Trans Tech Publications Ltd., 2015. ISSN 1662-7482.