

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

2009

PETR SCHWARZER

# TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCÍ

## Fakulta strojní

Studijní program M2301T – Strojírenství

Strojírenská technologie  
zaměření tváření kovů a plastů

Katedra strojírenské technologie  
Oddělení tváření kovů a plastů

**Bezkontaktní analýza deformace semikrystalického termoplastu při  
tahovém zatěžování v závislosti na rychlosti zkoušení**

**Contactless analysis of deformation of semi-crystalline thermoplastic in  
tension straining in dependence on rate of testing**

Petr Schwarzer

**KSP – TP – 823**

Vedoucí diplomové práce: Ing. Luboš Běhálek - *TU v Liberci*  
prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld - *TU v Liberci*  
Konzultant diplomové práce: Ing. Jiří Bobek- *TU v Liberci*

### Rozsah práce a příloh:

Počet stran	68
Počet tabulek	7
Počet příloh	1
Počet obrázku	66

**Datum:** 5.6.2009

# A N O T A C E

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie  
Oddělení tváření kovů a plastů

Studijní program: M2301 – Strojírenství

Diplomant : Petr Schwarzer

Téma práce: Bezkontaktní analýza deformace semikrystalického termoplastu při tahovém zatěžování v závislosti na rychlosti zkoušení

Contactless analysis of deformation of semi-crystalline thermoplastic in tension straining in dependence on rate of testing

Číslo DP: KSP – TP – 823

Vedoucí DP: Ing. Luboš Běhálek - *TU v Liberci*  
prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld - *TU v Liberci*

Konzultant: Ing. Jiří Bobek - *TU v Liberci*

## **Abstrakt:**

Diplomová práce se zabývá analýzou deformačního chování u semikrystalického termoplastu (Mosten GB005) při rozdílných rychlostech zatěžování v tahu. Deformačního chování je docíleno na trhacím stroji a je snímáno prostřednictvím bezkontaktního měřicího systému Aramis od společnosti GOM. Teoretická část se zabývá viskoelastickými vlastnostmi polymerů spolu s možnostmi měření deformačního chování.

## **Abstract**

The diploma thesis deals with analysis of deformation behaviour of semi-crystalline thermoplastic (Mosten GB005) at different rates of straining in tension. Deformation is performed on a tension testing machine and this is scanned by contactless measuring system Aramis produced by company GOM. The theoretic part describes viscoelastic properties of polymers and the possibilities of measuring deformation behaviour.

**Místopřísežné prohlášení:**

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 5. června 2009

.....  
Petr Schwarzer  
Na Stráni 77, Fojtka  
463 31 Mníšek u Liberce

Své ocenění a velký dík bych chtěl v těchto několika řádcích vyjádřit Ing. Luboši Běhálkovi za vedení a pomoc během tvoření této diplomové práce, Ing. Jiřímu Bobkovi za jeho cenné konzultace a připomínky související s experimentální částí, dále bych chtěl poděkovat prof. Dr. Ing. Petru Lenfeldovi, Dr. Ing. Jiřímu Kotkovi za cenné rady týkající se viskoelastických vlastností plastů, Ing. Ireně Šmídové a své rodině a přátelům za podporu, která mi byla z jejich strany poskytnuta.



## **OBSAH**

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>Teoretická část</b>	<b>12</b>
2.1	Viskoelastické vlastnosti	12
2.1.1	Mezní stavy	12
2.1.2	Vlastnosti ideálních látek	13
	- Elastická látka	13
	- Viskózní látka	16
2.1.3	Zpožděně elastická složka	19
2.1.4	Reálná deformace	21
2.1.5	Závislost mezi tahovým napětím a deformací	25
2.1.6	Linearita viskoelastických vlastností	26
2.1.7	Nelineární viskoelastické chování	28
2.2	Tahové vlastnosti plastů	29
2.3	Měření deformace	32
2.3.1	Kontaktní měření deformace	32
2.3.2	Bezkontaktní měření deformace	34
	- Optický extenzometr	34
	- Laserový extenzometr	34
	- Laserový snímač deformace	35
	- Ultrazvukový snímač deformace	35
	- Optický snímač deformace	35
2.3.3	ARAMIS	36
<b>3</b>	<b>Experimentální část</b>	<b>41</b>
3.1	Charakteristika materiálu	41
3.2	Výroba zkušebních vzorků	42
3.3	Kondicionace	43
3.4	Příprava na snímání deformace optickým systémem Aramis	44
3.5	Tahová zkouška	48
3.6	Snímání deformace optickým systémem Aramis	51
<b>4</b>	<b>Vyhodnocení a diskuse výsledků</b>	<b>62</b>
4.1	Vyhodnocení tahové zkoušky	62



4.2	Vyhodnocení deformačního chování prostřednictvím systému ARAMIS	63
<b>5</b>	<b>Závěr</b>	<b>66</b>
	<b>Seznam použité literatury</b>	<b>67</b>

**Seznam použitých symbolů a zkratk**

$\sigma$	napětí v tahu [MPa]
$\sigma(t)$	napětí závislé na čase [MPa]
$\sigma_1$	napětí měřené při $\varepsilon_1=0,0005$ [MPa]
$\sigma_2$	napětí měřené při $\varepsilon_2=0,0025$ [MPa]
$\tau$	smykové napětí [MPa]
$\tau_{\text{pružiny}}$	smykové napětí na pružině [MPa]
$\tau_{\text{pístu}}$	smykové napětí na pístu [MPa]
$\varepsilon$	deformace [-]
$\varepsilon_x$	poměrná deformace ve směru x [-]
$\varepsilon_y$	poměrná deformace ve směru y [-]
$d\varepsilon_x$	hodnota poměrné deformace ve směru x [-]
$d\varepsilon_y$	hodnota poměrné deformace ve směru y [-]
$\gamma$	smyková deformace [-]
$\gamma(t)$	smyková deformace závislá na čase [-]
$\gamma(t, \sigma)$	smyková deformace závislá na čase t a napětí $\sigma$ [-]
$\gamma_{\text{pístu}}$	smyková deformace pístu [-]
$\gamma_{\text{pružiny}}$	smyková deformace pružiny [-]
$\gamma_c$	celková smyková deformace [-]
$\gamma_0$	velikost smykové deformace před zrušením napětí [-]
$\gamma_1$	elastická smyková deformace [-]
$\gamma_2$	zpožděně elastická smyková deformace [-]
$\gamma_3$	plastická smyková deformace [-]
$\frac{d\gamma}{dt}$	rychlost deformace [ $s^{-1}$ ]
$\mu$	Poissonovo číslo [-]
E	modul pružnosti v tahu [MPa]
G	modul pružnosti ve smyku [MPa]
G(t)	modul pružnosti ve smyku závislý na čase [MPa]
$G_0(t)$	izochronní relaxační modul [MPa]
$G_1$	modul pružnosti ve smyku elastické složky [MPa]
$G_2$	modul pružnosti ve smyku zpožděně elastické složky [MPa]
J	poddajnost ve smyku [ $MPa^{-1}$ ]
J(t)	poddajnost ve smyku závislá na čase [ $MPa^{-1}$ ]





D	poddajnost v tahu [ $\text{MPa}^{-1}$ ]
$\eta$	dynamická viskozita kapaliny [ $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ]
$\eta_2$	dynamická viskozita kapaliny u zpožděně elastické složky [ $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ]
$\eta_3$	dynamická viskozita kapaliny u plastické složky [ $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ]
t	čas [s]
F	síla [N]
$S_0$	plocha počátečního průřezu [ $\text{mm}^2$ ]
$\Delta S$	změna průřezu [ $\text{mm}^2$ ]
$L_0$	počáteční vzdálenost mezi čelistmi [mm]
$\Delta L$	zvětšení vzdálenosti mezi čelistmi [mm]
$\Delta L_x$	změna průtahoměru [mm]
Z	zúžení (kontrakce) [%]
$\Delta x$	posunutí bodů ve směru x [mm]
v	rychlost zatěžování [ $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ]
$v_x$	rychlost posunutí bodů ve směru x [ $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ]
u	odchylka [mm]
b	výška [mm]
$\bar{x}$	aritmetický průměr n měření
$x_i$	hodnota i-tého měření ( $i=1,2,3,\dots,n$ )
n	celkový počet měření
GOM	Gesellschaft für Optische Messtechnik
CCD	Charge-Coupled Device
HS	High speed
PP	Polypropylen



## 1 Úvod

Polymer - výraz, který mnohému laikovi neřekne nic a přitom se za ním skrývá mnohé. Polymer je součástí lidstva. Lidé se s ním za posledních sto let naučili žít a život bez něj by byl pro většinu z nich nepředstavitelný. Na druhou stranu, při vyřknutí slova plast, či nesprávného sousloví umělá hmota, se každému vybaví hřebeny, koberce, obaly od potravin, kryty přístrojů, součásti v automobilovém průmyslu apod. V souhrnu vše, co využívá každým dnem, ale nepřemýšlí o tom, jaká je jejich makromolekulární struktura, či jakou technologií byly vyrobeny. Tato hlediska jsou však podstatná pro technické pracovníky, jejichž životní náplní je tyto věci funkčně, spolehlivě, ekonomicky, bezpečně a v současné době i ekologicky vyrábět, i když je to v některých aspektech velmi obtížné. Při výběru materiálu pro výrobu plastových výrobků je rozhodujícím faktorem cena, která je také úzce spjata s užitnými vlastnostmi budoucího výrobku. Mezi užitné vlastnosti mimo jiné patří vlastnosti deformační, které lze určit četným množstvím zkoušek podložených technickými normami. Aby těleso mohlo být deformováno, musí na něj působit nějaký faktor: síla, teplota, prostředí, čas.

Tato diplomová práce se zabývá tematikou analýzy vlivu rychlosti zatěžování na deformační chování semikrystalického termoplastu. V teoretické části se čtenář seznámí s úvodem do viskoelastického chování plastů. Tento úvod, jak již samotné slovo napovídá, není vyčerpávajícím výkladem o viskoelastickém chování plastů, ale toto ani není autorovým cílem. Dále se seznámí s tahovými vlastnostmi u plastů a v závěru je také zmínka o možnostech měření deformací u materiálů.

Pro zkoumání deformačního chování byl vybrán polypropylen s označením Mosten GB005, který byl zatěžován na trhacím přístroji za různých deformačních rychlostí: 5 mm/min, 50 mm/min, 100 mm/min a 200 mm/min. Tento proces byl již v minulosti učiněn mnohokrát, ale pro tento experiment byl využit optický 3D snímač deformačního chování pod názvem Aramis. Tato metoda se v nedávné minulosti v oblasti materiálového inženýrství využívala zpravidla pro popis deformačního chování kovů. Nyní byl ale tento přístroj použit ke zkoumání deformačních vlastností u plastů při různých rychlostech zatěžování.



Záměrem této diplomové práce je rozšířit řadu technických materiálů, které se zabývají problematikou měření deformace pomocí bezkontaktních měřících systémů tak, jako např. práce s názvem „Metodika ustavení souřadného systému pro optické měřící zařízení Pontos“ [1]. Aby mohlo být tohoto dosaženo, musely být stanoveny cíle vedoucí ke zhotovení práce, kterými jsou: vyrobit zkušební vzorky z materiálu PP Mosten GB005, následně je podrobit tahové zkoušce s různými rychlostmi zatěžování s použitím systému Aramis a vyhodnotit rozdíly ve vlastnostech materiálu během zkoušení.



## 2 Teoretická část

### 2.1 Viskoelastické vlastnosti

Nejvýraznějším projevem deformačního chování polymerů je jeho velká závislost na teplotě, rychlosti deformace a době zatěžování. Znalost mechanického chování určuje nejenom aplikační oblasti materiálu, ale také charakterizuje jeho fyzikální strukturu. Závislost mechanických funkcí na čase, tedy viskoelasticita, je nejcharakterističtějším projevem polymerních molekul. Jestliže na polymerní vzorek působí napětí, dochází ke změně jeho tvaru i objemu. Z fyzikálního hlediska existují dva základní typy deformací: smyková deformace, která odpovídá změně tvaru tělesa a kompresní deformace, která odpovídá změně objemu. Z těchto dvou typů deformací lze složit libovolný typ deformace [2].

Při mechanickém namáhání polymerů tedy existují dva mezní stavy chování, a to chování ideálně pružného tělesa odpovídající smykové deformaci a ideálně viskózní kapaliny odpovídající deformaci kompresní. Vedle těchto dvou mezních stavů se ale polymery chovají během mechanického namáhání složitěji, což je vysvětleno v následujících odstavcích.

#### 2.1.1 Mezní stavy

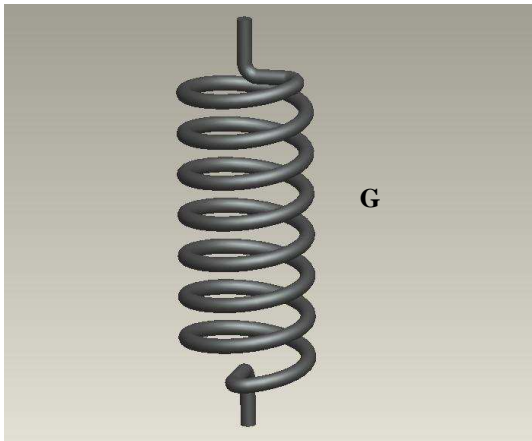
Jak již bylo napsáno výše, mezní stavy při mechanickém namáhání tělesa jsou dva: ideálně viskózní kapalina a ideálně pružné těleso. Oba stavy lze při vnějším namáhání popsat pomocí reologických modelů, které se přiřadí k jednotlivým mezním případům chování [3].

##### **Ideálně pružné těleso (Hookeovská elasticita)**

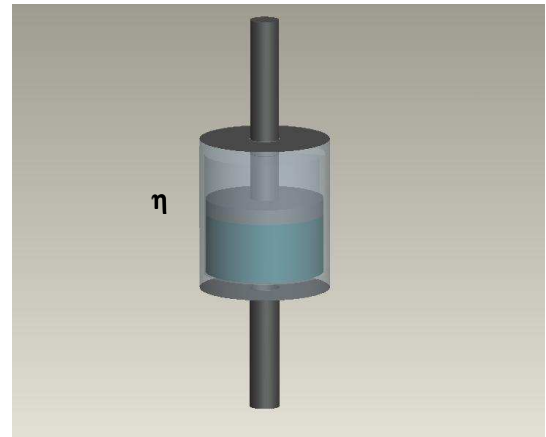
Chování ideálně pružného tělesa lze při vnějším namáhání popsat pomocí pružiny (viz obr. 2.1), jejíž vlastnosti jsou odvislé od modulu pružnosti ve smyku  $G$ .

##### **Ideálně viskózní kapalina (Newtonský tok)**

Bude-li působit vnější napětí na ideálně viskózní látku, její deformační chování lze popsat prostřednictvím válce a pístu, který je naplněn viskózní kapalinou o viskozitě  $\eta$  (viz obr. 2.2).



Obr.2.1 Pružina

 $G$  - modul pružiny [MPa]

Obr.2.2 Válec s pístem

 $\eta$  – viskozita kapaliny ve válci [Pa.s]

## 2.1.2 Vlastnosti ideálních látek

### – Elastická látka

Elastické těleso při zatěžování popisuje model pružiny. K deformaci pružiny v důsledku působení napětí  $\sigma$  dochází okamžitě. Veškerá energie vynaložená na elastickou deformaci pružiny se v pružině akumuluje. Po odlehčení se tato akumulovaná energie beze zbytku spotřebuje na návrat pružiny do původního nedeformovaného stavu. Elastická deformace je tak dokonale vratná a model elastického tělesa lze aplikovat na materiály, které mají schopnost akumulovat mechanickou energii. Elastická látka „nemá paměť“, z toho plyne, že deformace nezávisí na předchozí deformační historii. Napětí  $\sigma$  je lineární funkcí deformace  $\varepsilon$  (viz obr.2.3), tj. platí Hookův zákon (2.1) [4], [5].

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2.1)$$

kde:  $\sigma$       napětí (síla na jednotku plochy) [MPa]

$\varepsilon$       deformace [-]

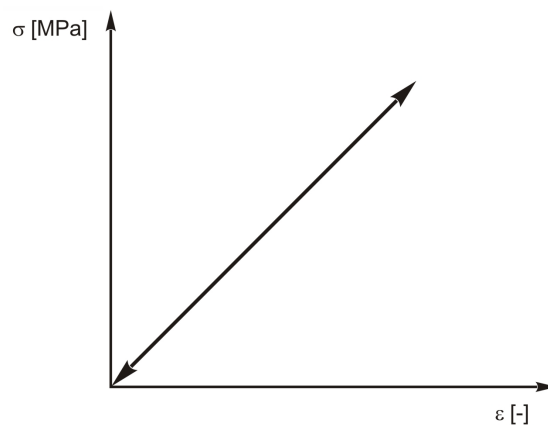
$E$       modul pružnosti v tahu [MPa]

Modul pružnosti  $E$ , nazývaný také Youngův modul, se vztahuje vždy na plochu průřezu při protažení. Podle rovnice (2.1) není modul pružnosti  $E$  závislý na velikosti použitého napětí nebo naopak na velikosti použité deformace a rovněž nezávisí na čase [2]. Inverzní veličinou k modulu pružnosti v tahu  $E$  je poddajnost v tahu  $D$  (viz rovnice 2.2), která charakterizuje schopnost materiálu se deformovat za daných podmínek. Poddajnost je definována jako poměr

deformace a aplikovaného napětí. Z rovnice (2.2) plyne, že poddajnost v tahu rovněž nezávisí na čase, resp. na době zatěžování [6].

$$D = \frac{\varepsilon}{\sigma} = \frac{1}{E} \quad (2.2)$$

kde: D poddajnost v tahu [MPa<sup>-1</sup>]  
σ napětí (síla na jednotku plochy) [MPa]  
ε deformace [-]  
E modul pružnosti v tahu [MPa]

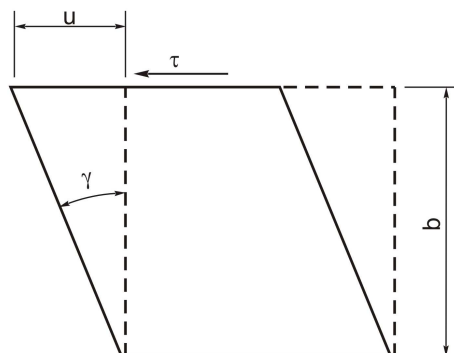


Obr. 2.3 Napětí σ je lineární funkcí deformace ε [6]

Místo normálové deformace se často sleduje smyková deformace (zkos) γ při působení tangenciálního napětí τ rovnoběžně se sledovanou plochou (viz obr.2.4). Způsobí-li tečné napětí τ odchylku u ve výšce b od pevné podložky, lze definovat deformaci ve smyku rovnicí (2.3) [7]:

$$\gamma = \frac{u}{b} = \operatorname{tg} \gamma \quad (2.3)$$

kde γ smyková deformace (zkos) [-]  
u odchylka [m]  
b výška [m]



Obr. 2.4 Schéma smykové deformace [8]



Deformaci tělesa, kterou znázorňuje protažení pružiny, lze vypočítat z Hookova zákona pro smyk (viz rovnice 2.4):

$$\gamma = \frac{\tau}{G} \quad (2.4)$$

kde  $\tau$  smykové napětí [MPa]  
 $\gamma$  smyková deformace [-]  
 $G$  modul pružnosti ve smyku [MPa]

Zde uvedený modul pružnosti ve smyku  $G$  má význam jako odpor materiálu proti deformaci ve smyku a mezi modulem pružnosti v tahu  $E$  a modulem pružnosti ve smyku  $G$  existuje vztah (viz rovnice 2.5):

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \mu)} \quad (2.5)$$

kde  $G$  modul pružnosti ve smyku [MPa]  
 $E$  modul pružnosti v tahu [MPa]  
 $\mu$  Poissonovo číslo [-]

Pro nestlačitelné látky a pro mnohé plasty platí mezi modulem pružnosti v tahu a modulem pružnosti ve smyku [6] vztah dle rovnice (2.6):

$$E = 3 \cdot G \quad (2.6)$$

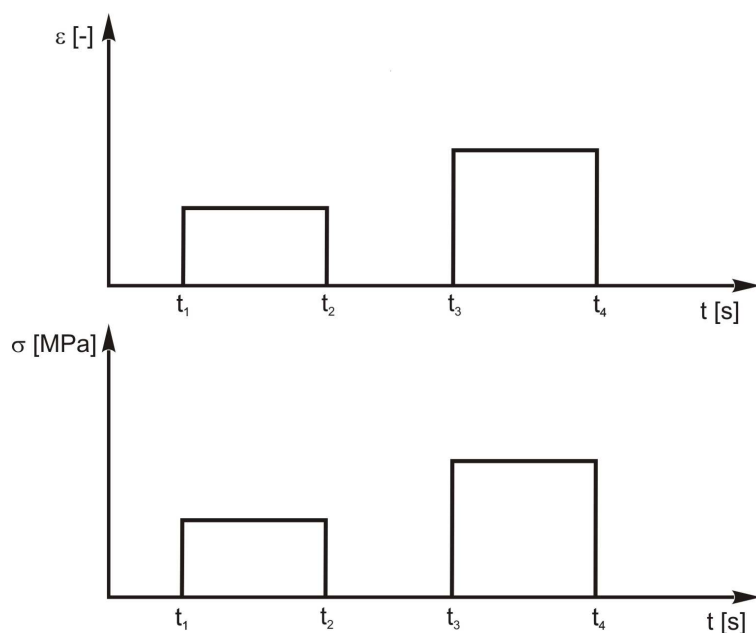
kde  $G$  modul pružnosti ve smyku [MPa]  
 $E$  modul pružnosti v tahu [MPa]

Obdobně, jako u modulu pružnosti v tahu  $E$  je definována jeho převrácená hodnota jako poddajnost v tahu  $D$ , je převrácená hodnota modulu pružnosti ve smyku  $G$  definována jako poddajnost ve smyku  $J$  [6] (viz rovnice 2.7).

$$J = \frac{\gamma}{\tau} = \frac{1}{G} \quad (2.7)$$

kde  $J$  poddajnost ve smyku [ $\text{MPa}^{-1}$ ]  
 $\tau$  smykové napětí [MPa]  
 $\gamma$  smyková deformace [-]  
 $G$  modul pružnosti ve smyku [MPa]

Čím větší má látka poddajnost, tím více se při stejně velkém napětí deformuje. Začne-li na těleso působit napětí, tak se okamžitě po zatížení atomy vykloní ze své klidové polohy a atomová vzdálenost se zvětší. Těleso se zdeformuje o určitou hodnotu a tato hodnota nezávisí na době působení síly. Po odlehčení atomy zaujmou opět svoji klidovou polohu a těleso se vrátí do původního tvaru [5]. Časový průběh deformace přesně odpovídá časovému průběhu napětí (viz obr.2.5).



Obr. 2.5 Závislost napětí a deformace na čase

### – Viskózní látka

Deformaci viskózní látky lze definovat jako tok o konstantní rychlosti závislý na zatížení, který vzniká po ukončení počáteční pružné deformace. Při zkoušce v tahu se pozoruje u polymerů téměř ve všech případech tok, který je sice malý, ale vždy znatelný. Konstantní rychlost toku lze pozorovat zvláště u velkých zatížení. Protože po odlehčení tato část deformace zůstává zachována, jde o nevratný tok. Toto lze vysvětlit pomocí reologického modelu pístu a válce. Účinkem vnějšího napětí se píst ve viskózní kapalině pohybuje po celou dobu, po kterou toto napětí působí. Dodaná energie se spotřebovává na překonání vnitřního tření (tedy viskozity) kapaliny. Deformační děj je z energetického hlediska zcela ztrátový. Po odlehčení se poloha pístu nemění, protože již těleso nemá energii pro návrat do původního stavu. Z toho plyne, že viskózní

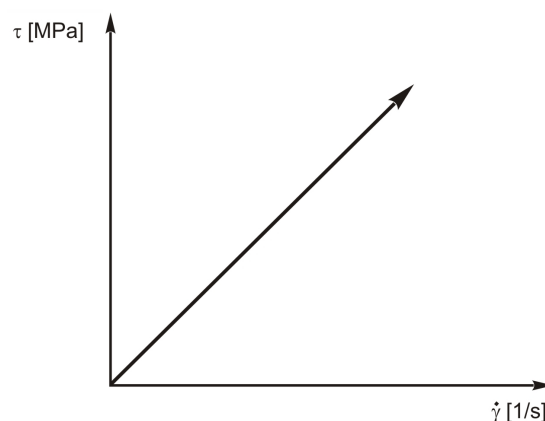


(Newtonovská) kapalina není schopna akumulovat energii. Bude-li viskózní kapalina vystavena vnějšímu namáhání, bude její deformace odvislá od deformační historie – tzn. látka „má paměť.“ Smykové napětí  $\tau$  je lineární funkcí rychlosti deformace  $\dot{\gamma}$  (obr. 2.6), tedy platí Newtonův zákon [6],[8],[9], (viz rovnice 2.8).

$$\tau = \eta \cdot \frac{d\gamma}{dt} \quad (2.8)$$

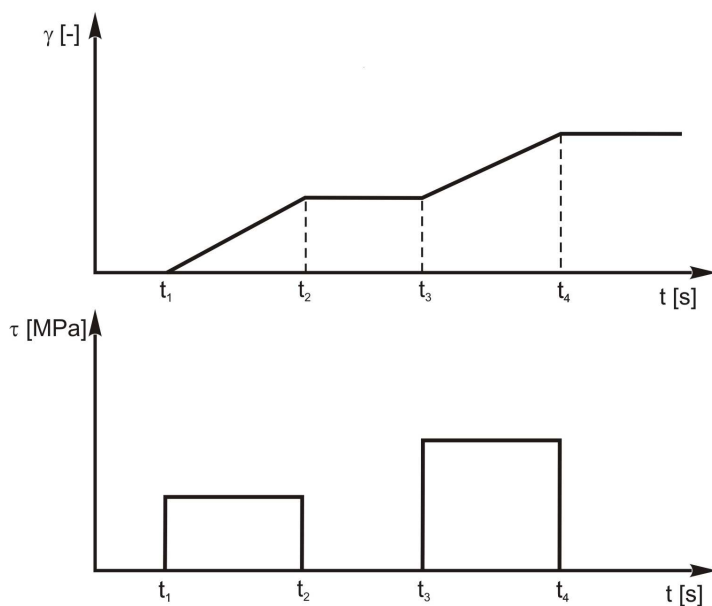
kde  $\tau$       smykové napětí [MPa]  
 $\eta$       dynamická viskozita kapaliny [Pa.s]  
 $\frac{d\gamma}{dt}$       rychlost deformace [ $s^{-1}$ ]

Celková deformace ideálně viskózní kapaliny závisí jak na hodnotě smykového napětí, tak i na době působení síly. Pro chování kapaliny je rozhodující hodnota dynamické viskozity  $\eta$ , která je při dané teplotě materiálovou konstantou, nezávislou na rychlosti deformace ani na čase, ale mění se s teplotou. Z rovnice (2.8) také vyplývá, že čím je vyšší rychlost smykové deformace, tím větší napětí vzniká v ideálním pístu a tím větší odpor klade píst proti posunutí [6].



Obr. 2.6 Smykové napětí  $\tau$  je lineární funkcí rychlosti deformace  $\dot{\gamma}$  [6]

Časový průběh deformace neodpovídá přesně časovému průběhu napětí, jako tomu bylo u ideálně elastické látky. Tento průběh je pro viskózní kapalinu uveden na obr. 2.7.



Obr. 2.7 Průběh napětí a deformace ideálně viskózní kapaliny

Začne-li v čase  $t_1$  působit na těleso napětí  $\tau$ , začne rovnoměrně narůstat deformace. Pokud se v čase  $t_2$  přestane s působením napětí, deformace se ustaví na určitou hodnotu a nebude již dále narůstat. Začne-li se opět v čase  $t_3$  s působením napětí, deformace bude opět narůstat, a to až do času  $t_4$ , kdy přestane působit napětí  $\tau$ . Deformaci lze vyjádřit úpravou Newtonova zákona (viz rovnice 2.8) vztahem (2.9) [6]:

$$\gamma = \frac{\tau}{\eta} \cdot t \quad (2.9)$$

kde  $\gamma$  smyková deformace [-]  
 $\tau$  smykové napětí [MPa]  
 $\eta$  dynamická viskozita kapaliny [Pa.s]  
 $t$  čas [s]

Modul pružnosti ve smyku a poddajnost ve smyku jsou pro viskózní látku závislé na čase [6] (viz rovnice 2.10).

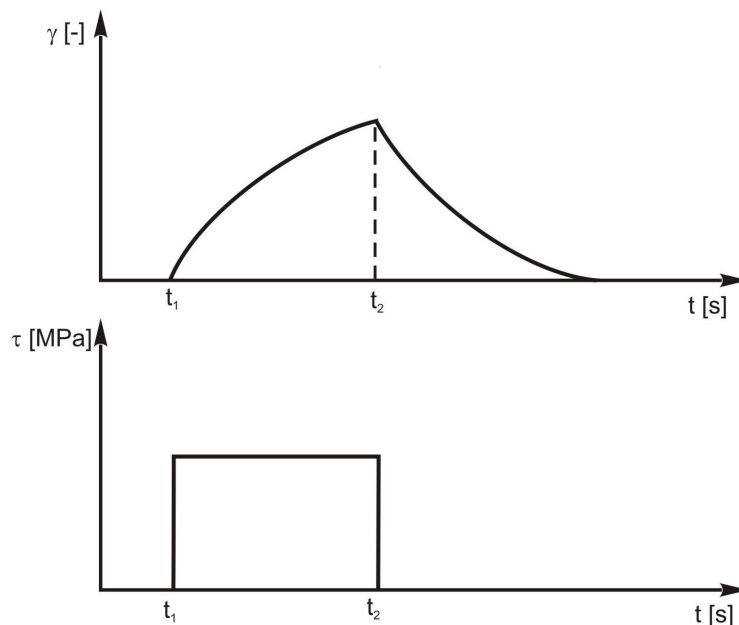
$$J(t) = \frac{1}{G(t)} = \frac{1}{\eta} \cdot t \quad (2.10)$$

kde  $J(t)$  poddajnost ve smyku závislá na čase [ $\text{MPa}^{-1}$ ]  
 $G(t)$  modul pružnosti ve smyku závislý na čase [MPa]  
 $\eta$  dynamická viskozita kapaliny [Pa.s]  
 $t$  čas [s]

### 2.1.3 Zpožděně elastická složka

Ideální látky, které byly popsány v kap. 2.1.2, se v reálných podmínkách nevyskytují. U polymerů, při vnějším namáhání, deformace zahrnuje vždy složku elastickou i plastickou, tedy viskózní tok a zároveň se ještě projevuje složka zpožděně elastické deformace.

Při mechanickém namáhání pod mezí kluzu se krystalické oblasti chovají v podstatě elasticky a v amorfních oblastech dochází k viskóznímu toku. Ale látka, jako celek vykazuje současně oba typy chování [6] – proto se chová viskoelasticky, vykazuje tedy viskoelastickou deformaci závislou na teplotě a rychlosti namáhání. Narozdíl od elastické deformace se neprojevuje okamžitě po zatížení tělesa, ale zpožděně, proto je také nazývána jako zpožděně elastická deformace. Tato deformace postupně narůstá s časem a nastane-li odlehčení materiálu, nevymizí tato deformace okamžitě, ale postupně s časem (viz obr. 2.8). Doba návratu však závisí na druhu materiálu a u některých polymerů může být značně dlouhá. Pro popsání zpožděně elastické deformace slouží Kelvinův model (viz obr. 2.9), který je vytvořený paralelním spojením již zmiňovaných schémat, tedy pružiny a pístu s válcem, který je naplněn viskózní kapalinou [5],[10].



Obr. 2.8 Průběh napětí a zpožděně elastické deformace

Pro Kelvinův model platí, že deformace od jednotlivých modelů jsou rovny deformaci celkové [2] (viz rovnice 2.11):



$$\gamma = \gamma_{pružiny} = \gamma_{pístu} \quad (2.11)$$

kde  $\gamma$  celková smyková deformace modelu [-]  
 $\gamma_{pístu}$  smyková deformace pístu [-]  
 $\gamma_{pružiny}$  smyková deformace pružiny [-]

Pro smykové napětí platí, že součet od jednotlivých reologických modelů bude roven celkovému smykovému napětí [2] (viz rovnice 2.12):

$$\tau = \tau_{pružiny} + \tau_{pružiny} \quad (2.12)$$

kde  $\tau$  smykové napětí [MPa]  
 $\tau_{pružiny}$  smykové napětí na pružině [MPa]  
 $\tau_{pístu}$  smykové napětí na pístu [MPa]

Úpravou rovnice (2.4),(2.8) a (2.12) je výsledné smykové napětí pro Kelvinův model definováno rovnicí (2.13)

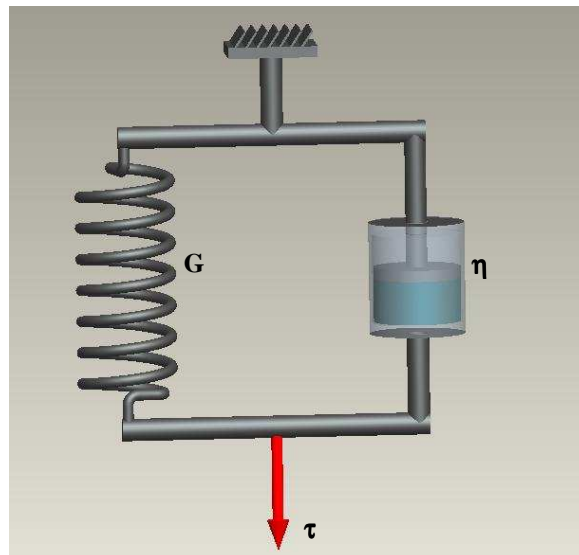
$$\tau = \gamma \cdot G + \eta \cdot \frac{d\gamma}{dt} \quad (2.13)$$

kde  $\gamma$  smyková deformace [-]  
 $\tau$  smykové napětí [MPa]  
 $\eta$  dynamická viskozita kapaliny [Pa.s]  
 $G$  modul pružnosti ve smyku [MPa]  
 $t$  čas [s]

Po úpravě a vyjádření je výsledná smyková deformace z rovnice (2.13) vyjádřena vztahem (2.14)

$$\gamma = \frac{\tau}{G} \cdot \left(1 - e^{-\frac{G}{\eta}t}\right) \quad (2.14)$$

kde  $\gamma$  smyková deformace [-]  
 $\tau$  smykové napětí [MPa]  
 $\eta$  dynamická viskozita kapaliny [Pa.s]  
 $G$  modul pružnosti ve smyku [MPa]  
 $t$  čas [s]



Obr. 2.8 Kelvinův model

$G$  - modul pružiny [MPa],  $\eta$  - viskozita kapaliny ve válci [Pa.s],  $\tau$  - smykové napětí [MPa]

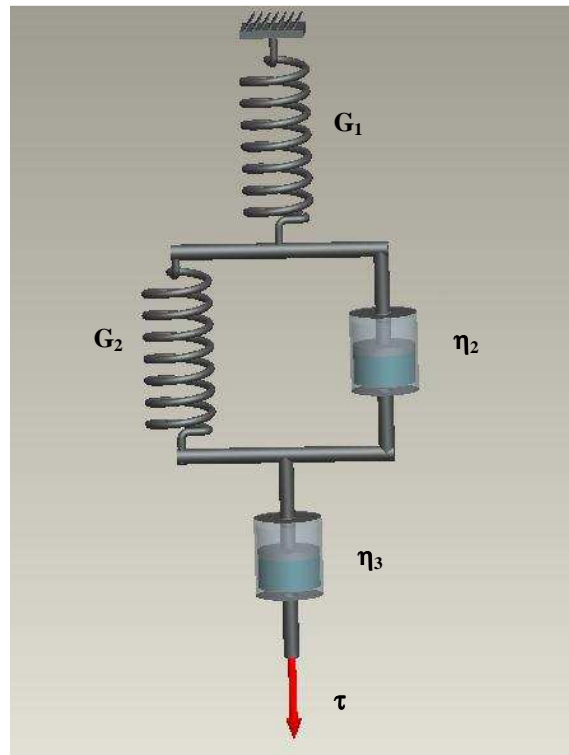
#### 2.1.4 Reálná deformace

Chování reálného polymerního tělesa lze během zatěžování ve zjednodušené formě popsat pomocí Tucketova modelu (viz obr. 2.10). Tento model se skládá ze všech výše popsaných schémat, tedy z pružiny (viz obr. 2.1), představující ideální elastickou deformaci valenčních úhlů, vazeb a mezimolekulárních vzdáleností, z Kelvinova modelu (viz obr.2.8), který představuje zpožděně elastickou deformaci polymerních makromolekul a z pístu (viz obr. 2.2), který popisuje plastickou nevratnou deformaci makromolekul (tok). Celková deformace modelu  $\gamma_c$  (viz rovnice 2.15) je součtem dílčích deformací od jednotlivých modelů, které byly již popsány [10].

$$\gamma_c = \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 = \frac{\tau}{G_1} + \frac{\tau}{G_2} (1 - e^{-\frac{t \cdot G_2}{\eta_2}}) + \frac{\tau}{\eta_3} \cdot t \quad (2.15)$$

kde	$\gamma_c$	celková smyková deformace [-]
	$\gamma_1$	elastická smyková deformace [-]
	$\gamma_2$	zpožděně elastická smyková deformace [-]
	$\gamma_3$	plastická smyková deformace [-]
	$\tau$	smykové napětí [MPa]
	$G_1$	modul pružnosti ve smyku elastické složky [MPa]
	$G_2$	modul pružnosti ve smyku zpožděně elastické složky [MPa]

- $\eta_2$  dynamická viskozita kapaliny u zpožděně elastické složky [Pa.s]  
 $\eta_3$  dynamická viskozita kapaliny u plastické složky [Pa.s]  
 $t$  čas [s]



Obr. 2.10 Tucketův model

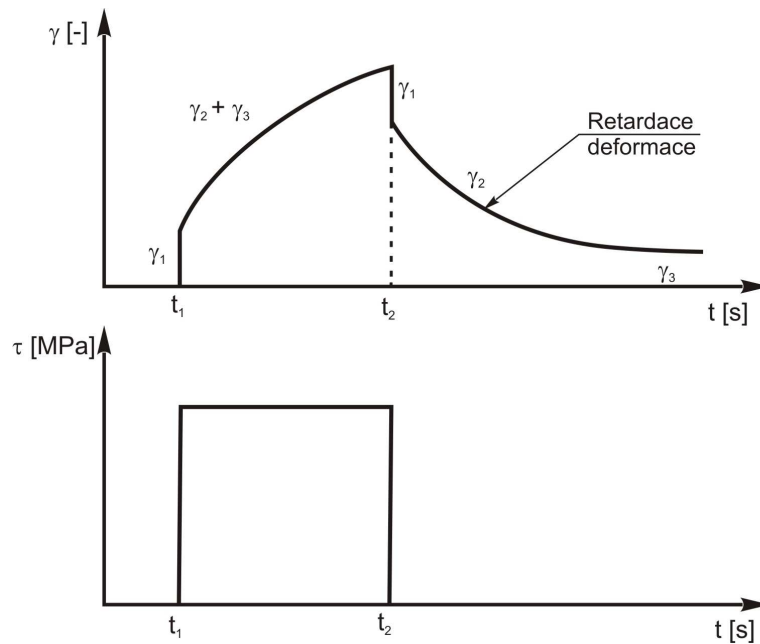
$G_i$  - modul pružiny [MPa],  $\eta_i$  - viskozita kapaliny ve válci [Pa.s],  $\tau$  - smykové napětí [MPa]

Pokud začne na těleso působit smykové napětí  $\tau$  v čase  $t_1$ , dojde okamžitě k elastické deformaci  $\gamma_1$ , bude-li napětí dále působit, začne s časem narůstat také deformace zpožděně elastická  $\gamma_2$  a deformace plastická  $\gamma_3$ . Dojde-li v čase  $t_2$  ke zrušení napětí  $\tau$ , okamžitě vymizí deformace  $\gamma_1$ . Dále s postupem času bude odeznívat rovněž deformace zpožděně elastická  $\gamma_2$  (oblast tzv. retardace deformace). Celková deformace se ale po určité době ustaví na hodnotě deformace plastické  $\gamma_3$ , která je dokonale nevratnou (viz obr. 2.11) [5].

Hodnotu zpožděně elastické deformace v kterékoli době, kdy již na těleso nepůsobí žádné napětí  $\tau$  ( $\tau=0$ ), lze odvodit z Kelvinova modelu [3] (viz rovnice 2.16).

$$\gamma(t) = \gamma_0 \cdot e^{-\frac{G}{\eta}t} \quad (2.16)$$

- kde  $\gamma(t)$  smyková deformace závislá na čase [-]  
 $\gamma_0$  velikost smykové deformace před zrušením napětí [-]  
 $\eta$  dynamická viskozita kapaliny [Pa.s]  
 $G$  modul pružnosti ve smyku [MPa]  
 $t$  čas [s]



Obr. 2.11 Průběh deformace reálného polymeru

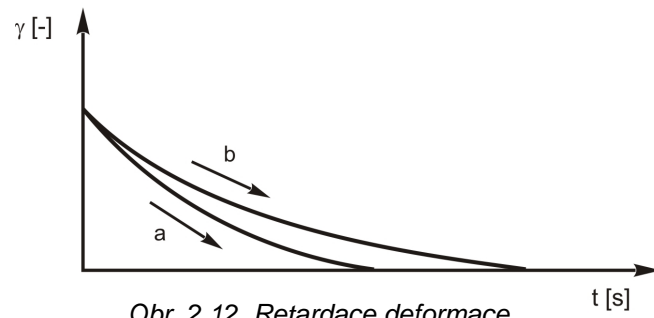
Retardace deformace, nebo-li postupné vymizení deformace při nulovém napětí, jak je patrné na obr. 2.12 a dle rovnice (2.16), probíhá po exponenciální křivce. Ve skutečnosti, při odlehčení reálných polymerních látek, však tento proces probíhá pomaleji, jak lze pozorovat na srovnání u obr. 2.12, kde křivka označená písmenem „a“ znázorňuje postupné uvolňování deformace dle Kelvinova modelu a křivka „b“ označuje uvolňování deformace u reálné polymerní látky. Aby se jednoduchý Tucketův model přiblížil skutečným deformačním křivkám polymerů, kombinuje se několik Kelvinových modelů za sebou - vzniká tak tzv. modelové spektrum (viz obr. 2.13). Jednotlivé Kelvinovy modely se od sebe vzájemně odlišují rozdílnými hodnotami relaxačních dob. Relaxační doba se dá určit z rovnice (2.15) [6],[9] (viz rovnice 2.17)

$$t = \frac{\eta}{G} \quad (2.17)$$

- kde  $\eta$  dynamická viskozita kapaliny [Pa.s]

G modul pružnosti ve smyku [MPa]

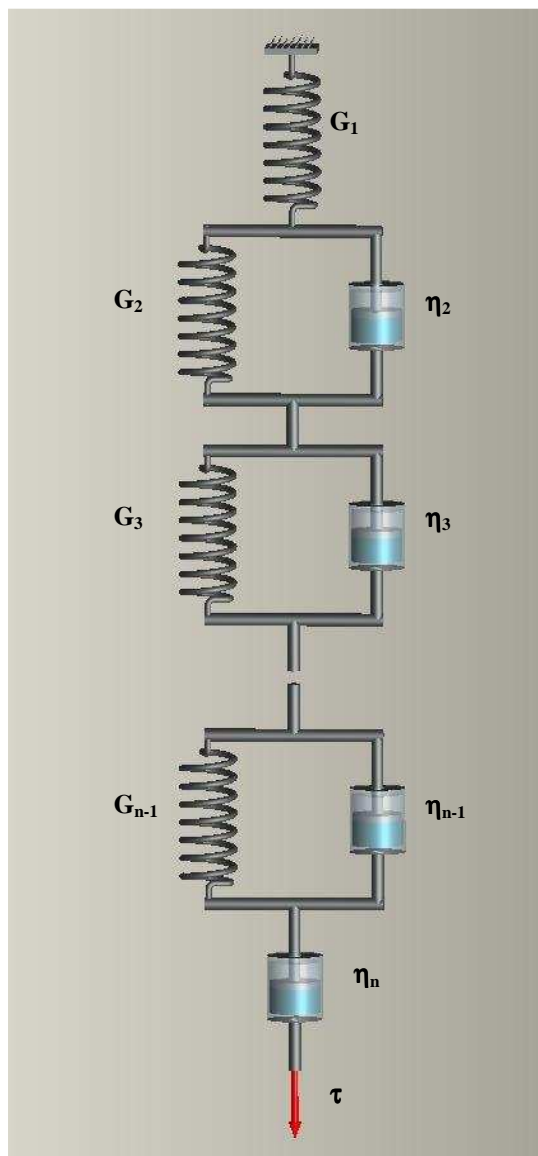
t čas [s]



Obr. 2.12 Retardace deformace

a...postupné uvolňování deformace dle Kelvinova modelu,

b...uvolňování deformace reálné polymerní látky



Obr. 2.13 Modelové spektrum

$G_i$  - modul pružiny [MPa],  $\eta_i$  - viskozita kapaliny ve válci [Pa.s],  $\tau$  - smykové napětí [MPa]

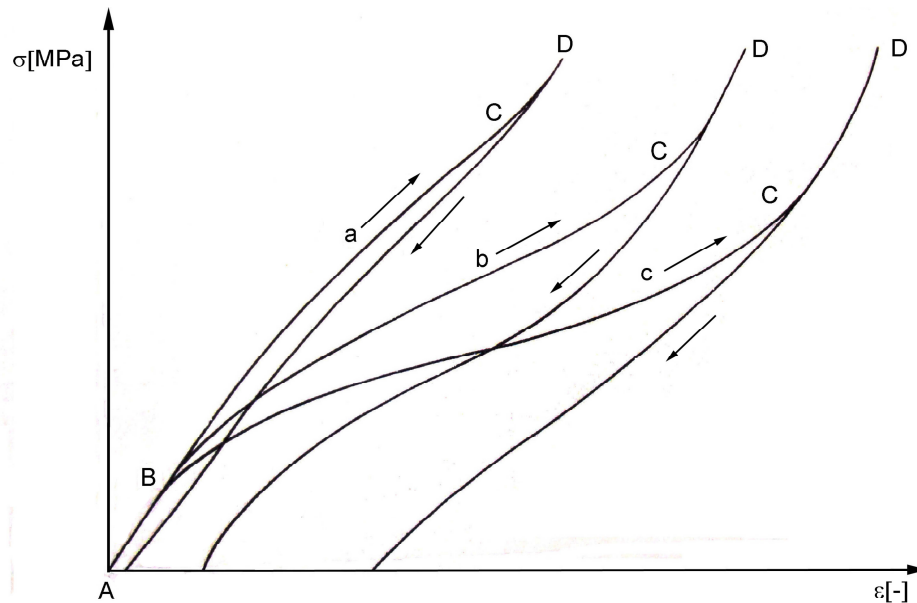


Míra viskoelastického chování polymerních materiálů při dané teplotě a rychlosti zatěžování je určena také materiálem, tj. jeho chemickým složením a jeho strukturou (molekulární a nadmolekulární) [8].

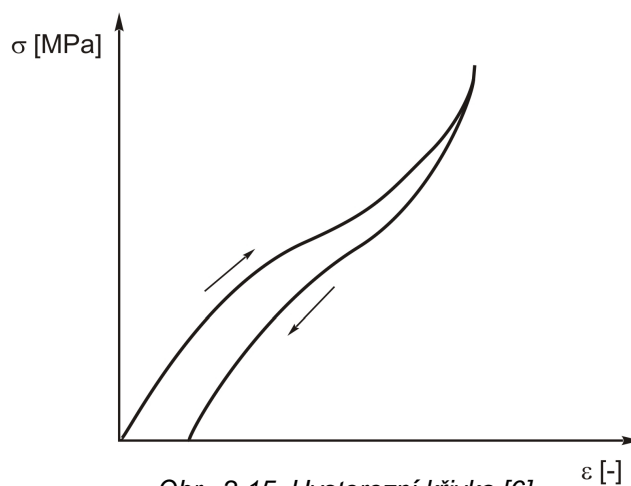
Mezi praktické důsledky viskoelastického chování polymerů patří především kríp, relaxace napětí, apod. [9].

### **2.1.5 Závislost mezi tahovým napětím a deformací**

Závislost mezi tahovým napětím  $\sigma$  a deformací  $\varepsilon$  se označuje jako tahová křivka a získává se prostřednictvím trhacích strojů při konstantní rychlosti deformace. Na obr. 2.14 je uvedena tahová křivka pro tři různé rychlosti deformace polymeru. Křivka označená jako „a“ odpovídá největší rychlosti deformace, „b“ střední rychlosti deformace a „c“ nejmenší rychlosti deformace. Mezi body A a B je dokonale pružná deformace, dále se zde mezi body B a C projevuje tok, který vede k odchýlkám od lineárního chování a při vyšších hodnotách zatížení lze mezi body C a D pozorovat zvýšení tuhosti materiálu. Na obr. 2.14 je rovněž znázorněn průběh napětí při odlehčení zkoušeného materiálu a tyto průběhy se od sebe navzájem liší. Protahuje-li se vzorek určitou, předem zvolenou hodnotu deformace (bod D), pak při opětně klesající deformaci neklesá napětí po téže křivce, ale je v celém rozsahu nižší. Mezi oběma křivkami vzniká tzv. hysterezní smyčka (viz obr. 2.15), která je mírou ztrát deformační energie a její přeměny v teplo. U houževnatých materiálů, jako jsou např. kaučuky, kde se projeví dlouhé relaxační doby nebo nevratné deformace, se křivka nevrátí do počátku, ale zůstane posunuta o určitou hodnotu plastické deformace [6], [8].



Obr. 2.14 Tahové křivky [8]  
a,b,c....značí rychlosti zatěžování ( $a>b>c$ )



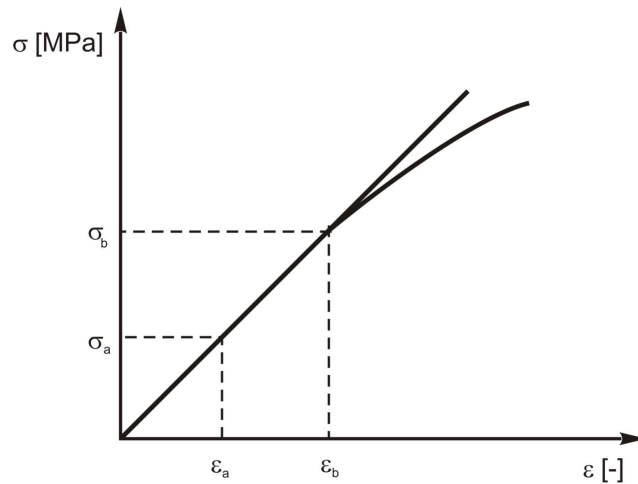
Obr. 2.15 Hysterezní křivka [6]

### 2.1.6 Linearita viskoelastických vlastností

Linearitou elastických vlastností rozumíme stav, kdy u ideálně elastických látek, jejichž deformační chování není závislé na čase, je poměr mezi napětím a deformací konstantní (viz obr. 2.16), tedy platí rovnice (2.18) [6].

$$\frac{\sigma_a}{\varepsilon_a} = \frac{\sigma_b}{\varepsilon_b} = konst \quad (2.18)$$

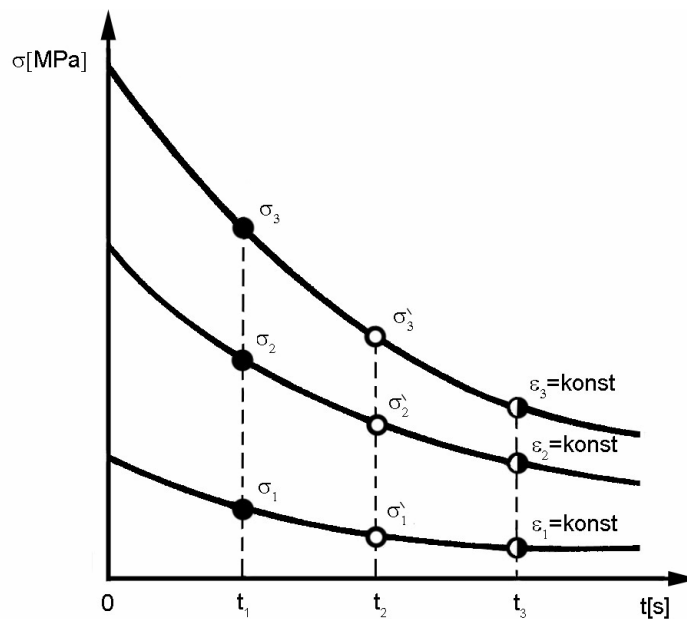
kde:  $\sigma$       napětí (síla na jednotku plochy) [MPa]  
       $\varepsilon$       deformace [-]



Obr. 2.16 Mez linearity u elastických látek [6]

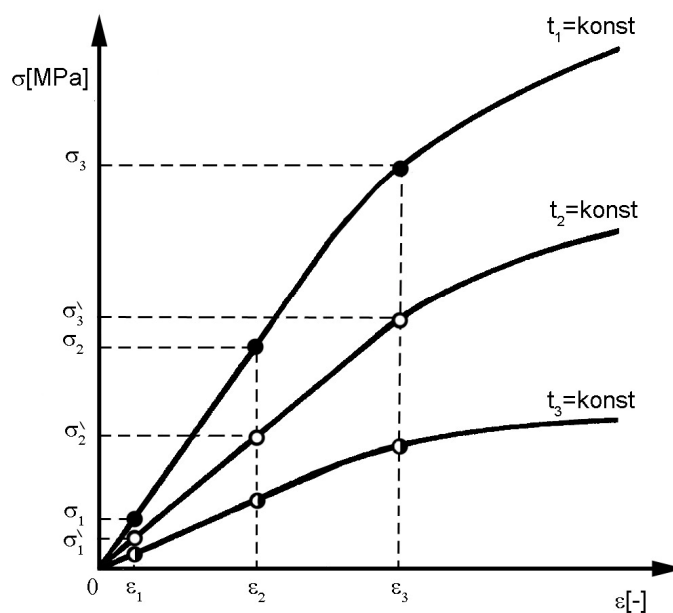
Tato skutečnost již byla uvedena u chování ideálně elastických látek. Přestane-li být poměr mezi napětím a deformací konstantní, byla u látky překročena mez linearity. Toto je znázorněno na obr. 2.16, kdy po překročení napětí  $\sigma_b$  a deformace  $\varepsilon_b$  nastává odklon od linearity a přestává platit Hookův zákon [6].

Mez linearity se dá určit i u látek, jejichž deformační chování je na čase závislé, a to pomocí relaxačních křivek (viz obr. 2.17) a izochronních (viz obr. 2.18). Pro sestavení relaxačních křivek je zapotřebí závislost napětí na čase při různých hodnotách deformace. Aby bylo možné určit mez linearity, naměřené hodnoty se vynesou do závislosti izochronních napětí na deformaci a to pro různé hodnoty konstantních časů [6], [11].



Obr. 2.17 Relaxační křivky při různých hodnotách konstantní deformace [6]

(Pro konstantní deformaci platí  $\varepsilon_1 < \varepsilon_2 < \varepsilon_3$ )



Obr. 2.18 Závislost izochronního napětí na deformaci [6]  
(Pro konstantní hodnoty času platí  $t_1 < t_2 < t_3$ )

Přímá úměrnost, která platí až do meze linearity  $\varepsilon_1$ , se dá zapsat ve tvaru (2.19):

$$\sigma(t) = G_o(t) \cdot \varepsilon_o \quad (2.19)$$

kde:  $\sigma(t)$  napětí závislé na čase [MPa]

$\varepsilon_o$  deformace [-]

$G_o(t)$  izochronní relaxační modul [MPa]

Tato rovnice představuje zobecnění Hookova zákona pro viskoelastickou látku.  $G_o$  se v tomto případě nazývá izochronní relaxační modul. V lineární oblasti je konstantní, tedy není závislý na velikosti napětí, či deformaci [6],[11].

### 2.1.7 Nelineární viskoelastické chování

V případě velkých deformací je viskoelastické chování obecně funkcí času a použité deformace. Jestliže aplikační použití materiálu má být v nelineární viskoelastické oblasti, hrozí nebezpečí, že použité deformace, resp. napětí, mohou vyvolávat nevratné změny, které vedou v konečné fázi k destrukci tělesa. Popis nelineárního chování polymerů lze popsat násobným integrálem, který je zde pro informaci uveden v rovnici (2.20) [2] :

$$\gamma(t, \sigma) = \int_0^t J_1(t-x_1) \left[ \frac{d\sigma(x_1)}{dx_1} \right] dx_1 + \int_0^t \int_0^t J_2(t-x_1, t-x_2) \left[ \frac{d\sigma(x_1)}{dx_1} \right] \left[ \frac{d\sigma(x_2)}{dx_2} \right] dx_1 dx_2 + \dots \quad (2.20)$$

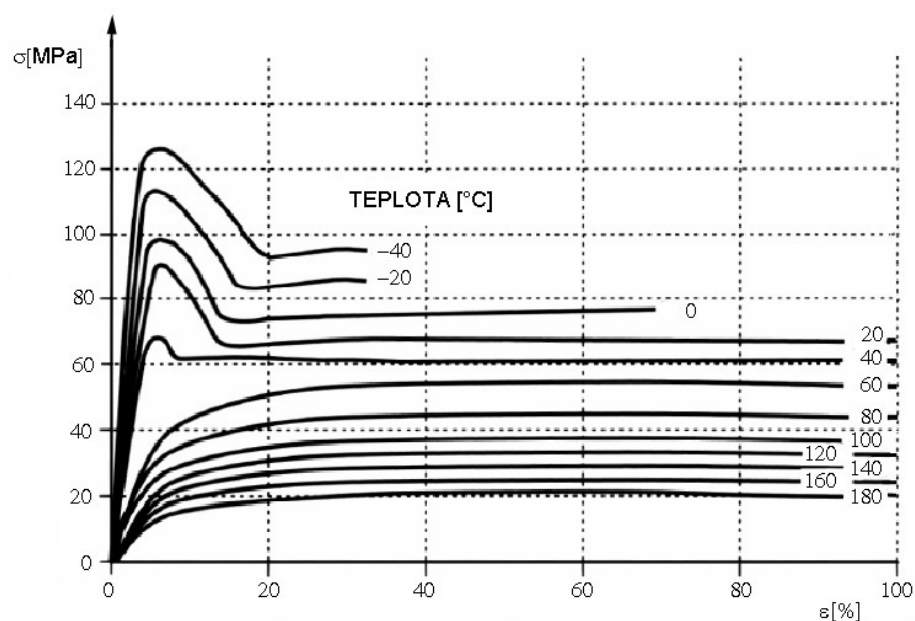
kde:  $\gamma(t, \sigma)$  smyková deformace závislá na čase  $t$  a napětí  $\sigma$  [-]

$J_i$  smyková poddajnost [ $\text{MPa}^{-1}$ ]

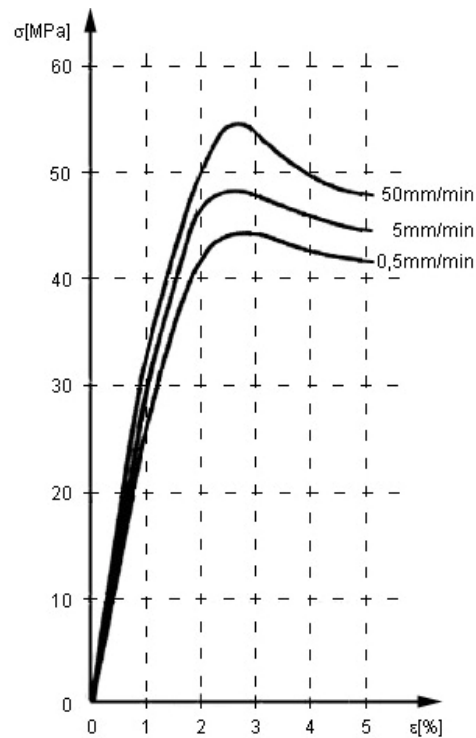
$t$  čas [s]

## 2.2 Tahové vlastnosti plastů

Při zkoušení plastových materiálů jsou některé vlastnosti méně či více důležité. Předpokladem pro definování jejich důležitosti je skutečnost, k čemu budou jednotlivé materiály v budoucnu použity a jak budou namáhány, tedy zda budou vystaveny mechanickému namáhání, povětrnosti, agresivnímu prostředí, či na ně budou působit zvýšené teploty nebo jiné vlivy, které by mohly ovlivnit životnost materiálu. Při tahové zkoušce lze získat určité parametry potřebné k vytvoření potřebného spektra vlastností daného materiálu. Hodnoty měřených tahových vlastností se mohou lišit v závislosti na chemickém složení polymerního materiálu, na způsobu přípravy materiálu, na tvaru makromolekul, na velikosti mezimolekulárních sil, na nadmolekulární struktuře, na použitých aditivních prvcích i na prostředí, v němž jsou zkoušky prováděny, tj. na teplotě (viz obr. 2.19) a relativní vlhkosti prostředí, ale také na geometrii zkušebního tělesa, době a rychlosti zatěžování (viz obr. 2.20).



Obr. 2.19 Tahová zkouška v závislosti na rozdílné teplotě [12]



Obr. 2.20 Tahová zkouška v závislosti na rychlosti deformace [12]

Z tahové zkoušky jsou zjišťovány následující hodnoty:

– **Napětí v tahu**

tj. tahová síla vztažená na jednotku plochy původního průřezu pracovní části zkušební tělesa, působící na těleso během zkoušky [13] (viz rovnice 2.21).

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad (2.21)$$

kde:  $\sigma$       napětí [MPa]

$F$         síla [N]

$S_0$       plocha počátečního příčného průřezu [ $\text{mm}^2$ ]

Rozlišuje se napětí na mezi kluzu  $\sigma_y$  (místo, ve kterém křivka poprvé vykáže spojitý vzrůst deformace, aniž by došlo k růstu zatížení [14]), napětí v tahu při přetržení  $\sigma_B$  a napětí v tahu na mezi pevnosti  $\sigma_M$  (maximální napětí, které působilo na zkušební těleso během zkoušky).

– **Poměrné prodloužení**

Z deformačních charakteristik se určuje poměrné prodloužení, které je definováno jako protažení zkoušeného vzorku, vztažené k počáteční měřené



délce tělesa a vyjadřuje se buďto jako bezrozměrný poměr, či se uvádí v procentech [13] (viz rovnice 2.22).

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_0}{L_0} \cdot 100 \quad (2.22)$$

kde:  $\varepsilon$       vyhodnocovaná hodnota poměrného prodloužení [%]  
 $\Delta L_0$       zvětšení délky zkušebního tělesa mezi značkami vyznačujícími počáteční měřenou délku [mm]  
 $L_0$       počáteční měřená délka zkušebního tělesa [mm]

Rovněž i poměrné prodloužení je stanovováno na mezi kluzu  $\varepsilon_y$ , pevnosti  $\varepsilon_M$  a při přetržení  $\varepsilon_B$ . Podle typu polymeru zahrnuje prodloužení při přetržení jen elastické deformace (elastomery) nebo naopak převážně deformace trvalé (semikrystalické a některé amorfny plasty) [10].

#### – Zúžení

Při tahu dochází jednak k prodlužování vzorku, ale současně také dochází k zužování příčného průřezu. Hodnota zúžení je dána vztahem (2.23) [15].

$$Z = \frac{\Delta S}{S_0} \cdot 100 \quad (2.23)$$

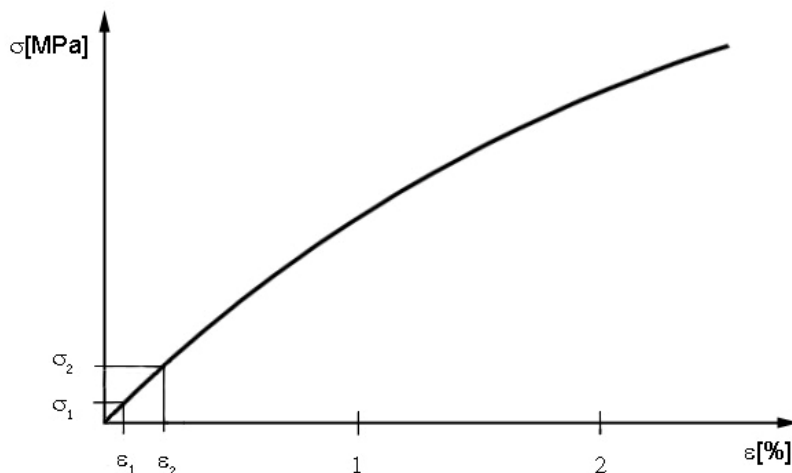
kde:  $Z$       zúžení (kontrakce) [%]  
 $\Delta S$       změna průřezu [mm<sup>2</sup>]  
 $S_0$       počáteční hodnota průřezu [mm<sup>2</sup>]

#### – Modul pružnosti v tahu

Modul pružnosti v tahu, také nazývaný Youngův modul pružnosti, poprvé formuloval v roce 1802 britský fyzik, egyptolog a lékař Thomas Young [16].

Viskoelastické chování polymerních materiálů způsobuje u tahových vlastností většiny polymerů nelineární průběh křivek napětí/poměrné prodloužení i v oblasti lineární viskoelastivity. Proto metoda měření modulu pružnosti v tahu vychází ze dvou daných hodnot poměrných prodloužení, tedy 0,05 a 0,25 % (viz obr. 2.21). Nižší z hodnot poměrného prodloužení nebyla zvolena na nule, aby byly eliminovány chyby při měření modulu, způsobené možnými náběhovými efekty tahové křivky [13] (viz rovnice 2.24). Je-li zakřivení

velmi malé, pak lze počítat se zdánlivě lineárním průběhem a vyhodnotit graficky zdánlivý (sekantový) modul pružnosti při smluvní hodnotě deformace, odkud se vede rovnoběžka s počáteční směrnicí. Bod, kde se protne rovnoběžka s křivkou, se pak spojí přímkou s počátkem a směrnice této sečny udává hodnotu zdánlivého modulu. U křehkých nebo velmi tvrdých materiálů, kde se dosáhne velkým napětím malé deformace, se vzhledem k nepřesnosti výpočtu stanovuje modul pružnosti z jiných deformačních zkoušek [14].



Obr. 2.21 Určení modulu pružnosti v tahu [13]

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (2.24)$$

kde: E      modul pružnosti v tahu [MPa]  
       $\sigma_1$     napětí měřené při  $\varepsilon_1=0,0005$  [MPa]  
       $\sigma_2$     napětí měřené při  $\varepsilon_2=0,0025$  [MPa]

## 2.3 Měření deformace

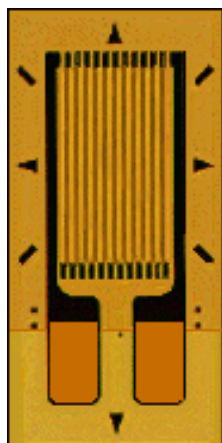
Pro měření deformace se v současné době využívá velké množství přístrojů. Tyto přístroje jsou založeny buď na kontaktním či bezkontaktním měření.

### 2.3.1 Kontaktní měření deformace

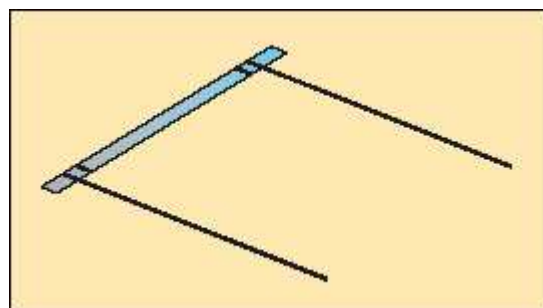
Do skupiny přístrojů, které jsou založeny na kontaktním měření deformací, patří elektrické snímače a mechanické extenzometry.



Mezi elektrické snímače deformace patří tenzometry, což jsou přístroje pro měření mechanického namáhání způsobeného tahem a jím vyvolaným mechanickým napětím. Tenzometr byl objeven v roce 1938 Edwardem E. Simmonsem a Arthurem C. Rugem a poprvé byl použit pro měření deformace součástek lokomotiv [16]. Základní dělení tenzometrů je na kovové (viz obr. 2.22) a polovodičové (viz obr. 2.23) tenzometry. Kovové tenzometry se dále dělí na drátkové, fóliové a vrstvené. Polovodičové mohou být buď ve formě tenkých monokrystalových pásků o tloušťce mezi 10  $\mu\text{m}$  až 20  $\mu\text{m}$  nebo jako napařená polykrystalická vrstva. Kovové i polovodičové tenzometry napájené stejnosměrným nebo střídavým proudem mění ohmický odpor, jsou-li vystaveny mechanické deformaci působené měřenou veličinou. U kovových tenzometrů je změna ohmického odporu způsobena změnou průřezu drátku (fólie) měřicí mřížky a její délky, u polovodičových tenzometrů (ve tvaru tyčinky) je způsobena především změnou jejího měrného odporu [17], [18], [19].

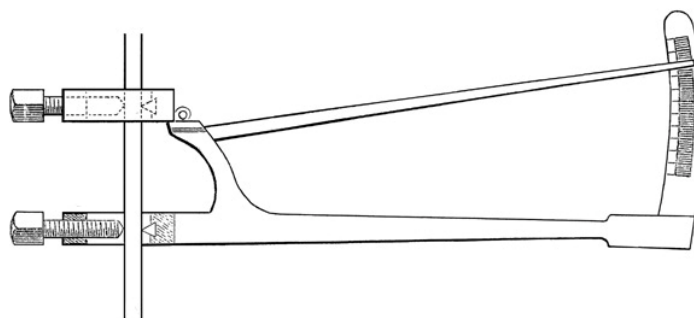


Obr. 2.22 Kovový tenzometr [18]



Obr. 2.23 Polovodičový tenzometr [18]

Další možností analýzy deformace prostřednictvím kontaktní metody měření je použití mechanických extenzometrů (průtahoměrů). Extenzometr (viz obr. 2.24) byl vynalezen Dr. Charlesem Hustonem, který metodu měření popsal poprvé v roce 1879 [19]. Název extenzometr pochází z angličtiny „extension-meter“. Mechanické extenzometry mohou být manuální, či automatické. Výhodou je poměr pořizovací ceny a vysoké přesnosti při měření [16].



Obr. 2.24 Mechanický extenzometr [16]

### 2.3.2 Bezkontaktní měření deformace

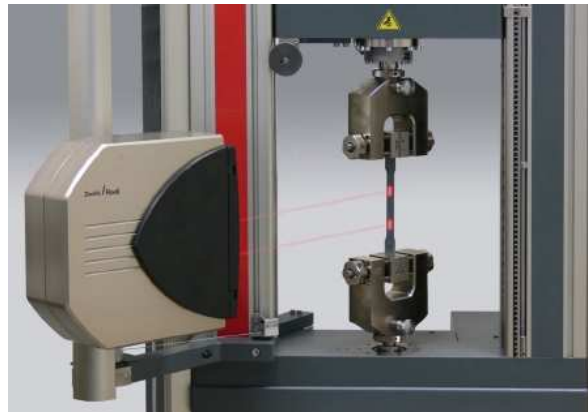
Mezi přístroje, které pracují na bezkontaktní metodě měření deformace, patří optické a laserové extenzometry, laserové, ultrazvukové a optické snímače deformace [20].

#### – Optický extenzometr

S optickými extenzometry lze měřit příčné i podélné deformace avšak jejich značnou nevýhodou je nutnost nanesení bodů či rysek, dle kterých se bude optický extenzometr během měření řídit. Výhodou je stále nižší pořizovací cena, než-li u extenzometru laserového [16].

#### – Laserový extenzometr

Výhodou laserového extenzometru (viz obr. 2.25) je absence rysek či bodů, dle kterých by se přístroj řídil. Přístroj využívá osvit povrchu vzorku ve dvou oblastech vzdálených od sebe na vzdálenost počáteční měřené délky světlem laserových zářičů. Je vhodný i pro zkoušení materiálu za zvýšených teplot či pro tenké materiály [16].



Obr. 2.25 Laserový extenzometr [16]

– **Laserový snímač deformace**

Měření spočívá v tom, že se kolmo proti předmětu vyše laserový paprsek, který se od něho odrazí a vrátí se zpět do skenovacího zařízení, kde se vyhodnotí deformace (viz obr. 2.26) [21].



Obr. 2.26 Laserový snímač Range 7 od společnosti Konica [21]

– **Ultrazvukový snímač deformace**

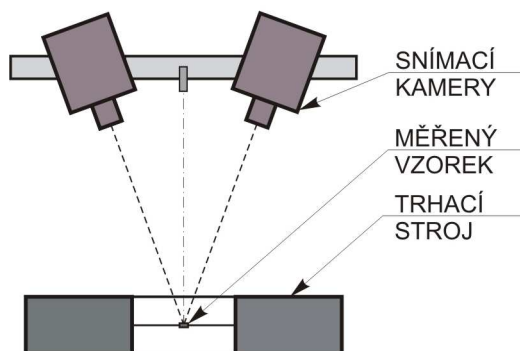
Snímání se provádí pomocí ultrazvukové sondy. Dosahuje se relativně malé přesnosti při snímání. Mezi klady však patří především vysoká rychlost měření [22].

– **Optický snímač deformace**

Výše zmíněné metody, tedy laserové a ultrazvukové snímače deformace, se nejčastěji používají pro zjištění deformací uvnitř deformovaného tělesa. Naproti tomu, optické metody jsou použitelné pouze pro snímání deformace plošné.

Výzkum vedoucí ke zlepšení měření deformace optickými cestami je v současnosti ve fázi rychlého rozvoje. Přesné, rychlé a nekontaktní optické metody měření jsou významné v mnoha aplikacích zahrnujících laboratorní měření, inspekci kvality, kontroly povrchů či vizuální systémy na montážních linkách. Tyto přístroje jsou založeny na principu snímání deformovaného tělesa

pomocí kamer (viz obr.2.27). Kamery jsou připojeny k počítači, který následně vypočte požadované souřadnice v 1D, ve 2D či ve 3D pomocí tzv. Image processingu [23].



Obr. 2.27 Optický senzor deformace

Jedním z výrobců optických 3D skenerů je německá společnost GOM mbH. Gesellschaft für Optische Messtechnik, čili společnost pro optickou měřicí techniku, která byla založena v roce 1990 oddělením se od Technické univerzity v Braunschweigu. Firma GOM vyrábí optické přístroje v několika variantách, a to pod označeními ATOS, ARAMIS, ARGUS, TRITOP, PONTOS a ESPI . Tato společnost má zastoupení i v České Republice a to firmou MCAE Systems, s.r.o. se sídlem v Brně. Pomocí 3D scanneru ATOS se dají generovat vysoce přesná plošná data. Naproti tomu systém TRITOP dodává přesná bodová data měřeného objektu. Systémy ARAMIS, ARGUS a PONTOS slouží k deformační, resp. pohybové analýze [24].

### 2.3.3 ARAMIS

ARAMIS (viz obr. 2.28) je bezkontaktní měřicí systém firmy GOM pro měření reálných 3D deformací. Výsledkem je barevná mapa rozložení deformací na objektu zatěžovaném buď staticky nebo dynamicky. Proces měření může být spouštěn v pravidelných časových intervalech (např. s prodlevou 1s) nebo může být řízen externím signálem (např. ze zatěžovacího stroje). Maximální rychlost snímání může být až 8000 snímků za sekundu (u systému HS). Při měření rotačních objektů se dá propojit více systémů ARAMIS do jednoho měřicího systému [25].



Obr. 2.28 ARAMIS [24]

Systém Aramis se k počítači připojí přes tzv. trigger box (viz obr. 2.29), který během měření slouží k nahrávání fotografií snímaných pomocí kamer. Fotografie se po skončení měření uloží do počítače, kde jsou dále zpracovány a vyhodnoceny. K trigger boxu, který obsahuje vlastní počítač se systémem Linux, je možné připojit maximálně 4 snímací kamery.



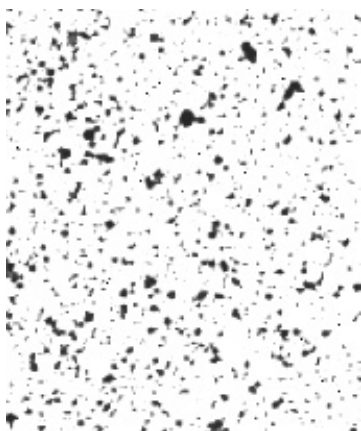
Obr. 2.29 Trigger box-přední část [26]

Mezi přednosti systému Aramis patří:

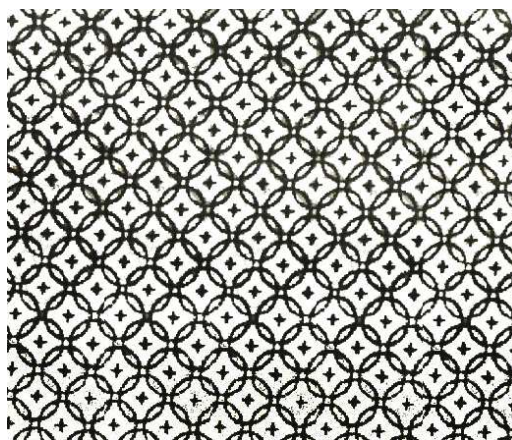
- velký rozsah měření (objekty od velikosti 1 mm do 1000 mm)
- rozsah měření deformace (od 0,05% až do stovek %)
- jednoduchá příprava povrchu objektu (náštřík může být pravidelný i náhodný)
- vysoká hustota naměřených dat (bodů na povrchu objektu)
- přehledná analýza výsledků měření (grafické vizualizace)

### Proces měření

Před začátkem měření deformace je na objekt nanesen kontrastní vzor (tzv. pattern), který se deformuje zároveň se zatěžovaným objektem. Objekt je pro každou úroveň zatížení snímán dvěma kamerami a ze snímků jsou pomocí image processingu vypočteny 3D souřadnice bodů ležících na povrchu objektu. Porovnáním odpovídajících si bodů v jednotlivých úrovních zatížení systém vypočítá 3D posuvy a následně tvar deformovaného objektu a 3D deformace [25]. Kontrastní vzor může mít dvě podoby: stochastickou - náhodnou (viz obr. 2.30) a regulární - pravidelnou (viz obr. 2.31).



Obr. 2.30 Stochastický pattern



Obr. 2.31 Pravidelný pattern [12]

Při používání optických snímačů deformace je výhodnější použít kontrastní šablonu stochastickou – náhodnou. Mezi hlavní důvody použití patří jednoduchost nanesení vzoru na díl, dále větší přesnost měření, protože si snímač k jednotlivým bodům přiřadí určitý odstín šedi a je téměř vyloučeno, že by na vzorku existovala dvě shodná místa se stejným shlukem bodů. Po následné deformaci je dále snazší identifikace deformovaných bodů a jejich následné vyhodnocení. Pro vytvoření stochastického vzoru existuje několik metod, mezi něž např. patří: leptání elektrochemicky či laserově, nanášení barev nebo nalisování. Výsledkem měření jsou:

- hodnoty 3D posunutí bodů na povrchu objektu
- hodnoty 3D deformace měřené na povrchu objektu
- tvar objektu v jednotlivých fázích deformace
- hodnoty změny tloušťky materiálu (např. u plechů)



- grafické nebo tabulkové výstupy naměřených hodnot

Mezi oblasti využití systému Aramis lze řadit oblasti zabývající se:

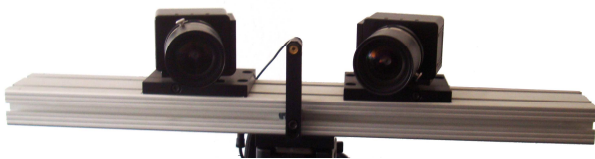
- dimenzováním součástí
- zkouškami materiálů
- testováním nových materiálů
- výpočty stability
- zkoumáním materiálu v nelineárních oblastech deformace
- zjišťováním materiálových vlastností
- charakteristikou procesu tečení
- charakteristikou procesu stárnutí [25].

### **Základní rozdělení Aramisu**

Jednotlivé typy Aramisů se od sebe liší typem kamer a odlišnými Trigger boxy.

#### **ARAMIS 2M a 4M**

ARAMIS 2M (viz obr. 2.32) a ARAMIS 4M (viz obr. 2.33) je určen pro měření deformací, kde je důležitým aspektem jak vysoké rozlišení, tak rychlost kamer. Oba typy se od sebe liší rozlišením kamer, tedy typ 2M je vybaven kamerami s rozlišením 2 Mpx a 4M kamerami o rozlišení 4 Mpx. Snímat předměty je možno vzorkovací frekvencí 55 Hz za plného rozlišení, případně frekvencí až 440 Hz při zmenšení rozlišení čipu v jednom směru, což umožňuje snímání středně rychlých dějů při vysokém rozlišení [24].



Obr. 2.32 Aramis 2M



Obr. 2.33 Aramis 4M [24]

#### **ARAMIS 5M**

ARAMIS 5M (viz obr. 2.34) je vzhledem k vyššímu rozlišení CCD čipu vhodný pro měření velkých objektů nebo pro měření s vyšším rozlišení detailů.

Na rozdíl od systému ARAMIS 4M je zde rozlišení CCD čipu 5 000 000 bodů a snímkovací frekvence 15 Hz (resp. 30 Hz při snížení rozlišení CCD čipu) [24].



*Obr. 2.34 Aramis 5M [24]*

### **ARAMIS HS**

ARAMIS HS (high speed) (viz obr. 2.35) je systém speciálně přizpůsobený pro měření velmi rychlých dynamických dějů. Rozlišení CCD čipu je 1 300 000 pixelů a snímkovací frekvence může být v plném rozlišení až 500 Hz. Při snížení rozlišení CCD čipu může být dosaženo frekvence snímků až 8000 Hz. Snímkování lze řídit externím signálem nebo dle předem připravených instrukcí [24].



*Obr. 2.35 Aramis HS [24]*



### 3 Experimentální část

Experimentální část se zabývá popisem výroby zkušebních těles určených pro tahovou zkoušku z daného polymerního materiálu, jejich přípravou pro měření deformačního chování bezkontaktním optickým snímačem deformace, postupem při jeho kalibraci a následným měřením na trhacím stroji.

#### 3.1 Charakteristika materiálu

Pro experimentální měření byl vybrán polypropylen s obchodním označením Mosten GB 005, vyráběný firmou Unipetrol RPA s.r.o. Litvínov. Polypropylen Mosten GB 005 je víceúčelový homopolymer se střední distribucí molekulových hmotností a základní aditivací. Materiál se ke zpracovateli dodává ve formě kuliček. Typ je určen pro vstřikování, pro výrobu tkacích pásků, provazů a motouzů i pro výrobu fólií s následným tvarováním, zejména pro potravinářské účely [27],[28]. Typické vlastnosti Mostenu GB 005 jsou uvedeny v tab. 3.1, další materiálové charakteristiky jsou uvedeny v příloženém materiálovém listě v příloze 1.

Tab. 3.1 Typické vlastností Mostenu GB 005: [27],[28]

Vlastnosti	Jednotka	Typická hodnota	Zkušební metoda
<b>Fyzikální</b>			
Hustota	g/cm <sup>3</sup>	0,908	ISO 1183
Index toku taveniny (230/2,16)	g/10 min	5.0	ISO 1133
<b>Mechanické</b>			
Napětí na mezi kluzu	MPa	34	ISO 527
Poměrné prodloužení při přetržení	%	>100	ISO 527
Modul pružnosti v tahu	MPa	1550	ISO 178
<b>Rázové</b>			
Vrubová houževnatost Charpy 23°C	kJ/m <sup>2</sup>	4.5	ISO 179/1eA
<b>Tvrdość</b>			
Tvrdość dle Shore (SHORE D)	-	65	ISO 868
<b>Teplotní</b>			
Teplota měknutí dle Vicata	°C	157	ISO 306
Tvarová stálost ISO R75 (1,8 MPa)	°C	56	ISO 75

### 3.2 Výroba zkušebních vzorků

Výsledky mechanických zkoušek, tedy i tahových, kde se zjišťují materiálové vlastnosti, jsou závislé na tvaru zkušebních těles a technologii jejich přípravy, opracování i úpravě. Technologie přípravy zkušebních těles je zpravidla stejná jako technologie zpracování zkoušeného plastu na finální výrobek [29].

Z vybraného materiálu Mosten GB 005 byla na vstřikovacím lisu ENGEL ES 25/50 vyrobena sada zkušebních vzorků, určených pro tahovou zkoušku v souladu s materiálovou specifikací a mezinárodním standardem ČSN EN ISO 527 [13]. Technologické parametry vstřikování jsou uvedeny v tab. 3.2.

Tab. 3.2 Technologické parametry pro výrobu zkušebních vzorků

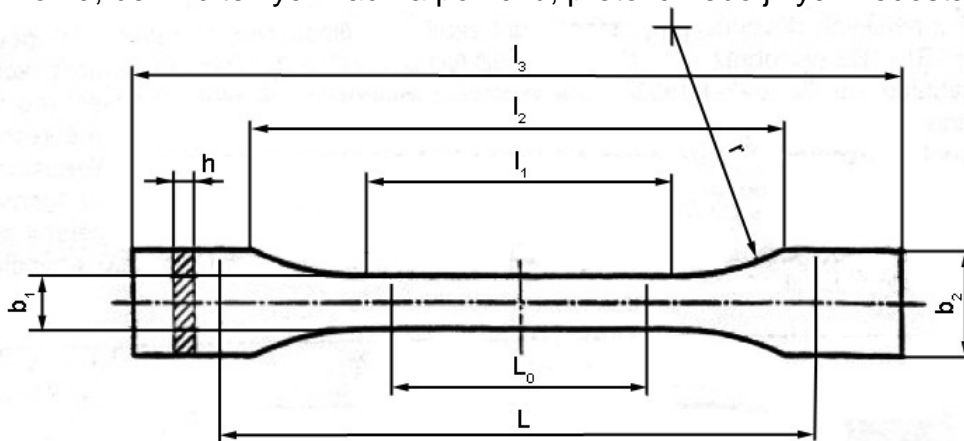
Parametry	Jednotka	Hodnota
Teplota tavicí komory	°C	160/140/120
Teplota taveniny	°C	235
Teplota temperačního média	°C	60
Hydraulický vstřikovací tlak	MPa	5
Zpětný tlak	MPa	5
Doba vstřiku a dotlaku	s	20
Doba plastikace	s	13
Doba chlazení po plastikaci	s	15
Doba cyklu	s	60

Pro tahovou zkoušku termoplastů se používají zkušební tělesa tvaru oboustranných lopatek (viz obr. 3.1) typu 1A nebo 1B dle ČSN EN ISO 527 [13] a ČSN EN ISO 3167 [30]. Oba typy se od sebe liší rozměry vzorků, pro typ 1A, který byl použit v tomto experimentu, jsou hodnoty jednotlivých rozměrů uvedeny v tab. 3.3. Typ zkušebního tělesa 1A je preferován pro přímo tvářená víceúčelová zkušební tělesa, typ 1B pro mechanicky obráběná zkušební tělesa [13].

Zkušební tělesa typu 1A byla zhotovena vstřikováním do vícenásobné formy obsahující dvě tvarové dutiny, které jsou plněny paralelně se směrem toku taveniny a s vtokovým ústím umístěným na konci každého zkušebního tělesa v souladu s ČSN EN ISO 294 [31]. K temperaci formy bylo použito

cirkulující vody v temperačních kanálech formy pomocí temperačního agregátu TA3.

V souladu s ČSN EN ISO 527 [13] předepisující minimální počet zkoušených těles, bylo pro každou rychlost zkoušení zhotoveno a hodnoceno pět vzorků, bez viditelných vad na povrchu, přetoků nebo jiných nedostatků.



Obr. 3.1 Zkušební těleso pro tahovou zkoušku [13]

Tab. 3.3 Rozměry zkušebního tělesa pro tahovou zkoušku [13]

Symbol	Hodnota	Popis
L	115±1 mm	Počáteční vzdálenost čelistí
L <sub>0</sub>	50,0±0,5 mm	Počáteční měřená délka
l <sub>1</sub>	80±2 mm	Délka zúžené rovnoběžné části
l <sub>2</sub>	104 až 113 mm	Rozpětí mezi širokými rovnoběžnými částmi
l <sub>3</sub>	≥150 <sup>1)</sup> mm	Celková délka
h	4,0±0,2 mm	Doporučená tloušťka
r	20 až 25 mm	Poloměr
b <sub>1</sub>	10±0,2 mm	Šířka zúžené rovnoběžné části
b <sub>2</sub>	20±0,2 mm	Šířka konců

<sup>1)</sup> Pro některé materiály může být délka lopatek prodloužena pro omezení lámání nebo vyklouzávání v upínacích čelistech

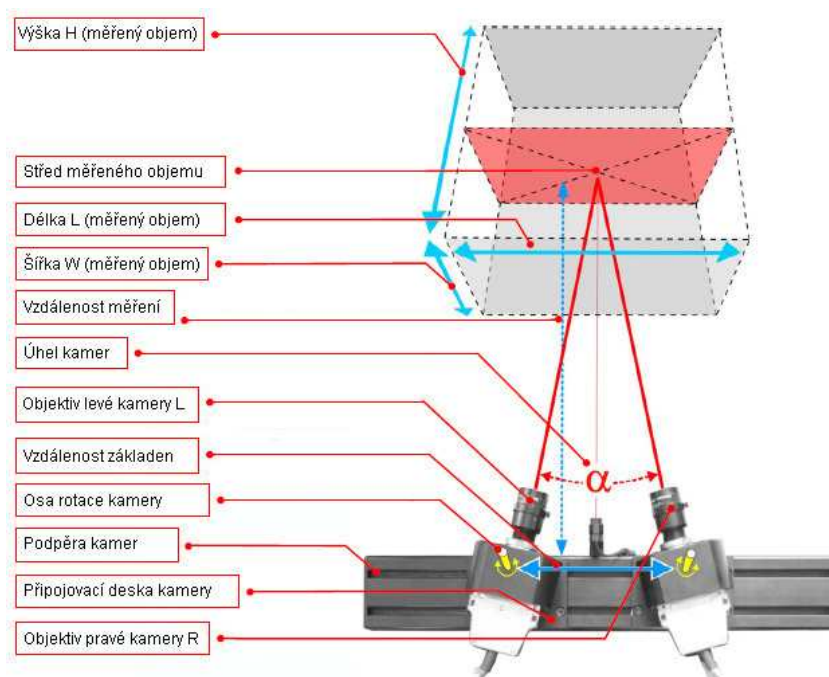
### 3.3 Kondicionace

Dle ČSN EN ISO 291 [32] je před vlastním měřením předepsána kondicionace. Kondicionování vede k tomu, aby byl vzorek či zkušební těleso uvedeno do rovnovážného stavu ve vztahu k teplotě a vlhkosti prostředí. Vzorek je tedy vystaven po předepsanou dobu standardnímu prostředí, ve kterém jsou

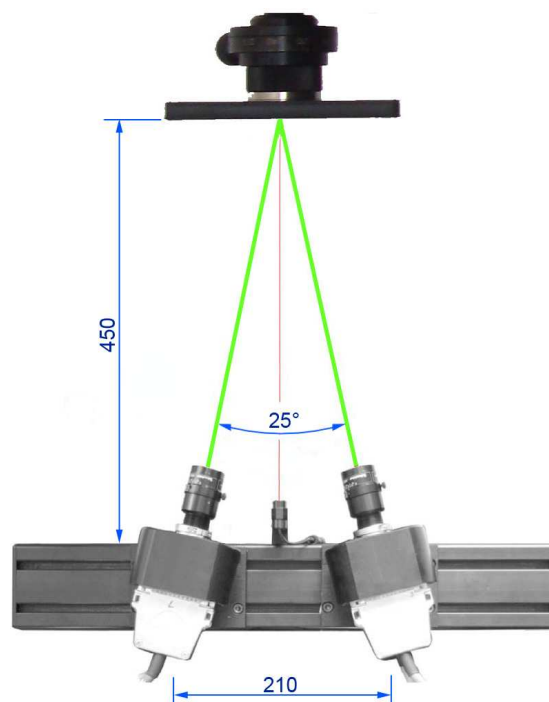
specifikovány hodnoty teploty vzduchu a vlhkosti, stejně jako rozsah atmosferického tlaku a rychlost cirkulace vzduchu, přičemž vzduch neobsahuje žádné další významné složky a prostředí není vystaveno žádným dalším významným radiačním vlivům. Standardním prostředím je prostředí: 23/50 – teplota okolí 23 °C a relativní vlhkost 50 % při atmosferickém tlaku (v rozmezí 86 kPa až 106 kPa) a čas kondicionování je 88 h. Pro materiály, u nichž relativní vlhkost neovlivní výsledky měření a má tedy zanedbatelný vliv, je doba kondicionování 4 h a sleduje se pouze teplota, která musí být 23 °C [32]. Před vlastním experimentálním měřením deformace vzorků zatěžovaných tahovou silou byly tyto kondicionovány dle výše uvedené normy.

### 3.4 Příprava na snímání deformace optickým systémem Aramis

Před začátkem měření se kamery připojí k trigger boxu, který je následně připojen k počítači. Před vlastním měřením je nutné nastavit vzdálenost kamer přístroje, úhel mezi kamerami a vzdálenosti mezi kamerami a měřeným předmětem (viz obr. 3.2). Tyto hodnoty jsou uvedeny v tabulkách od výrobce a jsou závislé na druhu používaných kamer, na velikosti clony a na velikosti měřeného objemu, jehož velikost je dle obr. 3.2 definována délkou, šířkou a výškou. V souvislosti s tímto se pro měření vzorků určených pro tahovou zkoušku nastavily jednotlivé vzdálenosti tak, jak je uvedeno na obr. 3.3, kde je již znázorněna výchozí poloha kalibrační desky určené pro kalibraci kamer.

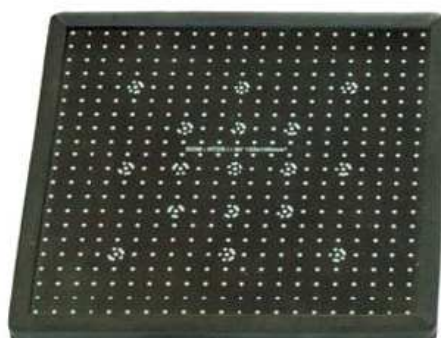


Obr. 3.2 Schéma nastavení ARAMISU



Obr. 3.3 Nastavení kamer

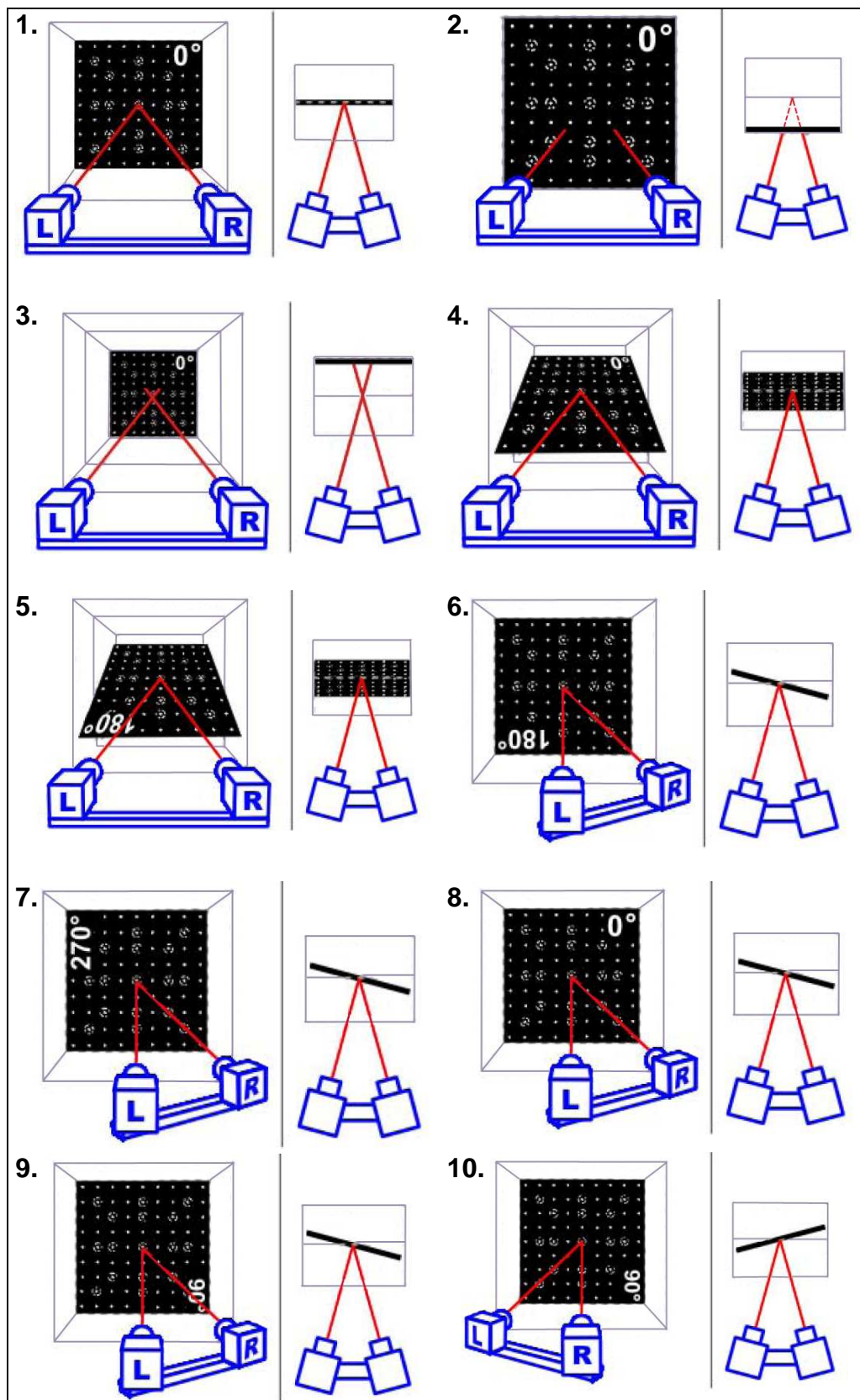
Po nastavení kamer je nutné systém kalibrovat na požadovanou přesnost a to se provádí kalibrační deskou (viz obr. 3.4), jejíž typ vychází z daného specifického nastavení kamer. Pro tento experiment byla použita kalibrační deska s označením CP20 90x72.



Obr. 3.4 Kalibrační deska

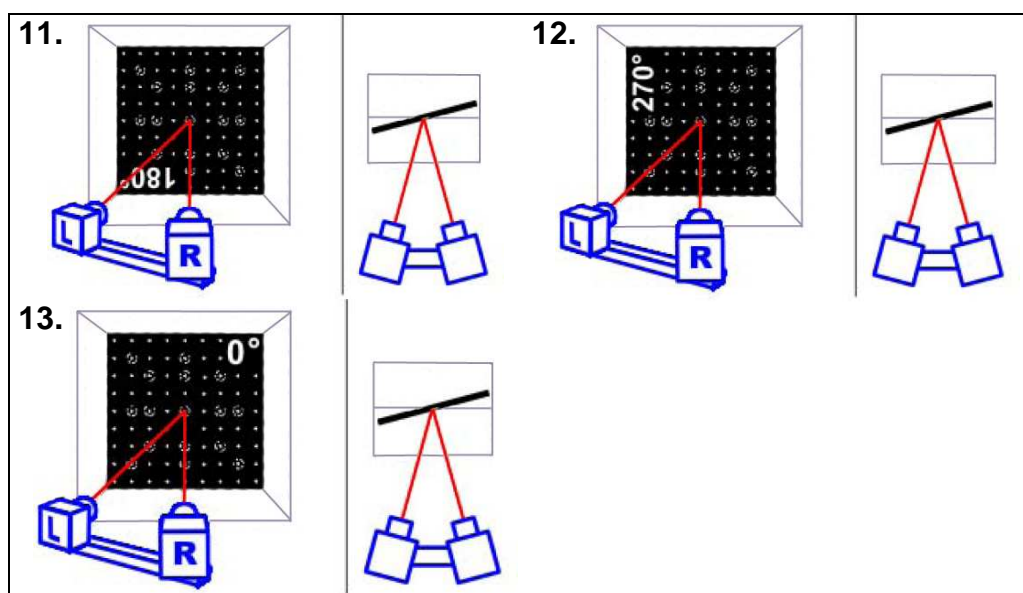
Kalibrace probíhá v několika krocích a je nutné postupovat přesně dle předepsaných pravidel. Po spuštění systému se do požadované vzdálenosti od kamer (pro tento případ 450 mm, viz obr. 3.3) vloží na stativ ostrovní šablona, jejímž úkolem je ověření správného zaostření kamer. Další kroky probíhají prostřednictvím kalibrační desky, která je umístěna rovněž na stativu ve stejné

vzdálenosti od kamer. Při kalibraci se kalibrační deska natáčí a posouvá v měřeném objemu, jak je uvedeno na obr. 3.5, v bodech 1 až 13.



Obr 3.5 Kalibrace optického snímače deformace Aramis





Obr 3.5 Kalibrace optického snímače deformace Aramis

Po kalibraci je možné přenést přístroj na požadované místo k trhacímu stroji a připravit zkušební vzorky k optickému měření jejich deformace. V rámci experimentální práce byl na vzorky nanesen stochastický kontrastní vzor (viz obr. 2.30). Znázornění průběhu přípravy kontrastního vzoru je uvedeno na obr. 3.6. Výsledky měření jsou uvedeny v kap. 3.6.

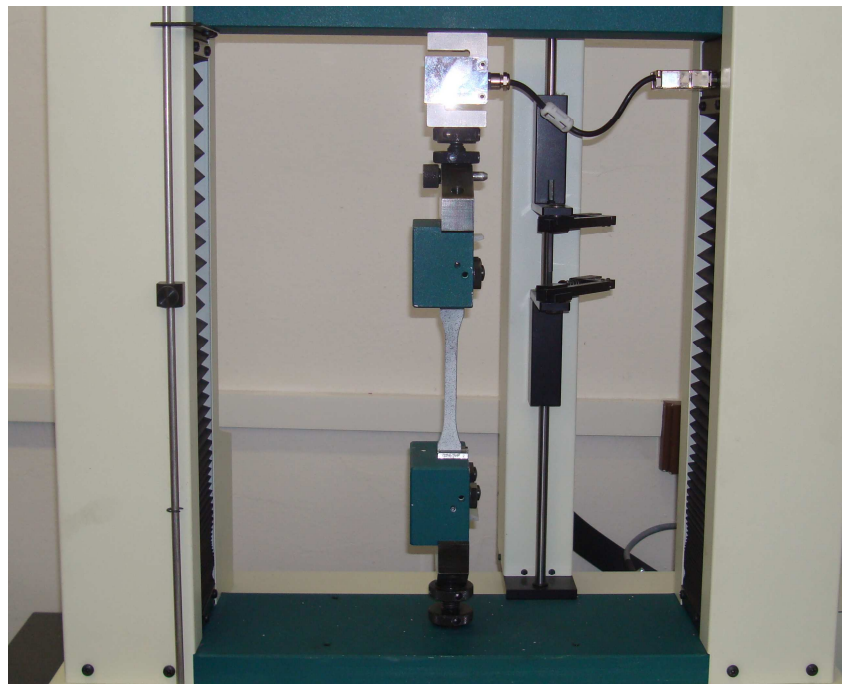


Obr. 3.6 Průběh při nanášení kontrastního vzoru

### 3.5 Tahová zkouška

Podstatou tahové zkoušky bylo v experimentálním měření protahování zkušebního tělesa ve směru jeho hlavní podélné osy konstantní rychlostí zkoušení do jeho porušení. Během zkoušky se měřilo zatížení působící na zkušební těleso a jmenovité poměrné prodloužení [13]. Tahová zkouška byla prováděna na trhacím přístroji Hounsfield H10 KT (viz obr. 3.7), s měřicí hlavou 10 kN, jehož činnost byla řízena počítačem prostřednictvím softwaru QMAT. Postup během měření byl v souladu s normou ČSN EN ISO 527 [13].

Těleso bylo upnuto do čelistí tak, aby plocha zkušebního tělesa, na které byl nanesen stochastický vzor, směřovala k optickému přístroji. Během měření nebyl použit mechanický extenzometr, a to z důvodu, aby nedošlo k začlenění měřené plochy, proto bylo prodloužení „ $\Delta l$ “ snímáno z posuvu příčnicku a měřená deformace vyjádřena jako jmenovité poměrné prodloužení dle ČSN EN ISO 527 z původní měřené vzdálenosti  $L_0=110$  mm. Dále byl spuštěn trhací stroj současně se systémem Aramis, který byl zapnutý do začátku rozvinuté plastické deformace, tedy tvorby krčku na měřeném vzorku, neboť dále již nebylo možné dosáhnout kvalitního měření kvůli velké deformaci stochastického vzoru. Měření povrchové deformace zkušebního tělesa, jakož i jejich tahové charakteristiky bylo prováděno vždy pro pět vzorků, při čtyřech rychlostech zkoušení: 5 mm/min, 50 mm/min, 100 mm/min a 200 mm/min.



Obr. 3.7 Trhací stroj Hounsfield H10 KT





Z naměřených hodnot tahových charakteristik byl vypočítán aritmetický průměr, viz rovnice (3.1), s odpovídající směrodatnou odchylkou viz rovnice (3.2). Postup je uveden v normě ISO 2602 [33]. Aritmetické průměry naměřených hodnot spolu se směrodatnými odchylkami jsou uvedeny pro čtyři měřené rychlosti v tab. 3.4.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.1)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.2)$$

kde  $\bar{x}$  aritmetický průměr n měření  
 $x_i$  hodnota i-tého měření ( $i=1,2,3,\dots,n$ )  
 $n$  celkový počet měření

Tab. 3.4 Mechanické hodnoty získané z tahové zkoušky

	5 mm/min		50 mm/min		100 mm/min		200 mm/min	
	Aritmet. prům.	Směr. odch.	Aritmet. prům.	Směr. odch.	Aritmet. prům.	Směr. odch.	Aritmet. prům.	Směr. odch.
Napětí na mezi kluzu [MPa]	30,5	0,4	34,7	0,1	35,7	0,3	37,2	0,2
Síla na mezi kluzu [N]	1218,7	14,6	1387,5	4,3	1429,8	11,6	1486,9	9,4
Prodloužení na mezi kluzu [%]	8,6	0,3	7,9	0,1	7,9	0,1	7,9	0,2
Mez pevnosti v tahu [MPa]	31,1	0,9	34,7	0,1	35,7	0,3	37,2	0,2
Jmenovité poměrné prodloužení při přetržení [%]	534,3	30,9	16,3	3,1	14,9	2,8	14,0	1,4
Napětí ve zlomu [MPa]	30,3	1,9	24,7	4,7	30,1	5,2	24,3	10,5

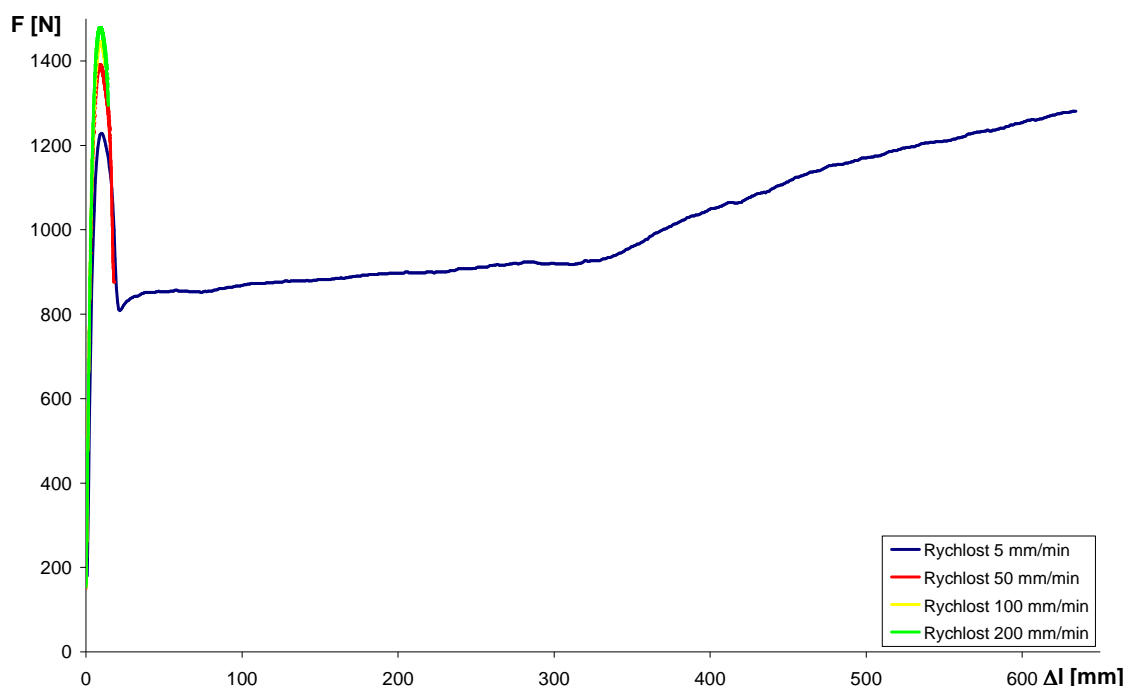
Z naměřených středních hodnot síly „F“ a prodloužení „Δl“ byl sestaven graf závislosti  $F=f(\Delta l)$  (viz obr. 3.8). Po přepočtu hodnot dle vzorců pro

stanovení napětí  $\sigma$  (2.21) a deformace  $\varepsilon$  (2.22) bylo možné sestavit graf závislosti  $\sigma=f(\varepsilon)$  (viz obr. 3.9).

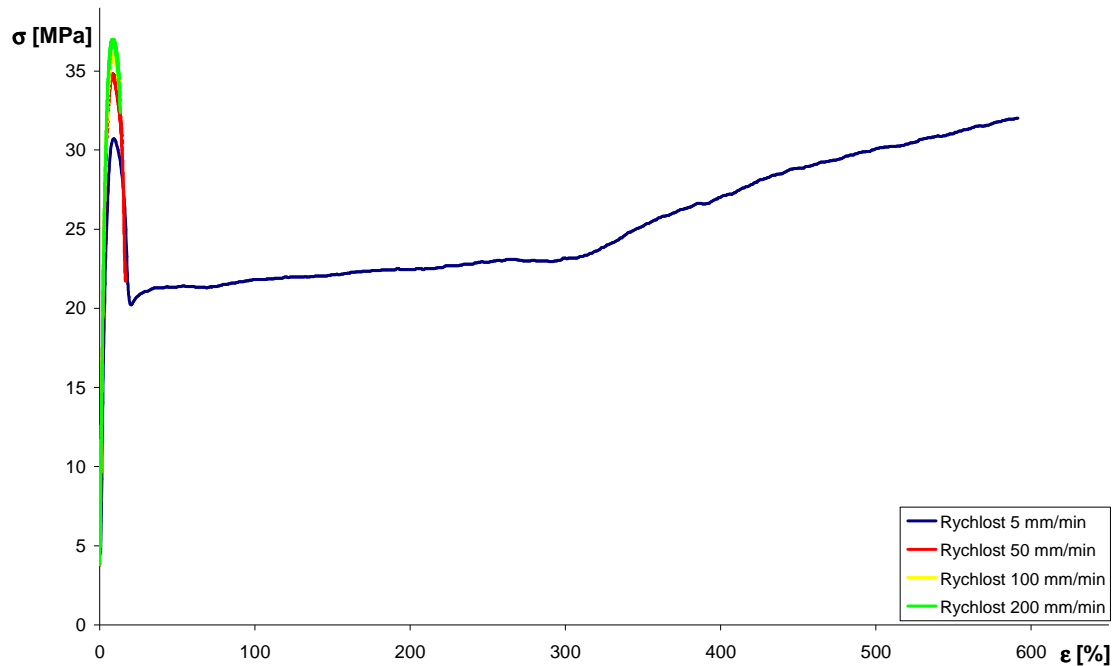
Z tahové zkoušky závislosti  $\sigma=f(\varepsilon)$  a dle vztahu (2.24) byl vypočítán modul pružnosti v tahu  $E$  pro všechny 4 rychlosti zatěžování, viz tabulka 3.5. S ohledem na viskoelastické chování plastů bylo pro odstranění počátečního nelineárního chování v grafické závislosti napětí-deformace použito předzatížení o velikosti ca. 10% z maximální síly při zatěžování.

Tab. 3.5 Hodnoty modulu pružnosti v tahu v závislosti na rychlosti zatěžování

Rychlost	$E$ [MPa]
5 mm/min	$636,5 \pm 8,2$
50 mm/min	$678,9 \pm 15,5$
100 mm/min	$726,3 \pm 17,8$
200 mm/min	$747,2 \pm 16,9$



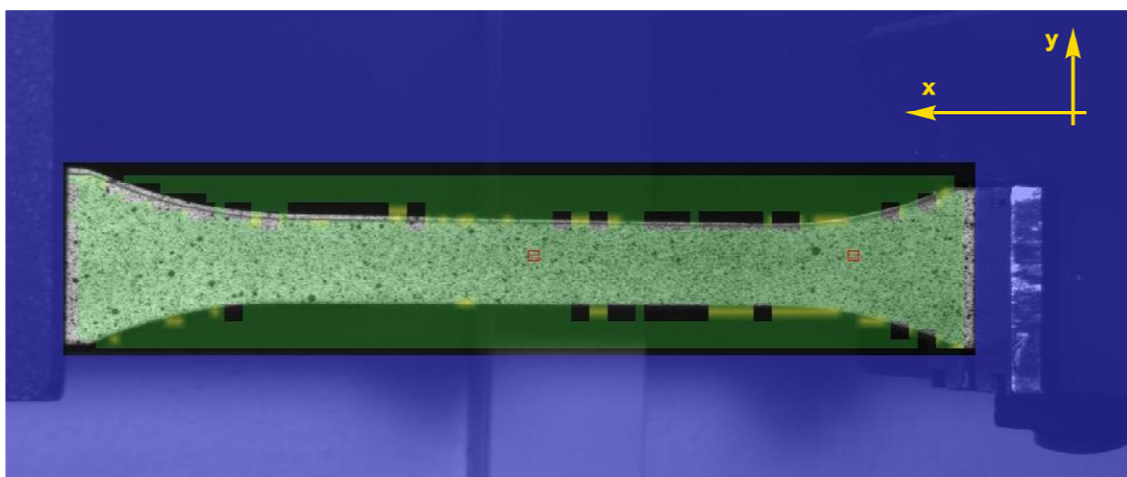
Obr. 3.8 Grafická závislost síly-posunutí v tahu pro PP Mosten GB 005 v závislosti na rychlosti zkoušení



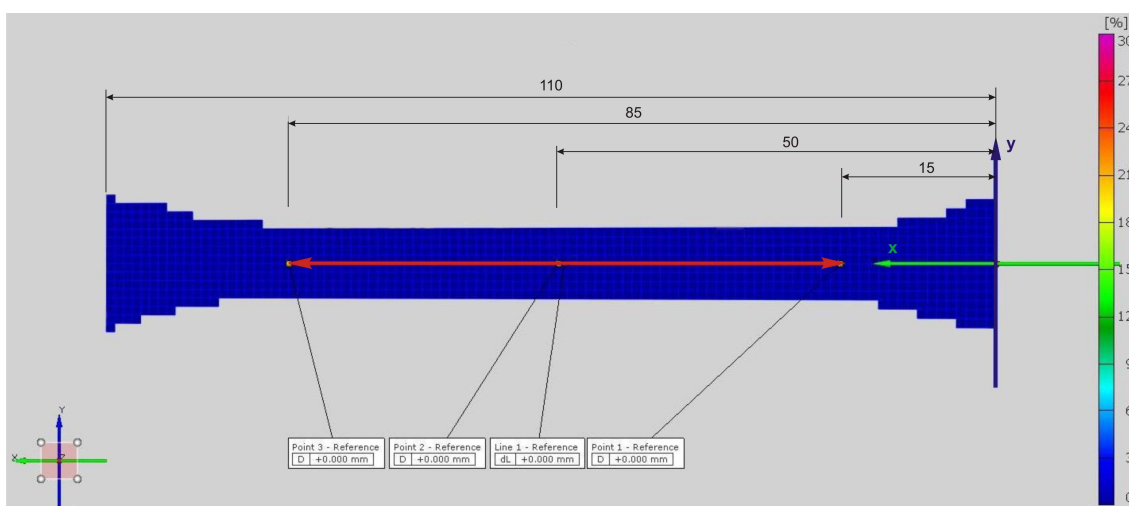
Obr. 3.9 Grafická závislost napětí-deformace v tahu pro PP Mosten GB 005 v závislosti na rychlosti zkoušení

### 3.6 Snímání deformace optickým systémem Aramis

Jak je uvedeno v kap. 3.5, deformace na optickém systému Aramis byla měřena do meze kluzu a měřila se na ploše xy (viz obr. 3.10), na které byl nanesen stochastický vzor. Ještě před vlastním měřením bylo zapotřebí vytvořit síť bodů, pomocí které bude průběh deformace ve směru x a ve směru y vyhodnocován. Proto byl kamerami Aramisu vyfocen první snímek zkušebního tělesa uchycený v čelistech trhacího stroje (viz obr. 3.10), dle kterého systém vypočítal síť bodů, které jsou definovány souřadnicemi x,y (viz obr. 3.11). Prostřednictvím tohoto bylo možné na zkušebních vzorcích vybrat body, které se budou při různých rychlostech zatěžování sledovat a následně bude možné vyhodnotit jejich chování. Pro tento experiment byly vybrány tři body, jak je znázorněno na obr 3.11. Zleva, v oblasti, kde se nachází pohyblivá čelist, je umístěn bod 1, uprostřed bod 2 a na pravé straně, která je stranou pevnou, se nachází bod 3. Pro eliminaci prokluzu vzorku mezi čelistmi během zatěžování byl v systému Aramis zaveden tzv. virtuální průtahoměr (na obr. 3.11 znázorněn červenou šipkou) s počáteční délkou  $L_0=70$  mm, který se pohyboval nezávisle na posuvu příčnicku trhacího stroje.



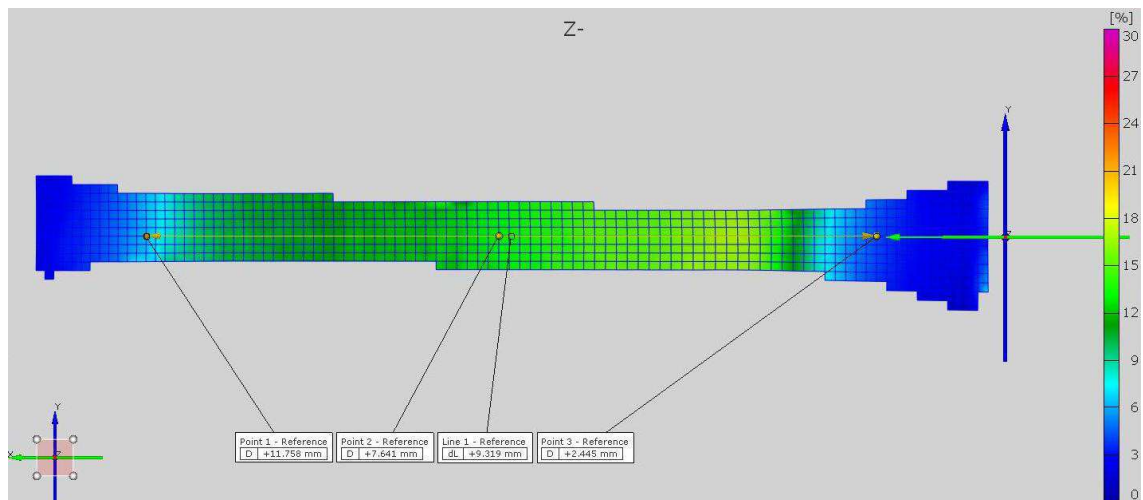
Obr. 3.10 Zkušební vzorek upnutý v čelistech



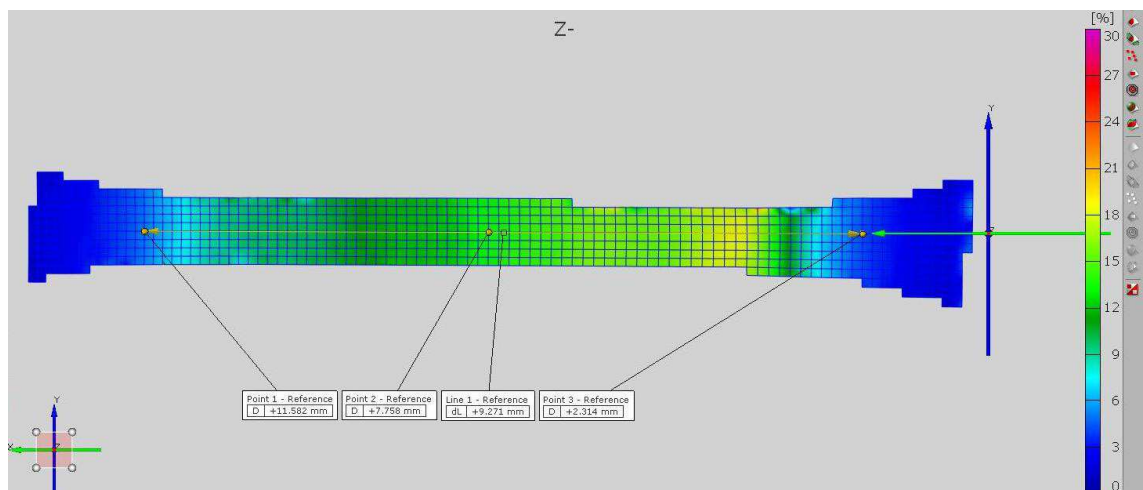
Obr 3.11 Síť bodů

Z důvodu, že pro různé rychlosti zatěžování zkušebních těles materiál vykazuje různou hodnotu poměrného prodloužení při přetržení (viz obr. 3.9), byla s ohledem na toto zvolena srovnávací mez, kterou je prodloužení virtuálního průtahoměru na hodnotu  $9,277 \pm 0,046$  mm. Při této hodnotě jsou na obr. 3.12 až obr. 3.19 uvedeny snímky znázorňující rozložení poměrné deformace v jednotlivé směrech x a y a při různých rychlostech zatěžování: 5 mm/min, 50 mm/min, 100 mm/min, 200 mm/min. Dále je na obr. 3.20 znázorněn graf závislosti poměrné deformace ve směru x a na obr. 3.21 ve směru y po délce zkušebního tělesa. Délkou zkušebního tělesa se rozumí délka zkušebního tělesa mezi čelistmi, na které byla generována síť bodů. Pro tento experiment to je hodnota 110 mm (viz obr. 3.11). Pro porovnání je na obr. 3.22

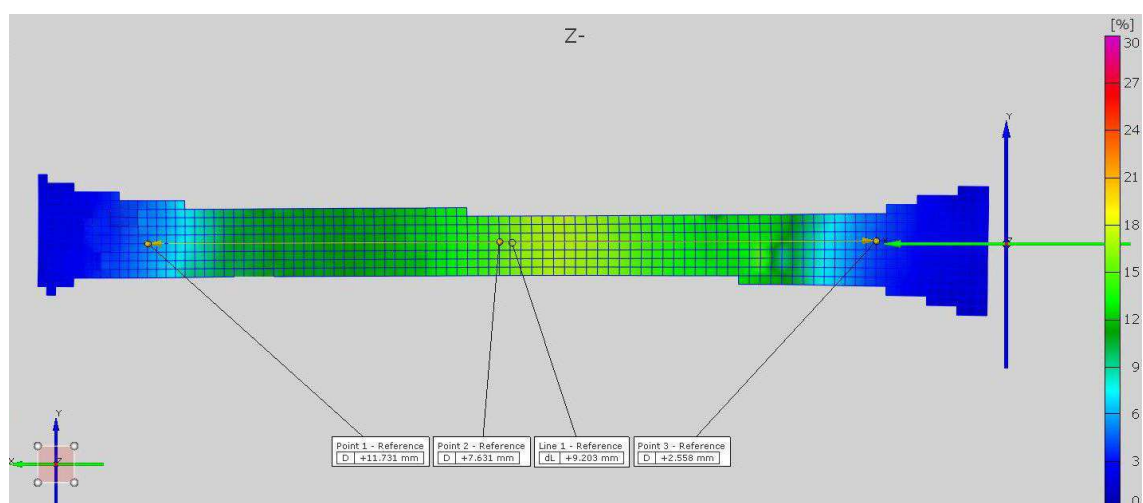
znázorněna deformace ve směru x za nižší hodnoty prodloužení, tedy  $5,551 \pm 0,038$  mm.



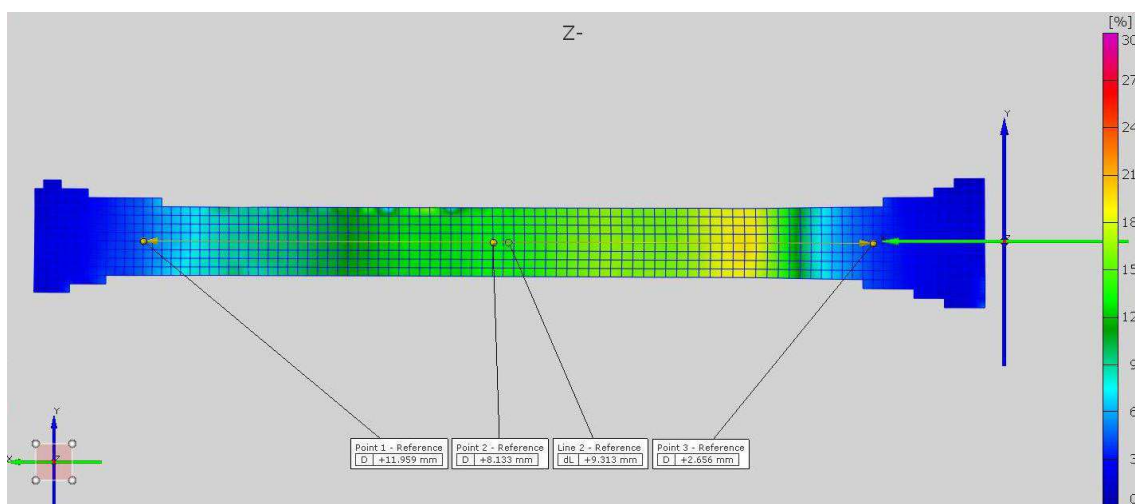
Obr. 3.12 Deformace ve směru osy x pro rychlost 5 mm/min



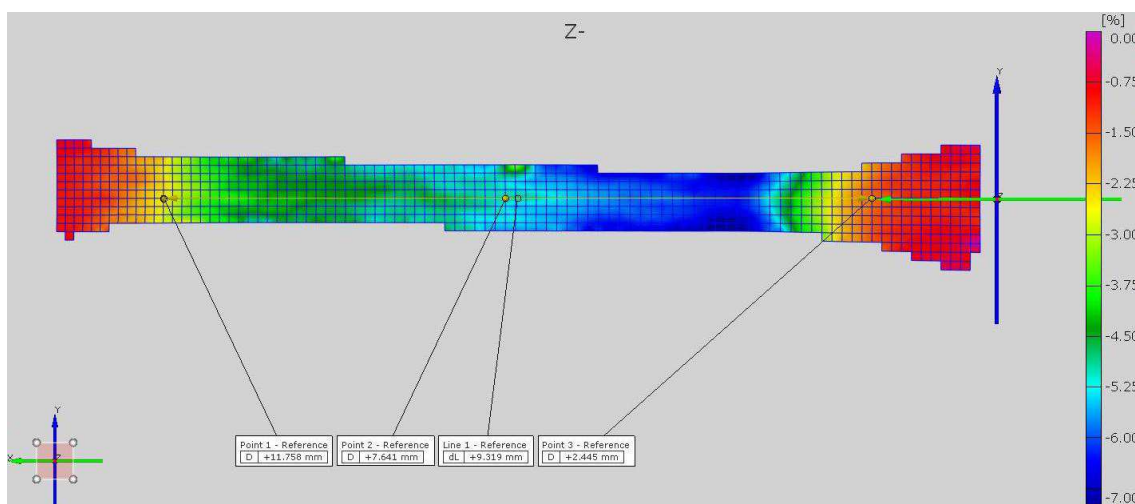
Obr. 3.13 Deformace ve směru osy x pro rychlost 50 mm/min



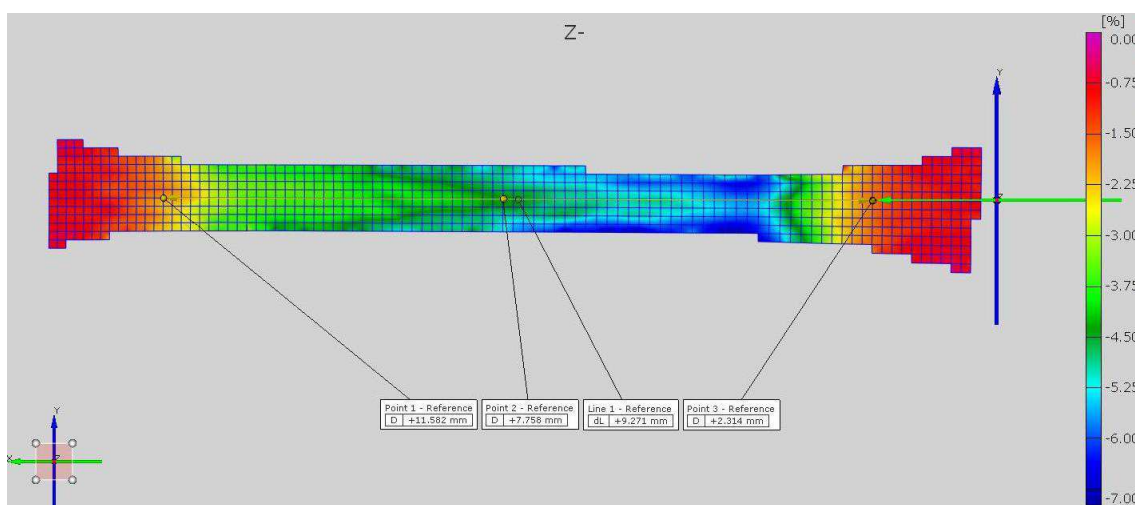
Obr. 3.14 Deformace ve směru osy x pro rychlost 100 mm/min



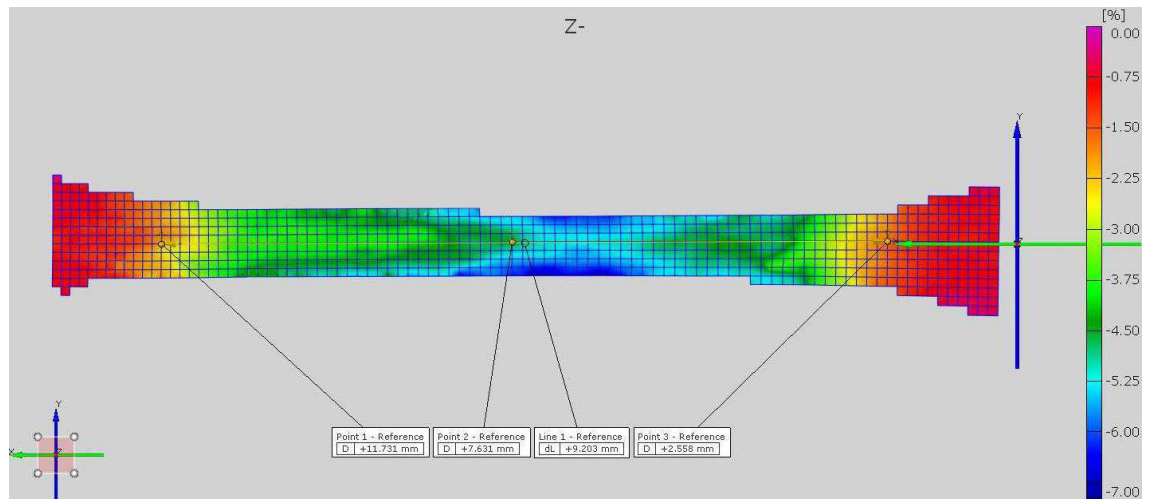
Obr. 3.15 Deformace ve směru osy x pro rychlost 200 mm/min



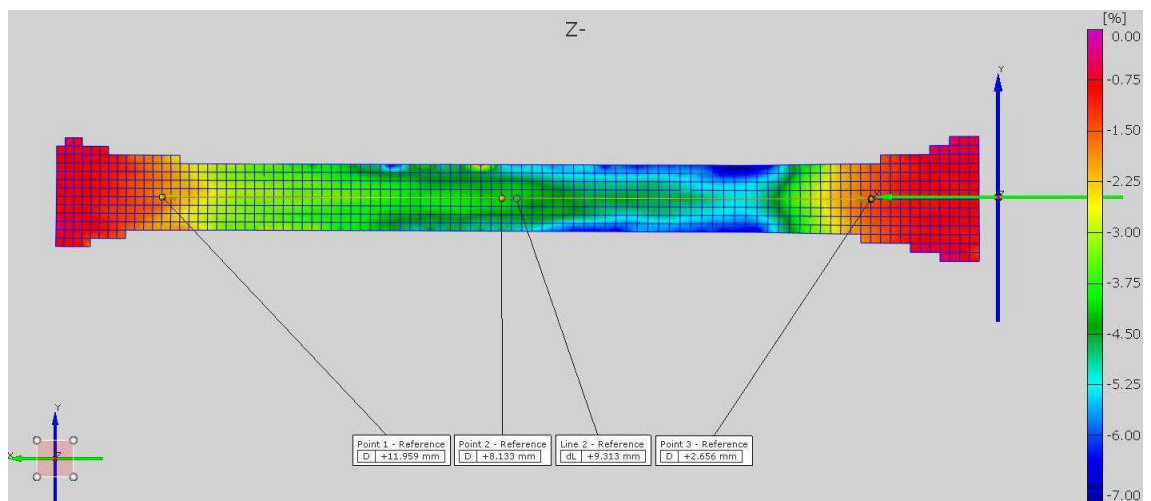
Obr. 3.16 Deformace ve směru osy y pro rychlost 5 mm/min



Obr. 3.17 Deformace ve směru osy y pro rychlost 50 mm/min

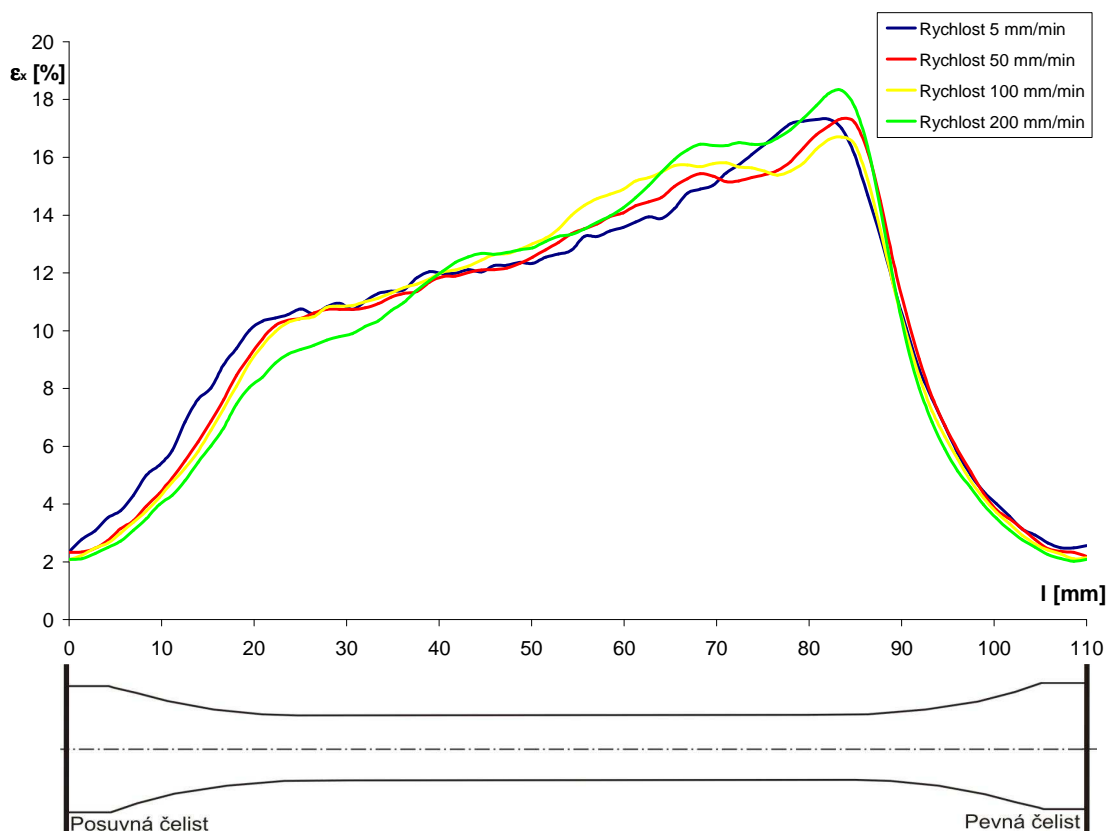


Obr. 3.18 Deformace ve směru osy y pro rychlost 100 mm/min

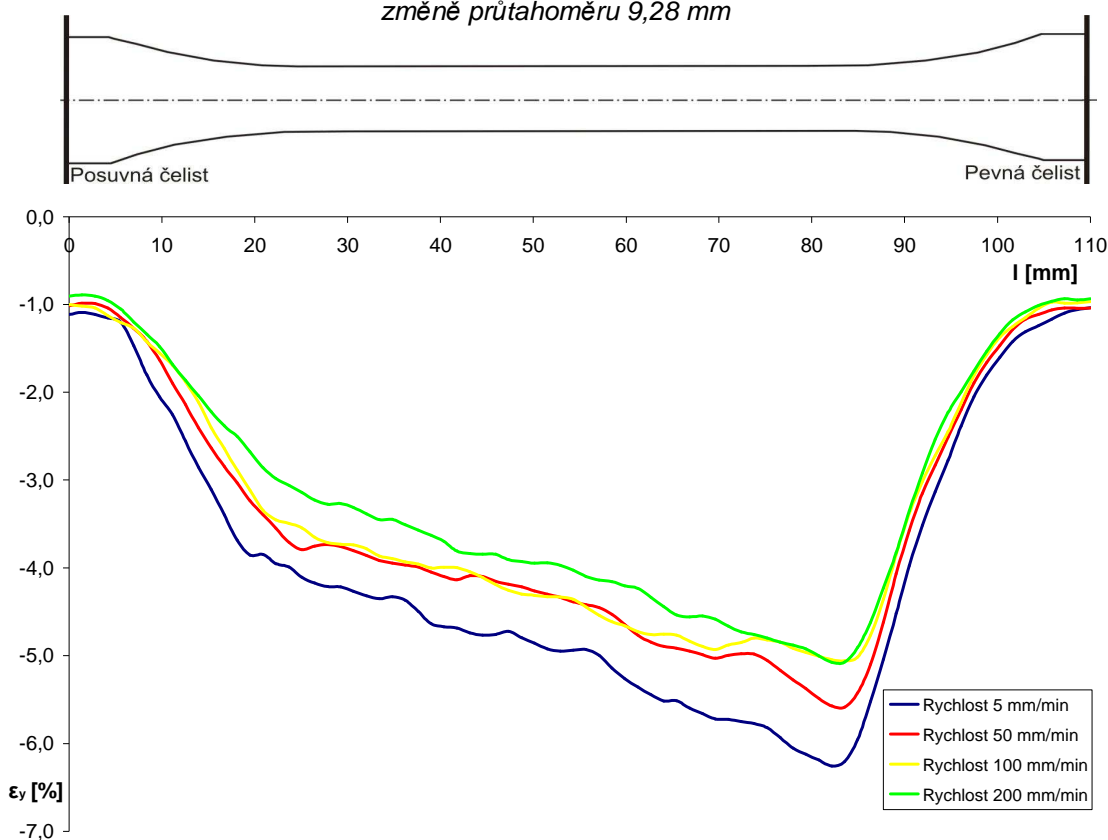


Obr. 3.19 Deformace ve směru osy y pro rychlost 200 mm/min



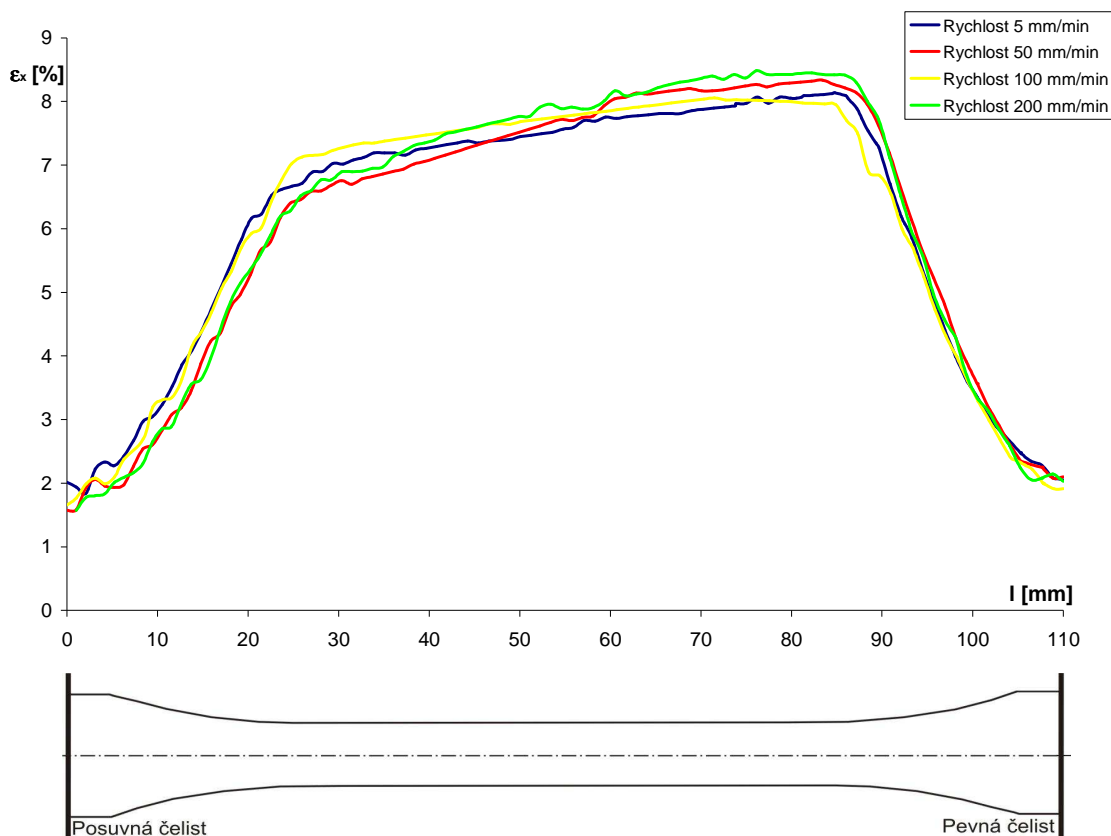


Obr. 3.20 Průběh deformace na povrchu zkušebního tělesa ve sledované délce ve směru x při změně průřahoměru 9,28 mm



Obr. 3.21 Průběh deformace na povrchu zkušebního tělesa ve sledované délce ve směru y při změně průřahoměru 9,28 mm





Obr. 3.22 Průběh deformace na povrchu zkušebního tělesa ve sledované délce ve směru x při změně průtahoměru 5,55 mm

Prostřednictvím hodnot poměrných deformací z grafů na obr. 3.20 a obr. 3.21 lze spočítat Poissonův poměr (viz tab. 3.6), který je definován vztahem (3.3) [34]:

$$\mu = -\frac{d\varepsilon_y}{d\varepsilon_x} \quad (3.3)$$

kde  $\mu$  Poissonovo číslo [-]

$d\varepsilon_x$  hodnota poměrné deformace ve směru x [-]

$d\varepsilon_y$  hodnota poměrné deformace ve směru y [-]

Tab. 3.6 Poissonův poměr pro různé rychlosti zatěžování

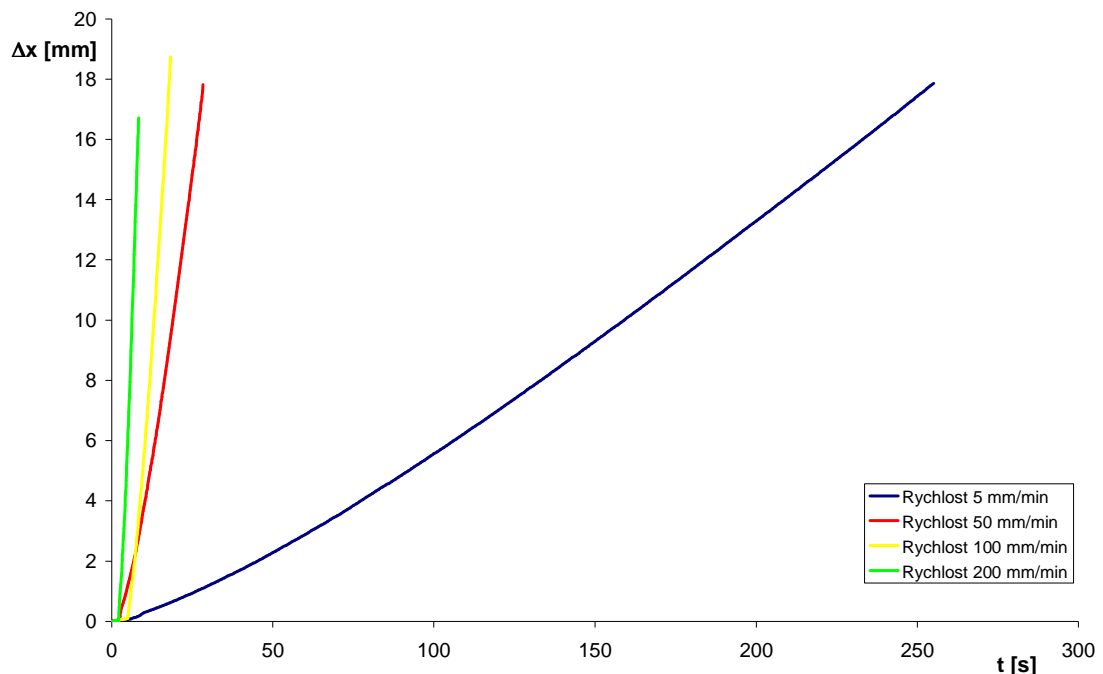
Rychlost	$\mu$ [-]
5 mm/min	$0,37 \pm 0,01$
50 mm/min	$0,34 \pm 0,02$
100 mm/min	$0,30 \pm 0,01$
200 mm/min	$0,28 \pm 0,01$

V tab. 3.7 jsou uvedeny hodnoty napětí  $\sigma$  při hodnotě virtuálního průtahoměru  $9,277 \pm 0,046$  mm, které se dosáhlo během měření při všech rychlostech zatěžování:

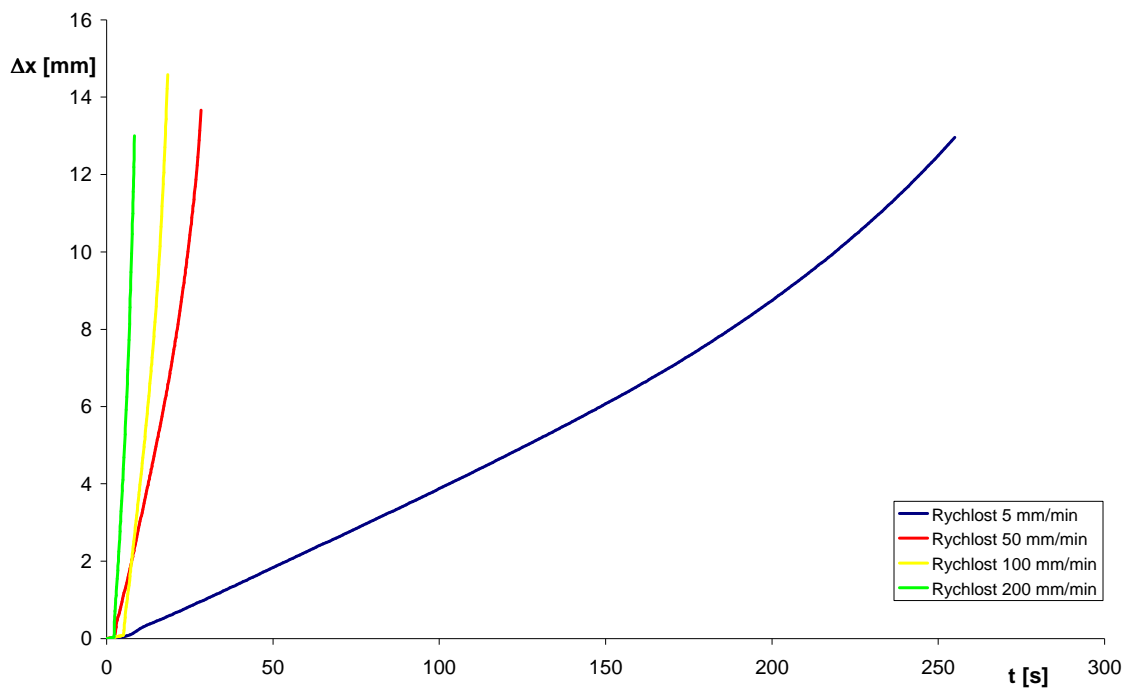
Tab. 3.7 Hodnoty napětí  $\sigma$  při deformaci  $\varepsilon_x$

Rychlost	$\sigma$ [MPa]
5 mm/min	$29,4 \pm 0,4$
50 mm/min	$33,5 \pm 0,2$
100 mm/min	$34,7 \pm 0,3$
200 mm/min	$36,4 \pm 0,2$

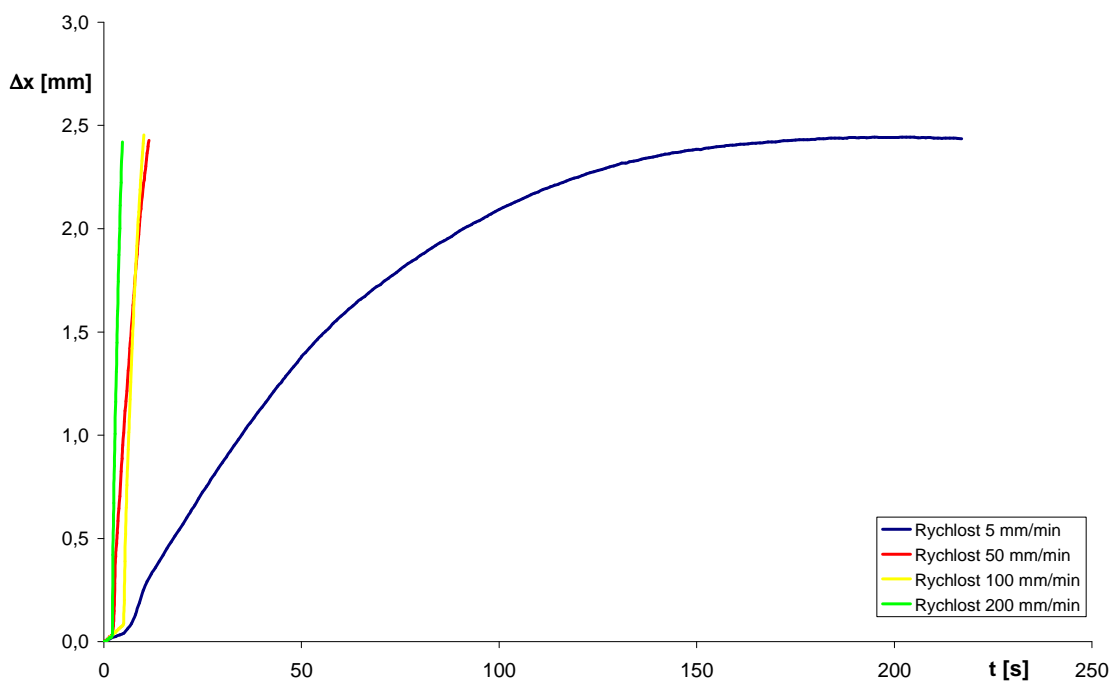
Grafy znázorňující chování tří bodů na ploše xy (viz obr. 3.11), jsou uvedeny na obr. 3.23 až obr. 3.25 v závislosti posunutí bodů ve směru x na čase t a na obr. 3.26 až obr. 3.28 jsou uvedeny závislosti rychlosti posunutí bodů ve směru x ( $v_x$ ) na změně průtahoměru  $\Delta L_x$ .



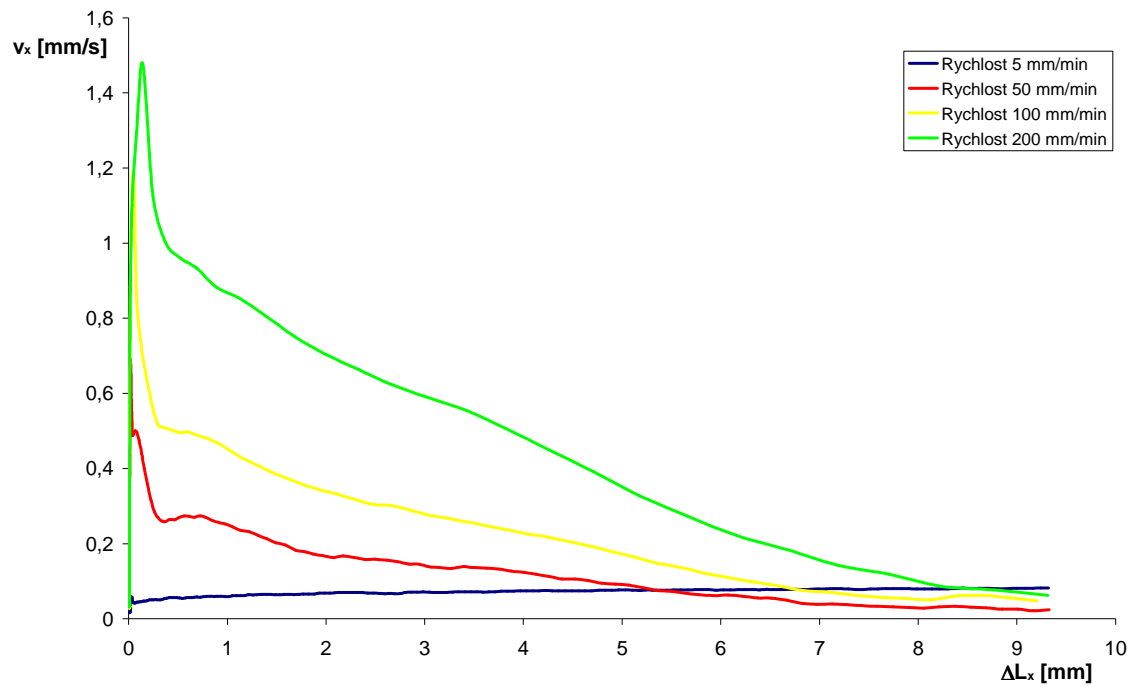
Obr. 3.23 Grafická závislost posunutí bodu 1 ve směru osy x na čase v závislosti na rychlosti zkoušení



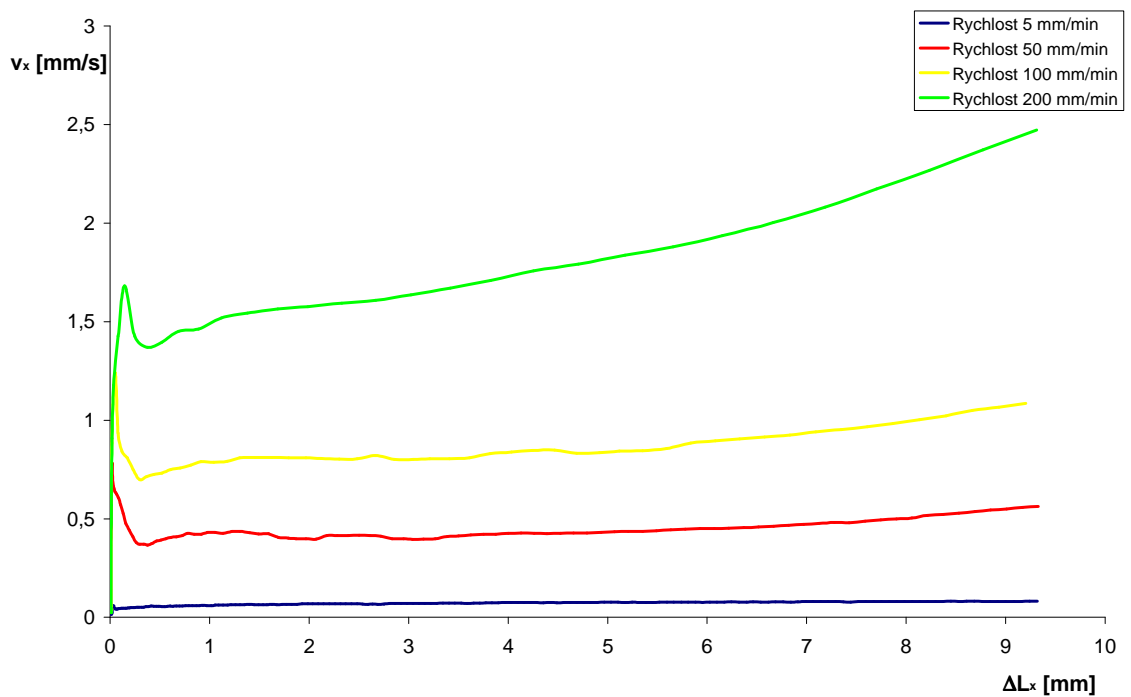
Obr. 3.24 Grafická závislost posunutí bodu 2 ve směru osy  $x$  na čase v závislosti na rychlosti zkoušení



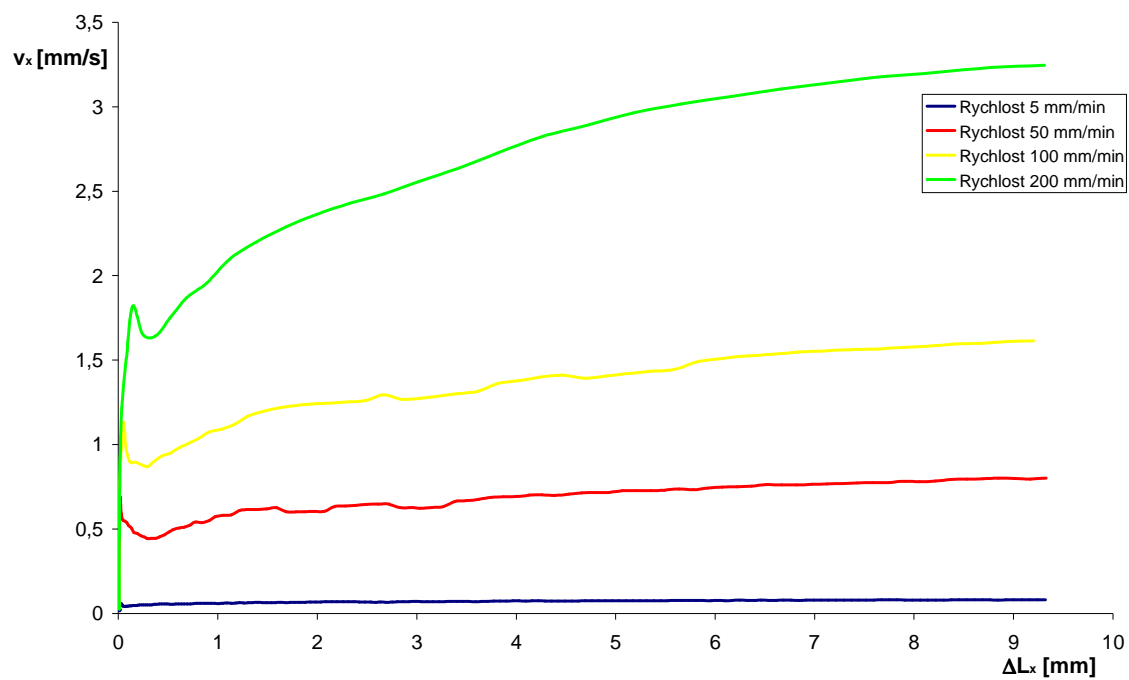
Obr. 3.25 Grafická závislost posunutí bodu 3 ve směru osy  $x$  na čase v závislosti na rychlosti zkoušení



Obr. 3.26 Grafická závislost rychlosti posunutí bodu 3 ve směru osy x na změně průtahoměru v závislosti na rychlosti zkoušení



Obr. 3.27 Grafická závislost rychlosti posunutí bodu 2 ve směru osy x na změně průtahoměru v závislosti na rychlosti zkoušení



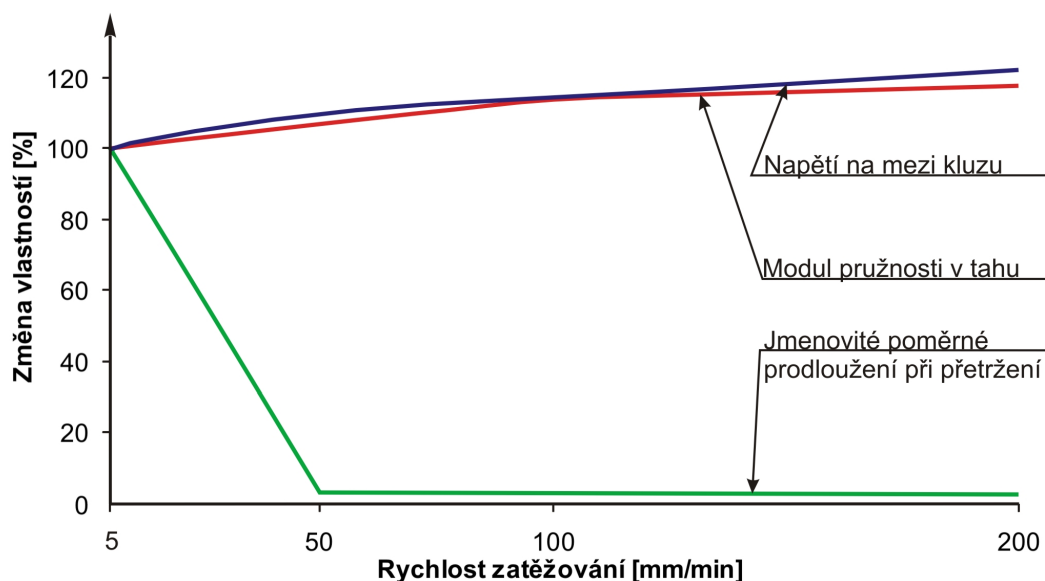
Obr. 3.28 Grafická závislost rychlosti posunutí bodu 1 ve směru osy x na změně průtahoměru v závislosti na rychlosti zkoušení

## 4 Vyhodnocení a diskuse výsledků

Experimentální měření, jehož příprava, postup a výsledky byly popsány v experimentální části, bude vyhodnoceno a diskutováno v následujících kapitolách v závislosti na rychlosti zatěžování.

### 4.1 Vyhodnocení průběhu tahové zkoušky

Během tahové zkoušky nebyl použit extenzometr, proto jsou výsledky deformačního chování, které byly během zkoušky získány, uváděny jako jmenovité (tzn. Poměrné prodloužení je stanovováno ze vzdálenosti čelistí). Dle mechanických hodnot uvedených v tabulce 3.4 a závislosti změn mechanických vlastností na rychlosti zkoušení (viz obr. 4.1) bylo potvrzeno, že při rostoucí rychlosti zatěžování materiálu roste mez kluzu, (rozdíl mezi rychlostí 5 mm/min a 200 mm/min je 18 %), mez pevnosti v tahu (rozdíl mezi rychlostí 5 mm/min a 200 mm/min je 16,4 %), klesá jmenovité poměrné prodloužení při přetržení (rozdíl mezi rychlostí 200 mm/min a 5 mm/min je 97,4 %). Pro modul pružnosti, jehož hodnoty jsou uvedeny v tab. 3.5, bylo rovněž v tomto experimentu prokázáno, že se vzrůstající hodnotou rychlosti zatěžování modul pružnosti roste (rozdíl mezi rychlostí 5 mm/min a 200 mm/min je 14,8 %). Hodnoty modulu pružnosti  $E$  nelze srovnávat s materiálovým listem, protože norma ISO 527 [13] udává rychlost zatěžování pro vyhodnocení modulu pružnosti v tahu 1 mm/min.



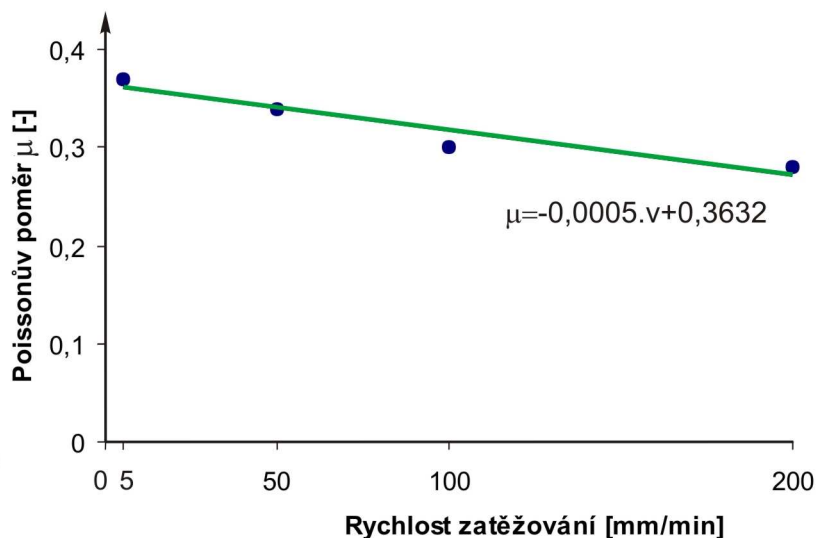
Obr. 4.1 Grafická závislost změn mechanických vlastností v závislosti na rychlosti zkoušení

## **4.2 Vyhodnocení deformačního chování prostřednictvím systému ARAMIS**

Z obr. 3.12 až obr. 3.15 je patrné, že rozložení deformace ve směru  $x$  je pro všechny čtyři rychlosti velice podobné a není mezi nimi velký rozdíl. To je způsobeno tím, že poměrná deformace v podélném směru, tedy  $\varepsilon_x$ , bude mít nezávislou hodnotu na velikosti působícího napětí, jak je patrné z grafu tahové zkoušky (viz obr. 3.9), ze závislosti poměrné deformace ve směru  $x$  po délce zkušební tělesa (viz obr. 3.20) a z tab. 3.7, kde jsou uvedeny hodnoty napětí  $\sigma$ , kterého bylo zapotřebí, aby se těleso zdeformovalo na hodnotu uvedenou na obr. 3.20. Na obr. 3.20 je dále patrné, v jaké části zkušební tělesa vznikne budoucí krček po dosažení meze kluzu. Na tomto obrázku se již projevilo viskoelastické chování polymerů, tedy deformace na zúžené rovnoběžné části tělesa, značené „I<sub>1</sub>“ (viz obr. 3.1), kde již není poměrná deformace  $\varepsilon_x$  konstantní, jako tomu bylo při nižší hodnotě prodloužení (viz obr. 3.22), kdy se na tělese vyskytovala pouze deformace elastická, vratná, která byla po celé délce tělesa „I<sub>1</sub>“ konstantní. Oproti tomu je z obr. 3.16 až z obr. 3.19, které znázorňují rozložení poměrné deformace  $\varepsilon_y$  ve směru  $y$ , směru kolmém na osu  $x$  patrné, že se tato deformace s rostoucí rychlostí liší. Největší deformace dle obr. 3.21, který znázorňuje průběh poměrné deformace  $\varepsilon_y$  po délce zkušební tělesa, je u nejnižší rychlosti, tedy rychlosti 5 mm/min. Toto rozdílné zúžení lze vysvětlit prostřednictvím viskoelastického chování u plastů. Při malých rychlostech zatěžování dochází k většímu dloužení materiálu, během zatěžování se projeví jak deformace elastická, tak také později deformace zpožděně elastická a plastická, které mají díky delší době zatěžování možnost se projevit ve vyšší míře, než-li při rychlostech vyšších, kdy se projeví nejvíce deformace elastická a nedochází během zatěžování k dloužení, tedy ke snižování průřezu.

Dle tabulky 3.6 a obr. 4.2, kde jsou uvedeny hodnoty Poissonova poměru, je patrné, že i Poissonův poměr se mění kromě s měnící se teplotou také s měnící se rychlostí zatěžování. Poissonův poměr určuje stlačitelnost látek, tedy zda-li platí zákon zachování objemu, či nikoliv. S rostoucím Poissonovým poměrem je látka více nestlačitelná. Čím vyšší bude rychlost zatěžování, tím menší bude Poissonův poměr. Rozdíl v Poissonovu poměru mezi nejnižší a

nejvyšší rychlostí zatěžování je 24,3 %. Čím vyšší bude tedy hodnota Poissonova poměru, tím vyšší bude hodnota zúžení, či nižší hodnota prodloužení. Ze závislosti Poissonova poměru a rychlosti zatěžování (viz obr. 4.2) lze vypočítat rovnici regrese (4.1), podle které lze určit přibližnou hodnotu Poissonova poměru pro různé rychlosti zatěžování PP Mosten GB 005.



Obr. 4.2 Grafická závislost Poissonova poměru na rychlosti zkušební

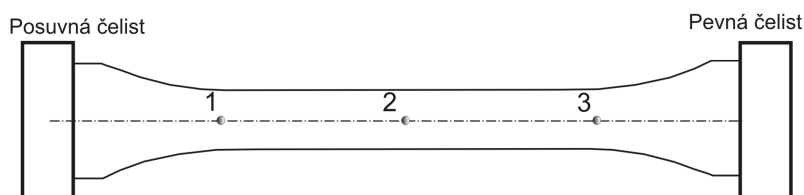
$$\mu = -0,0005 \cdot v + 0,3632 \quad (4.1)$$

kde:  $\mu$  Poissonův poměr [-]  
 $v$  rychlost zatěžování [ $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ]

Dále bylo zkoumáno chování třech bodů, rozmístěných na ploše vzorku (viz obr. 3.11). Na obr. 3.23 až obr. 3.25 je znázorněna závislost posunutí bodů v podélném směru na čase  $t$  při jednotlivých rychlostech zatěžování. Při nejpomalejší rychlosti 5 mm/min, se body 1, 2, 3 posunou na danou hodnotu o větší časový úsek, než-li při rychlostech vyšších. Dále bod 1, umístěný u posuvné čelisti, dosáhne větší hodnoty prodloužení, než-li bod 3, který je umístěn u čelisti pevné (viz obr. 4.3). Toto je zapříčiněno pravděpodobně umístěním vtoku, který byl vždy během zkoušení na straně čelisti posuvné a budoucí tvorba krčku se vyskytovala blíže čelisti pevné, tedy na straně dále od vtoku. Proto se již bod 1 kvůli anomálii uvnitř struktury materiálu, která mohla být zapříčiněna při vstřikování materiálu do dutiny formy, deformuje více, než-li



bod 3, který je umístěn za budoucím krčkem. Bod 2, který je umístěn uprostřed mezi body 1 a 3, dosahuje hodnot prodloužení o něco nižších, než- li bod 1.



Obr. 4.3 Schéma zkušební vzorku upnutého v čelistech

Závislosti rychlosti posunu bodů 1, 2 a 3 na změně průřahoměru  $\Delta L_x$  jsou na obr. 3.26 až obr. 3.28. Na obr. 3.26, kde je tato závislost vyjádřena pro bod 3 je zřejmé, že s vyšší hodnotou protažení virtuálního průřahoměru se rychlost posunu bodů snižuje a naopak u obr. 3.28 pro bod 1 se rychlost posunu bodů zvyšuje (v případech vyšší rychlosti zatěžování). Z tohoto vyplývá určitá nehomogenita materiálu, kdy by měli být všechny rychlosti konstantní až do meze kluzu (tak jak je patrné při nejnižší rychlosti deformace 5 mm/min), kdy se začne vytvářet krček a deformace probíhá pouze v této oblasti a ostatní body již nejsou v pohybu. Konstantní rychlost je nejvíce patrná u bodu 2, který je umístěn uprostřed zkušební vzorku.



## 5 Závěr

Tak jako všechny vážně míněné cíle mají svůj počátek, průběh a konec, i tato diplomová práce, přes všechny fáze, dospěla ke svému závěru. Úkolem bylo rozebrat deformační chování PP Mosten GB 005, který se zatěžoval při různých rychlostech zkoušení na trhačím stroji. Při tomto byl využit optický snímač deformace, kterého bylo u této metody použito na TU v Liberci poprvé. Asi největší překážkou pro použití této metody, či metod založených na podobném principu u plastů, je vytvoření kontrastního vzoru, díky kterému systém dokáže analyzovat deformaci zkoušeného tělesa. Metod pro vytvoření tohoto vzoru je více, ale bohužel kvůli možnosti porušení struktury polymerních řetězců, byly zavrhnuty metody leptání či metody podobné, které jsou založené na principu narušení vnitřní struktury. Proto bylo využito nanesení kontrastního vzoru prostřednictvím černo - bílého nástřiku. Tato metoda se prokázala pro experimentální část jako dostačující, s ohledem na přesnost měření a pracnost vytvoření vzoru.

Výsledkem diplomové práce je porovnání mechanických hodnot materiálu s ohledem na různé rychlosti zatěžování v tahu, tedy hodnot, které lze stanovit jednak z tahové zkoušky: modul pružnosti v tahu  $E$ , mez kluzu  $\sigma_y$ , mez pevnosti  $\sigma_M$  či jmenovité prodloužení při přetržení a hodnot, které lze stanovit pomocí systému Aramis: poměrnou deformaci ve směru podélném a příčném vzhledem ke zkušebnímu tělesu  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$ , z toho plynoucí Poissonův poměr, či rozdílné chování bodů zvolených na ploše zkušebního tělesa při jejich posunutí a rychlosti posunutí během deformace.

Pro možnost další návaznosti na tuto diplomovou práci by mohlo být použití analogo – digitálního výstupu u trhačky, který umožní propojení mezi trhačím strojem a systémem Aramis a dotvoří ucelené spektrum mechanických hodnot a prostřednictvím něhož by bylo možné analyzovat příčiny, proč se zkoušená tělesa nejčastěji deformovala právě mezi zvolenými dvěma body 2 a 3 a ne v jiných místech zkušebního tělesa. Bohužel toto zařízení není v současné době na katedře strojírenské technologie k dispozici.



### Seznam použité literatury:

- [1] VOLEK, A.: *Metodika ustavení souřadného systému pro optické měřicí zařízení Pontos – Diplomová práce*. Brno: VUT v Brně, 2008. 60 s.
- [2] Kolektiv: *Základy fyziky pevných polymerů II*. Praha: ÚMCH ČAV, 1988, 232 s.
- [3] KREBS, J.: *Teorie zpracování nekovových materiálů*. Liberec : TU v Liberci, 2006. 250 s. ISBN 80-7372-133-3
- [4] POTĚŠIL, A.: *Základy teorie viskoelastivity a dynamická odezva viskoelastických materiálů - Habilitační práce*. Liberec : VŠST v Liberci, 1993. 107 s.
- [5] KREBSOVÁ, M.: *Nauka o polymerech*. Liberec : VŠST v Liberci, 1979. 223 s.
- [6] KOŠKOVÁ, B.: *Struktura a vlastnosti vláken*. Liberec : VŠST v Liberci, 1989. 316 s. ISBN 80-7083-018-2.
- [7] MEVALD, J.: *Pružnost a pevnost: Pro textilní inženýry*. Liberec : VŠST v Liberci, 1984. 257 s.
- [9] CHRISTENSEN, R.M.: *Theory of viscoelasticity*. New York : Academic press INC, 1971. 245 s.
- [8] HOLZMÜLLER, W.; ALTENBURG, K.: *Fyzika polymerů*. Praha : SNTL, 1966. 625 s.
- [10] BERGEN, J.T.: *Viscoelasticity, Phenomeological aspects*. New York : Academic press INC, 1960. 150 s.
- [11] MEISSNER, B. ; ZILVAR, V.: *Fyzika polymerů, Struktura a vlastnosti polymerních materiálů*. Praha : SNTL, 1987. 308 s.
- [12] Dostupné na: <http://www.ksp.tul.cz> (duben 2009)
- [13] Norma ČSN EN ISO 527-1,2 (640604). *Plasty-Stanovení tahových vlastností*. Praha: ČNI Praha, 1997. 16 s
- [14] Plasty - konstrukční materiály a jejich zpracování
- [15] Dostupné na: <http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka> (únor 2009)
- [16] Dostupné na: <http://en.wikipedia.org> (květen 2009)
- [17] Dostupné na: <http://micro.feld.cvut.cz/home/kulha> (únor 2009)
- [18] Dostupné na: <http://www.automatizace.cz> (duben 2009)



- [19] Dostupné na: <http://de.wikipedia.org> (květen 2009)
- [20] Dostupné na <http://www.labortech.cz> (únor 2009)
- [21] Dostupné na:<http://www.konicaminolta.com/sensingusa/products/3D> (únor 2009)
- [22] Dostupné na: <http://robo.hyperlink.cz/3dskenery> (březen 2009)
- [23] Dostupné na: [http:// www.elektrorevue.cz/clanky](http://www.elektrorevue.cz/clanky) (únor 2009)
- [24] Dostupné na: <http://www.gom.com> (květen 2009)
- [25] Dostupné na: <http://www.mcae.cz> (květen 2009)
- [26] GOM mbH – firemní materiály, podklady a dokumentace
- [27] Dostupné na: <http://www.ides.com> (duben 2009)
- [28] Dostupné na: <http://www.chemopetrol.cz> (duben 2009)
- [29] RYBNIKÁŘ, F.; DITRYCH, Z.; KLÁCEL, Z.; ORDELT, O.: *Analýza a zkoušení plastických hmot*. Praha : SNTL, 1965. 420 s.
- [30] Norma ČSN EN ISO 3167 (640209). *Plasty – Víceúčelová zkušební tělesa*. Praha: ČNI Praha, 2004. 12 s.
- [31] Norma ČSN EN ISO 294 (640210). *Plasty – Vstřikování zkušebních těles z termoplastů*. Praha: ČNI Praha, 1999. 12 s.
- [32] Norma ČSN EN ISO 291(640204). *Plasty - Standardní prostředí pro kondicionování a zkoušení*. Praha: ČNI Praha, 2006. 12 s.
- [33] Norma ČSN EN ISO 2602 (010231). *Statistická interpretace výsledků zkoušek*. Praha: ČNI Praha, 1993. 12 s.
- [34] BICERANO, J.: *Prediction of polymer properties*. New York : Basel: Marcel Dekker, 2002. 756 s.

**Příloha P1: Materiálový list**

UNIPETROL RPA Litvínov	<b>Polypropylen MOSTEN</b> <b>Část 2: Materiálové listy</b>	PND 33-301 SKP 24.16.51
---------------------------	--	----------------------------

**HOMOPOLYMER PRO VŠEOBECNÉ POUŽITÍ****MOSTEN GB 005***Charakteristika*

MOSTEN GB 005 je víceúčelový homopolymer se střední distribucí molekulových hmotností a základní aditivací. Typ je určen pro vstřikování, pro výrobu tkacích pásků, provazů a motoužů a pro výrobu fólií s následným tvarováním, zejména pro potravinářské účely.

*Zdravotní nezávadnost*

MOSTEN GB 005 splňuje požadavky vyhlášky MZ ČR č. 38/2001 Sb., v platném znění, o hygienických požadavcích na výrobky určené pro styk s potravinami a pokrmy. Typ splňuje rovněž požadavky Nařízení Evropského Parlamentu a Rady (ES) č. 1935/2004 a Směrnice Komise 2002/72/ES, v platném znění.

*Poznámka*

Stupeň hořlavosti C-3 dle ČSN 73 0823

Mezinárodní označení ISO 1873-PP-H,G,16-05-045

<i>Ukazatel jakosti</i>	<i>Jednotka</i>	<i>Hodnoty</i>	<i>Zkušební norma</i>
Index toku taveniny (230/2,16)	g/10 min	4 - 6	ČSN EN ISO 1133
Obsah těkavých látek	%	max. 0,1	ISO 1296
Obsah jinobarevných granulí	ks/kg	nepřítomny	čl. 4.3.1.1
Žlutost přírodního granulátu	standard	max. B	ČSN 64 0532
Granulometrie	ks/g	20 - 55	čl. 4.3.1.2
Napětí na mezi kluzu v tahu	MPa	min. 32	ČSN EN ISO 527-1, 2
Modul pružnosti v ohybu	MPa	min. 1300	ČSN EN ISO 178
Teplota průhybu při zatížení (HDT)	°C	min. 53	ČSN EN ISO 75-1, 2

Nahrazuje materiálový list: 12.06.2006

Materiálový list platný od: 17.10.2007

## Prohlášení

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

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

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

Diplomovou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum 5.6.2009

Podpis

## Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

Date 5.6. 2009

Signature