

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**  
Fakulta strojní



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Mechanické vlastnosti polyuretanové pěny

Vedoucí práce:

Ing. Miloslav Vilímek, Ph.D.

Vypracoval:

Adam Lindner

Praha 2018

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Lindner** Jméno: **Adam** Osobní číslo: **459576**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky**  
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Mechanické vlastnosti polyuretanové pěny**

Název bakalářské práce anglicky:

**Mechanical properties of PUR foam**

Pokyny pro vypracování:

Proveďte rešerši odborné literatury na zadané téma.  
Experimentálně otestovat vzorky PUR pěny SAWBONES grade 40, používané v testování jako zástup za kortikální kost.  
Tahová zkouška  
Tlaková zkouška  
Stanovení materiálových parametrů z provedených testů  
Proveďte diskusi vašich výsledků s publikovanými daty výrobce a jiné odborné literatury

Seznam doporučené literatury:

Sciammarella C.A., Sciammarella F.M. (2012) Experimental mechanics of solids. John Wiley and Sons, Chichester  
Ayers, M. P.; Clift, S. E.; Gheduzzi, S.: Morsellised sawbones is an acceptable experimental substitute for the in vitro elastic and viscoelastic mechanical characterisation of morsellised cancellous bone undergoing impaction grafting, MEDICAL ENGINEERING & PHYSICS, Volume: 36 Issue: 1 Pages: 26-31 Published: JAN 2014  
Gilroy, D. and Young, A. M. and Phillips, A. and Wheel, M. and Riches, P. E. (2014) Characterisation and Validation of Sawbones? Artificial Composite Femur material. In: 7th World Congress of Biomechanics, 2014-07-06 - 2014-07-11

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Miloslav Vilímek, Ph.D., odbor biomechaniky FS**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

**Ing. Radek Sedláček, Ph.D., odbor biomechaniky FS**

Datum zadání bakalářské práce: **23.04.2018** Termín odevzdání bakalářské práce: **17.08.2018**

Platnost zadání bakalářské práce:



Ing. Miloslav Vilímek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce



prof. Ing. Milan Růžička, CSc.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry



prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.  
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

26.4.2018

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

## Anotační list

<b>Jméno autora:</b>	Adam Lindner
<b>Název BP:</b>	Mechanické vlastnosti polyuretanové pěny
<b>Anglický název:</b>	Mechanical properties of PUR foam
<b>Akademický rok:</b>	2017 / 2018
<b>Studijní program:</b>	Teoretický základ strojího inženýrství
<b>Zadávací ústav:</b>	Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky
<b>Vedoucí DP:</b>	Ing. Miloslav Vilímek, Ph.D.
<b>Konzultant:</b>	Ing. Radek Sedláček, Ph.D.
<b>Bibliografické údaje:</b>	Počet stran: 35 Počet obrázků: 21 Počet tabulek: 13 Počet příloh: 0
<b>Klíčová slova:</b>	Polyuretan, pěna, mechanické vlastnosti, Sawbones
<b>Keywords:</b>	Polyurethane, rigid foam, mechanical properties, Sawbones
<b>Anotace:</b>	Práce se zabývá tahovou a tlakovou zkouškou materiálu z tvrdé polyuretanové pěny a následným vyhodnocením změřených dat.
<b>Abstract:</b>	This work deals with compressive and tensile test of rigid polyurethane foam material and subsequent evaluation of measured data.

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně a pouze s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Praze dne: 06.06.2018

Adam Lindner  
*Lindner*

## **Poděkování**

Děkuji Ing. Miloslavu Vilímkovi, Ph.D. za cenné rady a vedení bakalářské práce a Ing. Radku Sedláčkovi, Ph.D. za poskytnutí zázemí na měření zkoušek.

## Obsah

Seznam zkratk	3
1. Úvod	4
1.1. Představení tvrdé polyuretanové pěny	4
1.2. Využití tvrdé polyuretanové pěny v lékařství	4
2. Teorie	5
2.1. Struktura tvrdé polyuretanové pěny	5
2.2. Mechanické vlastnosti tvrdé PU pěny	5
2.3. Srovnání mechanických vlastností PU s lidskými kostmi	7
3. Cíle práce	8
4. Metodika	8
4.1. Zkouška tlakem	8
4.1.1. Princip zkoušky	8
4.1.2. Příprava vzorků	9
4.1.3. Příprava zkoušky	9
4.2. Zkouška tahem	11
4.2.1. Princip zkoušky	11
4.2.2. Příprava vzorků	12
4.2.3. Příprava zkoušky	12
5. Naměřené a dopočtené výsledky	14
5.1. Zkouška tlakem	14
5.1.1. Měření	14
5.1.2. Napětí v tlaku a poměrné stlačení	15
5.1.3. Stabilní hladina napětí - $\sigma_{pl}$	16
5.1.4. Konec stabilní hladiny - $e_{pl}$	18
5.1.5. Modul a elastický gradient materiálu	19
5.1.6. Smluvní mez kluzu v tlaku – $R_p$	21
5.1.7. Absorbovaná energie a účinnost absorbování energie	23
5.1.8. Porovnání výsledků různých rychlostí zkoušek	24
5.2. Zkouška tahem	25
5.2.1. Měření	25
5.2.2. Elastický gradient	26
5.2.3. Smluvní mez kluzu v tahu - $R_{0,2}$	27
5.2.4. Mez pevnosti v tahu - $\sigma_{pt}$	29
6. Diskuse	31

7. Závěr.....	32
Bibliografie .....	33
Seznam obrázků .....	34
Seznam tabulek.....	35

## Seznam zkratek

PU		Polyuretan
E	$[ N \cdot mm^{-2} ]$	Modul pružnosti
$\sigma_{pl}$	$[ N \cdot mm^{-2} ]$	Stabilní hladina napětí
$v$	$[ cm \cdot min^{-1} ]$	Rychlost
$l$	$[ mm ]$	Délka
$\sigma_i$	$[ N \cdot mm^{-2} ]$	Napětí v bodě i
$F_i$	$[ N ]$	Síla v bodě i
$S_n$	$[ mm^2 ]$	Průřez vzorku
$e$	$[ - ]$	Poměrná změna délky
$f_i$	$[ mm ]$	Posuv v bodě i
$f_0$	$[ mm ]$	Posuv ve výchozím bodě
$h_n$	$[ mm ]$	Výška vzorku
$F_{70}$	$[ N ]$	Síla při dosažení 70 % $\sigma_{pl}$
$F_{20}$	$[ N ]$	Síla při dosažení 20 % $\sigma_{pl}$
$s$		Směrodatná odchylka
$e_{pl}$	$[ - ]$	Konec stabilní hladiny
$R_p$	$[ N \cdot mm^{-2} ]$	Smluvní mez kluzu v tlaku
$W$	$[ MJ \cdot m^{-3} ]$	Absorbovaná energie
$W_{ef}$	$[ \% ]$	Účinnost absorbování energie
$l_v$	$[ mm ]$	Volná délka extenzometru
$R_{0,2}$	$[ N \cdot mm^{-2} ]$	Smluvní mez kluzu v tahu
$\sigma_{pt}$	$[ N \cdot mm^{-2} ]$	Mez pevnosti v tahu
$F_{max}$	$[ N ]$	Maximální dosažená síla



# 1. Úvod

## 1.1. Představení tvrdé polyuretanové pěny

Výroba polyuretanu (dále jen PU) tkví ve smíchání dvou hlavních chemikálií, polyolu a izokyanátu, v různých poměrech dle požadovaných výsledných vlastností. Pro úpravu výsledných vlastností PU lze přidávat další příměsi, např. vlákna vlny, kovy, kartonový papír a jiné, kdy například přidání kovu zvýší pevnost v tlaku, nebo vlákna vlny způsobí snížení modulu pružnosti. [1]

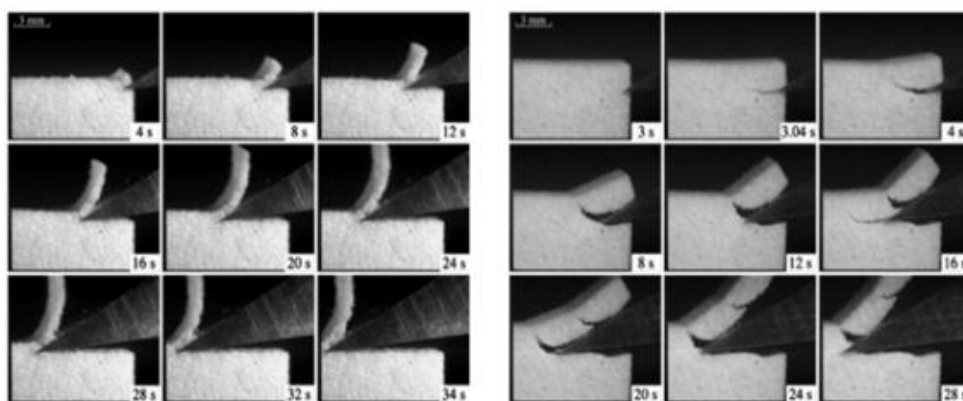
Tvrdé polyuretanové pěny se dnes používají v mnoha odvětvích. V porovnání s polyethylenem a polytetrafluorethylenem vykazuje PU nejvhodnější materiálové vlastnosti pro využití v medicínské oblasti. Polyuretany mají podstatnou roli v podobě zkušebních materiálu pro výcvik lékařů a testování medicínských nástrojů. Jsou využívány například pro ověřování a mechanické zatěžování kostních spojů pomocí šroubů. [2]

Oblíbenost PU v testování je způsobena více faktory. Jedním z hlavních problémů užívání lidských kostí je etičnost, omezená dostupnost, náročné skladování a udržování. Různost jejich tvarů a velikostí, neshodná hustota a struktura u dvou rozdílných exemplářů prakticky znemožňuje opakování testů a jejich vzájemné porovnání. PU je tedy v porovnání s lidskými kostmi levnější a vhodnější materiál pro provádění opakovaných měření a jejich následné vyhodnocování a porovnávání. [3]

## 1.2. Využití tvrdé polyuretanové pěny v lékařství

PU bloky se používají na mechanické testování šroubů, které jsou určeny k fixaci zlomenin a ukotvení implantátů. Měří se například axiální síla potřebná pro vytažení (spíše vytržení) plně zašroubovaného šroubu, točivý moment vhodný pro utažení nebo naopak potřebný moment k povolání šroubu.

Vrtání do PU bloku se používá k simulaci metody využívání kostních štěpů pro léčbu složitých fraktur, kdy se pacientovi odebere část tkáně ze zdravé kosti a aplikuje se do poškozené kosti pro zlepšení regenerace. Při odebrání kostních štěpů je snaha o co nejmenší poškození okolní tkáně nástrojem. Nejčastěji se používá rotační vrták, který zároveň řeže a sbírá odebranou tkáň. V závislosti na geometrii nástroje a jeho nastavení se liší odebíraná tříška, která může být plynulá, nebo dělená (Obr. 1). Negativním prvkem použití rotačního vrtáku je vyšší teplota, která vzniká při dělení materiálu a poškozuje okolní tkáň. Tato problematika jde ovlivnit vhodným nastavením otáček nástroje a velikosti úběru materiálu za otáčku. Všechna tato nastavení a úpravy se před uvedením do praxe nejdříve testují na PU blocích. [3]

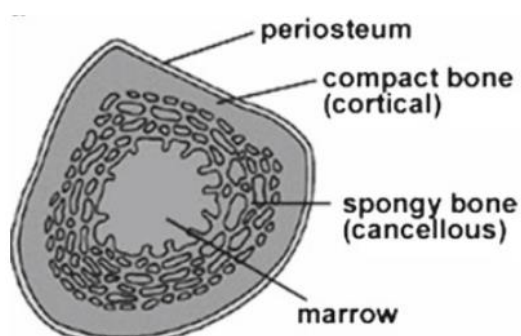


Obr. 1: Odebírání materiálu PU [3]

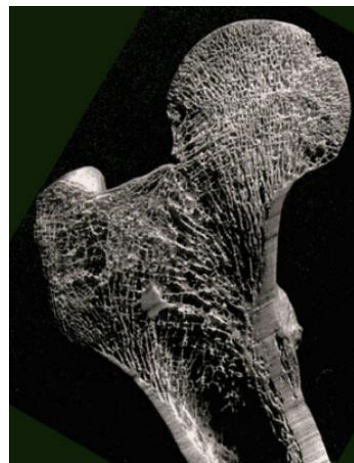
## 2. Teorie

### 2.1. Struktura tvrdé polyuretanové pěny

Lidská kost se skládá ze dvou struktur, kompaktní a trámčité části obklopené okosticí. Vnější vrstvy kompaktní kosti zajišťují mechanickou pevnost a udávají tvar kosti, zatímco vnitřní spongiózní výplň odlehčuje kost a poskytuje místo pro kostní dřeň, krevní zásobení a nervová vlákna. Okostice je vazivový obal, který pomocí systému cév zajišťuje výživu zvenčí. Trámčině se podobá struktura PU, ovšem u lidských kostí není přesně stanovená hustota, která se liší dle typu kosti, stáří, obsahu minerálních látek a pohlaví. [4]

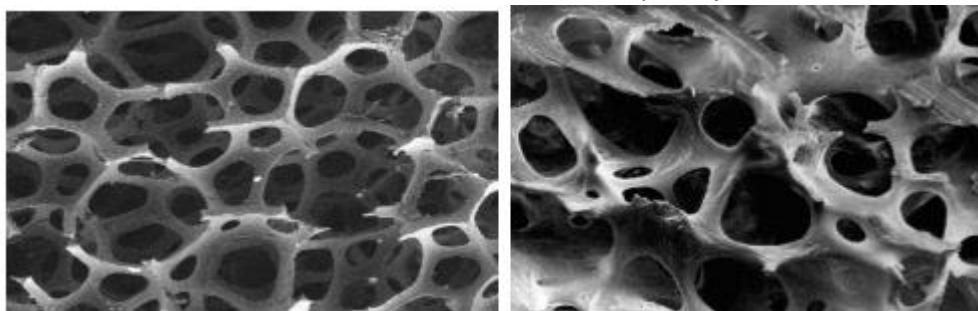


Obr. 2: Vnitřní struktura lidské kosti [4]



Obr. 3: Podélný řez vrchní části stehenní kosti [4]

Vhodnost polyuretanu vychází z podobné mikrostruktury vnitřní spongiózní části kosti. Hlavní vliv na mechanické vlastnosti PU má velikost a charakter pórů, který se odvíjí z hustoty materiálu. Otevřenou trámčitou strukturu PU lze vidět na Obr. 4 vlevo a vpravo je trámčina lidské kosti.

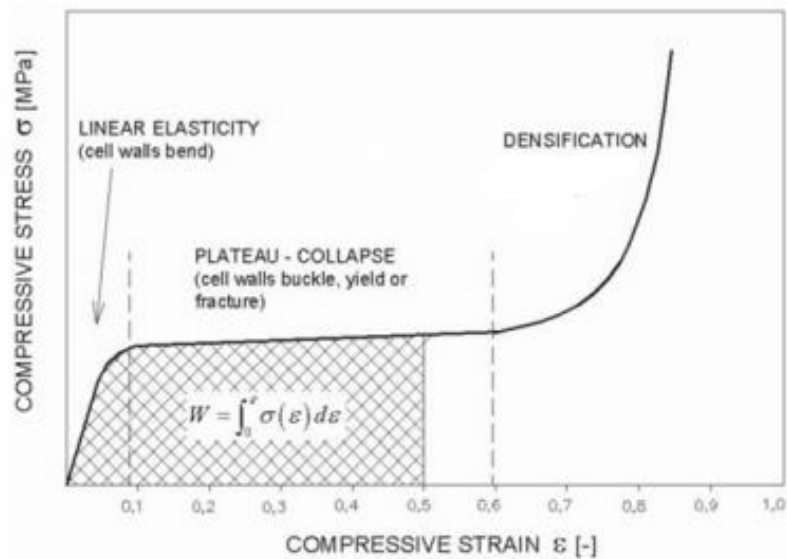


Obr. 4: Vlevo mikrostruktura PU, vpravo mikrostruktura lidské kosti [3]

### 2.2. Mechanické vlastnosti tvrdé PU pěny

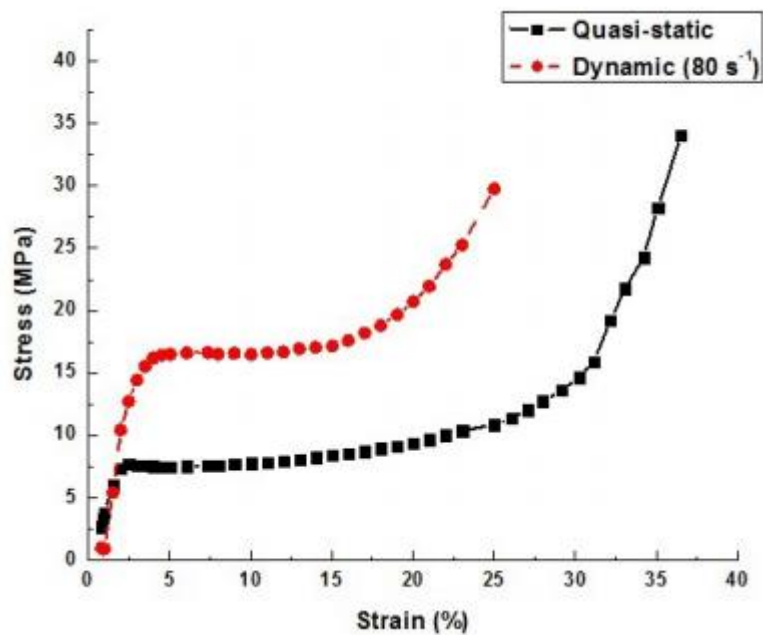
Typická křivka při zatěžování tlakem je zobrazena na Obr. 5, teoreticky ji lze rozdělit do tří různých oblastí. První je oblast lineární elasticity, kdy se stěny materiálu prohýbají, dle které lze charakterizovat modul materiálu. V druhé oblasti dochází k postupnému stlačování a zhutňování materiálu, kdy na poměrně malý nárůst napětí připadá velký stupeň deformace. V třetí oblasti se

materiál stlačí natolik, že již nemá další prostor ke kumulaci a nastává prudký nárůst napětí při malé deformaci. [5]



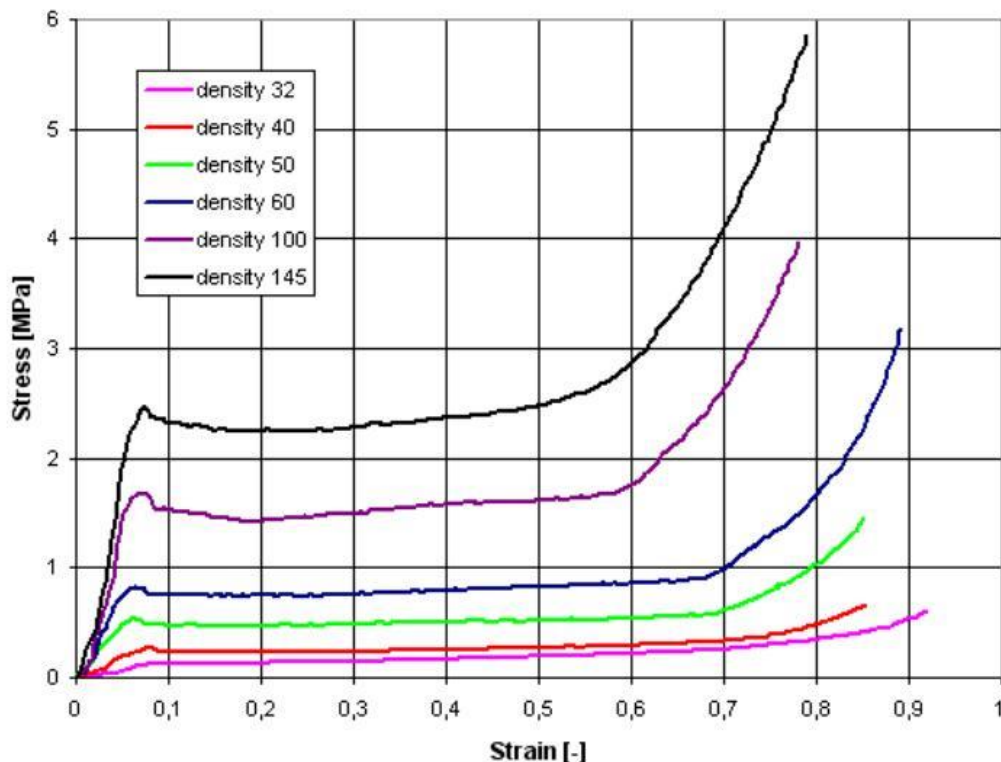
Obr. 5: Typická křivka talkového zatěžování PU [5]

Mechanické vlastnosti PU se odvíjí dle charakteru zatěžování, vliv má i teplota, nicméně výraznější odchylky se projeví při změnách teplot v řádu stovek stupňů [6]. Při dynamickém zatěžování o frekvenci 80 Hz PU bloku 50x50x50 mm, hustoty 288 kg/m<sup>3</sup> je mezní napětí v tlaku vyšší než při postupném zatěžování (Obr. 6). Zároveň třetí oblast křivky začíná při 15 % relativního stlačení oproti 25 % při postupném zatěžování. Efekt zhutnění se projevuje při menším stlačení. Z toho lze vyvodit, že velikost stlačení je závislá na způsobu a rychlosti zatížení. [5]



Obr. 6: Graf postupného a dynamického zatížení v tlaku [5]

Z mechanických zatěžovacích testů prováděných postupným stlačováním PU desek o rozměrech 50x50x30 mm a hustotách 32, 40, 50, 60, 100 a 145 kg/m<sup>3</sup> vyplývá, že se zvyšováním hustoty PU se zároveň zvyšuje hodnota mezního napětí, které daný materiál dokáže snést (Obr. 7). [7]



Obr. 7: Zatěžovací charakteristika PU desek tlakem [7]

### 2.3. Srovnání mechanických vlastností PU s lidskými kostmi

Jak již bylo zmíněno výše, PU vykazuje vhodnost pro simulaci tlaku, tahu a vrtání do lidské kosti, ovšem testy stříhu se jeví nepříliš shodné v porovnání s výsledky měření na lidských kostech. [3]

Pro dolní čelist stáří 56–90 let s hustotou 0,85–1,53 g·cm<sup>-3</sup> se hodnoty elastického modulu pro trabekulární kost pohybovali v rozmezí 3,5–125,6 N·mm<sup>-2</sup> s průměrem 56 N·mm<sup>-2</sup> a mez pevnosti v tlaku průměrně 3,9 N·mm<sup>-2</sup>. [8]

V následující Tab. 1 jsou srovnány hodnoty mezního napětí v tlaku a modulů pružnosti z různých publikací.

Tab. 1: Srovnání modulu pružnosti a meze pevnosti v tlaku z různých publikací

	Femur [9]	Femur z PU [2]	Spongiózní dolní čelist [8]	Spongiózní PU [2]
E [GPa]	17,2	16,7	0,056	0,081
Mez pevnosti v tlaku [MPa]	167	157	3,9	3,2

Dle předchozího přehledu lze již nyní předpovídat chování materiálu a očekávat podobné rozložení křivek a naměřených hodnot. U materiálu Sawbones 1522-05 Block GP40 jsou očekávány podobné zatěžovací křivky, které se budou lišit v číselných hodnotách.

### 3. Cíle práce

Cílem této práce je stanovení hodnot materiálových vlastností pro tvrdou polyuretanovou pěnu od výrobce Sawbones s označením 1522-05 Block GP40. Tyto hodnoty budou následně použity v projektu, který se zabývá vrtáním do lidské čelisti. V projektu se řeší ohřívání vrtáku a nevhodné tepelné ovlivnění oblasti okolo vrtané díry. Pro simulaci tohoto procesu se používá právě materiál od firmy Sawbones.

Bude provedena tlaková a tahová zkouška materiálu a následně vyhodnoceny naměřené údaje. Výsledek bude porovnán s hodnotami uváděnými výrobcem Tab. 1. Výrobce uvádí jen některé mechanické vlastnosti, v rámci této práce budou vyhodnoceny i jiné vlastnosti, které by bylo možné využít v projektu.

Tab. 2: Hodnoty udávané výrobcem [2]

Hustota [g·cm <sup>-3</sup> ]	Tlak		Tah		Střih	
	Pevnost [N·mm <sup>-2</sup> ]	Modul [N·mm <sup>-2</sup> ]	Pevnost [N·mm <sup>-2</sup> ]	Modul [N·mm <sup>-2</sup> ]	Pevnost [N·mm <sup>-2</sup> ]	Modul [N·mm <sup>-2</sup> ]
0,64	31	759	19	1000	11	130

### 4. Metodika

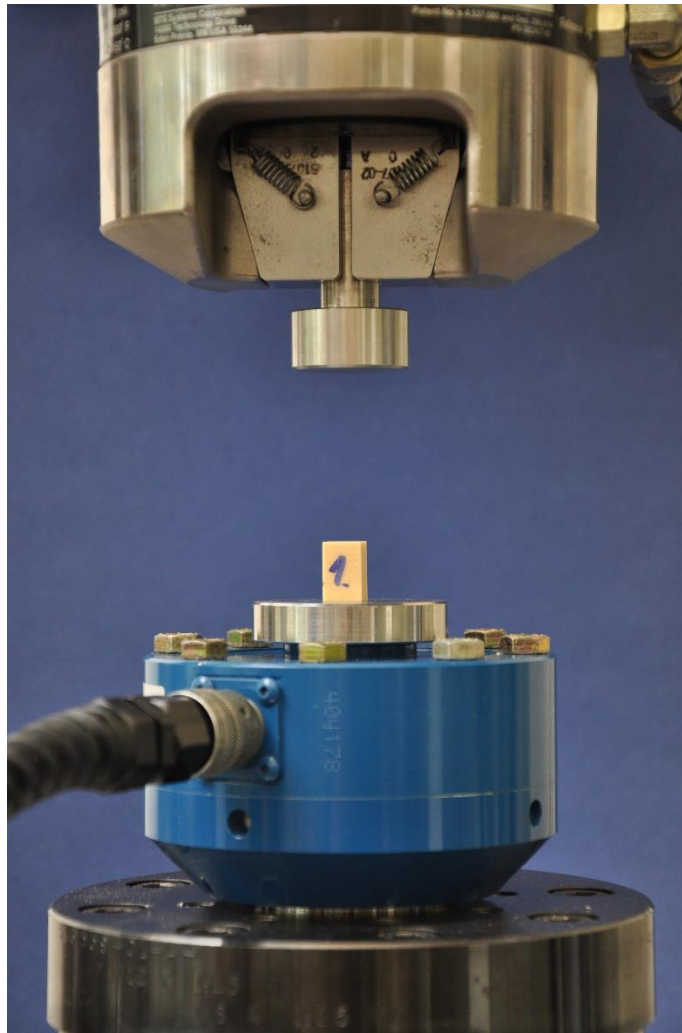
#### 4.1. Zkouška tlakem

##### 4.1.1. Princip zkoušky

Metodika provedení zkoušky vychází z normy ČSN ISO 13314 - Mechanické zkoušení kovů – Zkoušení tvářitelnosti – Zkouška porézních a pěnových kovů tlakem. Všechna měření byla prováděna na fakultě strojní v akreditované laboratoři mechanických zkoušek č. 1379 při teplotě 23 ± 5 °C.

Je třeba důkladně změřit rozměry jednotlivých vzorků před započnutím vlastní zkoušky tlaku. Následně se vzorek umístí do osy mezi dvě rovnoběžné tlakové desky (Obr. 8) a je zatěžován konstantní rychlostí 10<sup>-3</sup> s<sup>-1</sup> až 10<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>. Během zkoušky je zaznamenávána síla a posuv za účelem stanovení charakteristických hodnot. Vzorek je postupně zatěžován na 70 % stabilní hladiny napětí, při dosažení této hodnoty je odlehčen na 20 % stabilní hodnoty napětí a opět je zatěžován, až do požadovaného stlačení. [10]

Stabilní hladina napětí ( $\sigma_{pl}$ ) je aritmetický průměr napětí odečtený mezi 20 % a 30 % stlačení. Prvotní hodnota se určí provedením předběžné zkoušky. [10]



Obr. 8: Umístění vzorku

#### 4.1.2. Příprava vzorků

Geometrie vzorku pravoúhlého průřezu musí mít dle normy minimální délku strany 10 mm a poměr výšky k délce hrany v rozmezí 1 až 2. Délka hrany byla zvolena 10 mm a poměr 1,5 z čehož vyplývá výška rovná 15 mm. Vzorků o rozměrech 10 x 10 x 15 mm bylo celkem vyhotoveno 21, kdy pro jedno měření je požadováno minimálně třech vzorků. Byla provedena 2 měření, každá s počtem 10 vzorků a poslední vzorek byl použit jako ladící pro experimentální stanovení a ověření  $\sigma_{pl}$  udávaného výrobcem. Vzorky byly nařezány pomocí pily Secotom 50 od firmy Struers.

#### 4.1.3. Příprava zkoušky

Každému vzorku bylo přiřazeno číslo, které bylo napsáno lihovým fixem na čelní stranu a pro zamezení jejich záměny byly vzorky ještě rozmístěny do separátních přihrádek v boxu viz Obr. 9.



Obr. 9: Rozdělení a popsání vzorků

Každý vzorek byl proměřen digitálním mikrometrem MAHR 40EX. Byla změřena šířka a délka, pokaždé na třech různých místech vzorku, a v jednom místě výška. Z naměřených hodnot pro šířku a délku byl následně vypočten aritmetický průměr. Naměřené a vypočtené hodnoty jsou uvedeny v Tab. 3.

Tab. 3: Naměřené a vypočtené rozměry vzorků

Vzorek	Šířka [mm]	Šířka [mm]	Šířka [mm]	Ø Šířka [mm]	Délka [mm]	Délka [mm]	Délka [mm]	Ø Délka [mm]	Výška [mm]
1	9,801	9,755	9,711	9,756	10,108	10,048	9,934	10,030	15,048
2	10,151	10,006	9,835	9,997	9,479	9,489	9,491	9,486	15,325
3	10,110	10,020	9,944	10,025	9,921	9,911	9,899	9,910	15,073
4	10,124	10,043	9,952	10,040	9,298	9,286	9,272	9,285	15,069
5	10,001	10,157	10,287	10,148	9,835	9,828	9,806	9,823	15,355
6	9,976	9,984	9,999	9,986	9,517	9,541	9,566	9,541	15,177
7	9,575	9,619	9,657	9,617	10,012	9,879	9,725	9,872	15,304
8	10,259	10,247	10,230	10,245	10,093	10,005	9,944	10,014	15,062
9	10,557	10,384	10,221	10,387	9,619	9,626	9,641	9,628	15,370
10	9,641	9,688	9,662	9,664	10,006	10,076	10,143	10,075	15,067

11	9,834	9,873	9,908	9,872	9,899	9,930	9,943	10,091	15,129
12	10,091	10,006	9,927	10,008	9,813	9,801	9,785	9,800	15,078
13	10,169	10,240	10,345	10,251	10,528	10,685	10,821	10,678	15,351
14	9,674	9,664	9,651	9,663	10,114	10,285	10,412	10,270	15,368
15	9,633	9,615	9,595	9,614	9,997	9,982	9,971	9,983	15,184
16	9,588	9,570	9,561	9,573	9,993	9,978	9,959	9,977	15,205
17	10,167	10,072	9,989	10,076	10,142	10,309	10,447	10,299	15,046
18	9,972	9,983	9,993	9,983	10,18	10,087	10,013	10,093	15,183
19	9,648	9,666	9,673	9,662	10,68	10,534	10,346	10,520	15,374
20	10,024	10,012	10,002	10,013	9,977	9,955	9,932	9,955	15,194
L	9,920	9,940	9,956	9,939	9,513	9,531	9,539	9,528	15,181

Pro první měření byla rychlost posuvu odvozena z normy a stanovena pro střední hodnotu  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$  až  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$ , rovnice ( 1 ).

$$v_1 = 0,005 \cdot l = 0,005 \cdot 0,015 = 7,5 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 4,5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1} \quad ( 1 )$$

Pro druhé měření byla zvolena rychlost desetkrát větší  $v_2 = 45 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ , za účelem zjištění, zda je velikost deformace a hodnota napětí závislá na rychlosti posuvu.

## 4.2. Zkouška tahem

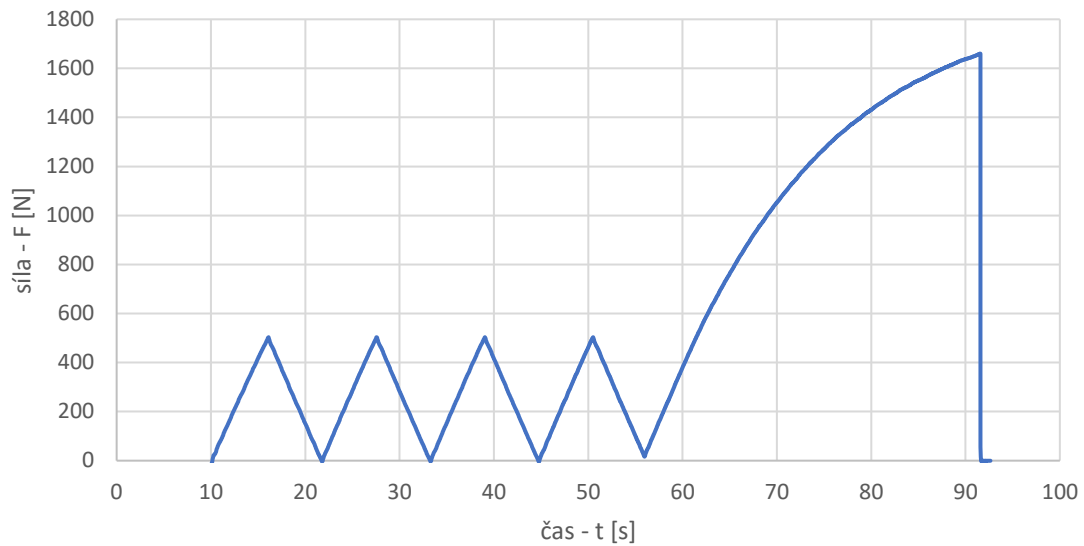
### 4.2.1. Princip zkoušky

Všechna měření a zkoušky byly provedeny na fakultě strojní v akreditované laboratoři mechanických zkoušek č. 1379 při teplotě  $23 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Princip zkoušky je obdobný zkoušce tlakové. Vzorky o rozměrech 20 x 80 x 5 mm byly nejdříve čtyřikrát cyklicky zatíženy na hodnotu 500 N a následně odlehčeny na 20 N. Po těchto cyklech zatěžování se pokračovalo až do samotné destrukce vzorku. Rychlost zatěžování vzorků byla zvolena  $4 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ , na základě vhodného množství nasbíraných dat. Vyhodnocování vzorků probíhalo z dat získaných od počátku čtvrtého cyklu do destrukce. Tato metodika byla zvolena z důvodu získání co nejpřesnějších elastických vlastností vzorku. Průběh zatěžovací síly lze vidět na Obr. 10.



## Průběh síly



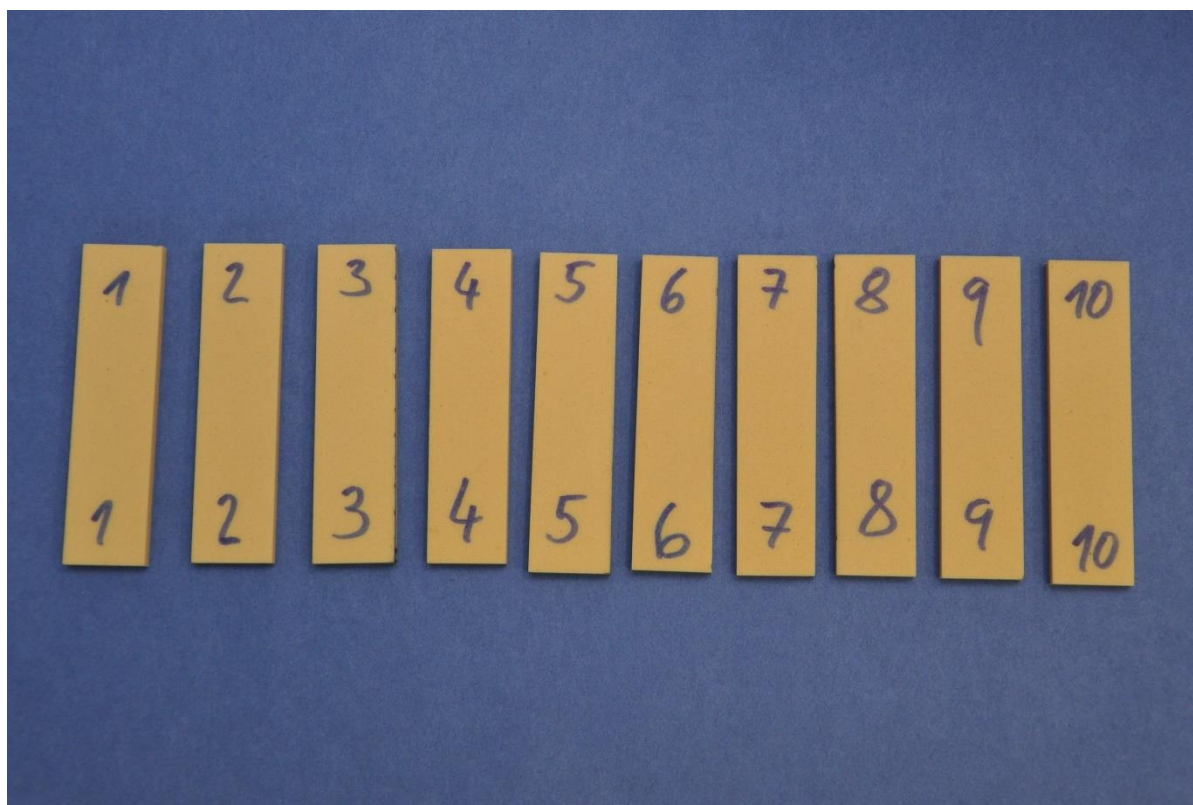
Obr. 10: Graf průběhu síly

### 4.2.2. Příprava vzorků

Bylo připraveno celkem dvanáct vzorků, kde dva z nich byly určeny jako ladící, pro otestování nastavení sil na cyklické zatěžování a ověření údajů udávaných výrobcem. Vzorky byly nařezány pomocí pily Secotom 50 od firmy Struers v rozměrech 20 x 80 x 5 mm. Tvar vzorků pro tahovou zkoušku by bylo výhodnější upravit zúžením ve středu, aby bylo zajištěno místo destrukce mimo čelisti. Pro takovou úpravu by bylo nejspíše nejlepší volit řezání vodním paprskem, které by značně prodražilo experiment. V případě vzorků ve tvaru pásku lze předpokládat místo destrukce v oblasti ovlivněné napětím vznikajícím po upnutí vzorku mezi čelisti.

### 4.2.3. Příprava zkoušky

Na všechny vzorky bylo lihovým fixem napsáno pořadové číslo. Číslo byla napsána v horní a dolní části, aby i po destrukci bylo možné vzorky přesně identifikovat. Připravené vzorky lze vidět na Obr. 11.



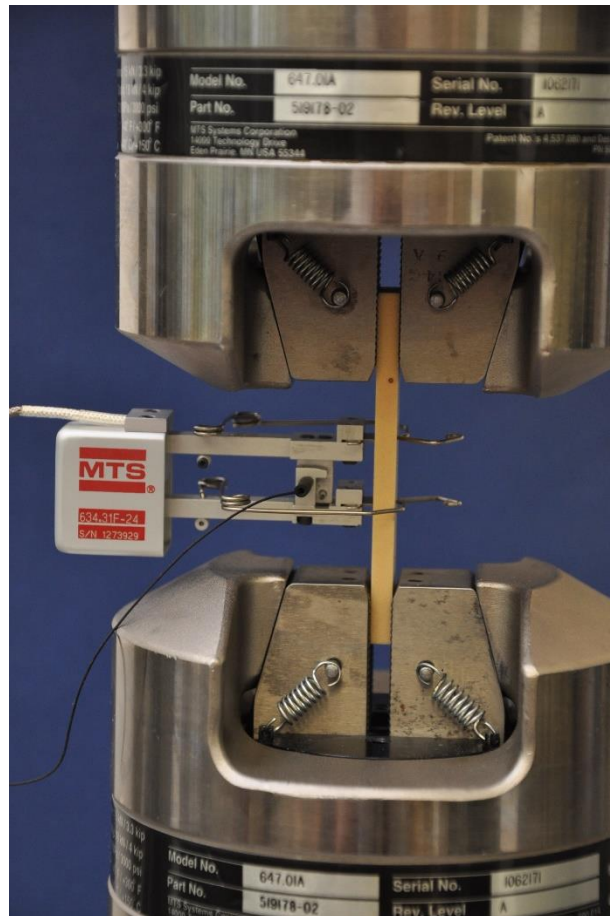
Obr. 11: Připravené vzorky

Každý vzorek byl před zkouškou důkladně proměřen digitálním mikrometrem MAHR 40EX. U každého vzorku byla změřena šířka a tloušťka ve třech různých místech a jedenkrát délka. Z hodnot šířek a tloušťek byl vypočten aritmetický průměr.

Tab. 4: Změřené a dopočtené rozměry vzorků

Vzorek	Šířka [mm]	Šířka [mm]	Šířka [mm]	ØŠířka [mm]	Tloušťka [mm]	Tloušťka [mm]	Tloušťka [mm]	ØTloušťka [mm]	Výška [mm]
1	20,018	19,894	19,844	19,919	4,930	5,052	5,146	5,043	80,84
2	19,803	19,865	19,993	19,887	4,573	4,580	4,551	4,568	80,82
3	19,797	20,166	20,494	20,152	5,077	5,029	4,735	4,947	80,78
4	20,103	19,920	19,729	19,917	5,036	5,238	5,404	5,226	79,40
5	19,654	19,940	20,350	19,981	5,148	5,113	5,064	5,108	80,75
6	19,221	19,550	19,820	19,530	5,419	5,638	5,819	5,625	79,36
7	19,422	19,701	20,053	19,725	4,549	4,542	4,568	4,553	80,77
8	19,510	19,795	20,177	19,827	4,776	4,759	4,731	4,755	80,76
9	19,709	19,807	19,932	19,816	4,773	4,823	4,758	4,785	80,87
10	19,755	19,843	19,936	19,845	4,865	4,855	4,830	4,850	80,86
L1	20,354	20,488	20,661	20,501	5,768	5,464	5,247	5,493	79,39
L2	19,700	20,043	20,399	20,047	4,977	4,906	4,827	4,903	80,74

Po změření rozměrů byl na vzorek umístěn extenzometr. Použit byl extenzometr s označením PM 00/03 a rozsahem  $\pm 0,4/4$  mm. Po nasazení extenzometru byl vzorek upnut do čelistí ve stroji MTS 858.2 Mini Bionix. (Obr. 12)



Obr. 12: Upnutí vzorku s extenzometrem

## 5. Naměřené a dopočtené výsledky

### 5.1. Zkouška tlakem

#### 5.1.1. Měření

Měření bylo prováděno na stroji MTS 858.2 Mini Bionix se siloměrem s rozsahem  $\pm 5000$  N. Byly elektronicky zaznamenávány hodnoty posuvu, síly a času. Ukázkové hodnoty měření lze vidět v grafu na Obr. 13, kde je vyhotoven graf závislosti síly na posuvu. V první části lze vidět náběhovou část, kdy dochází k posuvu horní desky přístroje ke vzorku. Růst síly nastává při kontaktu desky se vzorkem a začíná stlačování. Zatěžování probíhá do chvíle, kdy dojde k dosažení síly, která odpovídá 70 % stabilní hladiny napětí, v tento moment započne odlehčování do síly odpovídající 20 % stabilní hodnoty napětí. Následně je vzorek zatěžován až do limitu snímače, tedy 5000 N.



Obr. 13: Graf závislosti síly na posuvu

Vzorové ukázky vypočtených hodnot jsou uváděny pro první měřený vzorek, aby byl demonstrován postup, který je u všech následujících vzorků shodný. Výsledky pro všechny vzorky budou uvedeny vždy v dané kapitole pomocí souhrnné tabulky. Skupina vzorků A byla zatěžována rychlostí  $v_1 = 4,5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  a skupina B rychlostí  $v_2 = 45 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ .

### 5.1.2. Napětí v tlaku a poměrné stlačení

Z hodnot síly bylo vypočteno napětí v tlaku pomocí rovnice ( 2 ). Jako výchozí bod výpočtu byl zvolen moment, kdy stroj přišel do záběru a bylo naměřena síla větší než 1 N.

$$\sigma_i = \frac{F_i}{S_n} \quad [N \cdot \text{mm}^{-2}] \quad (2)$$

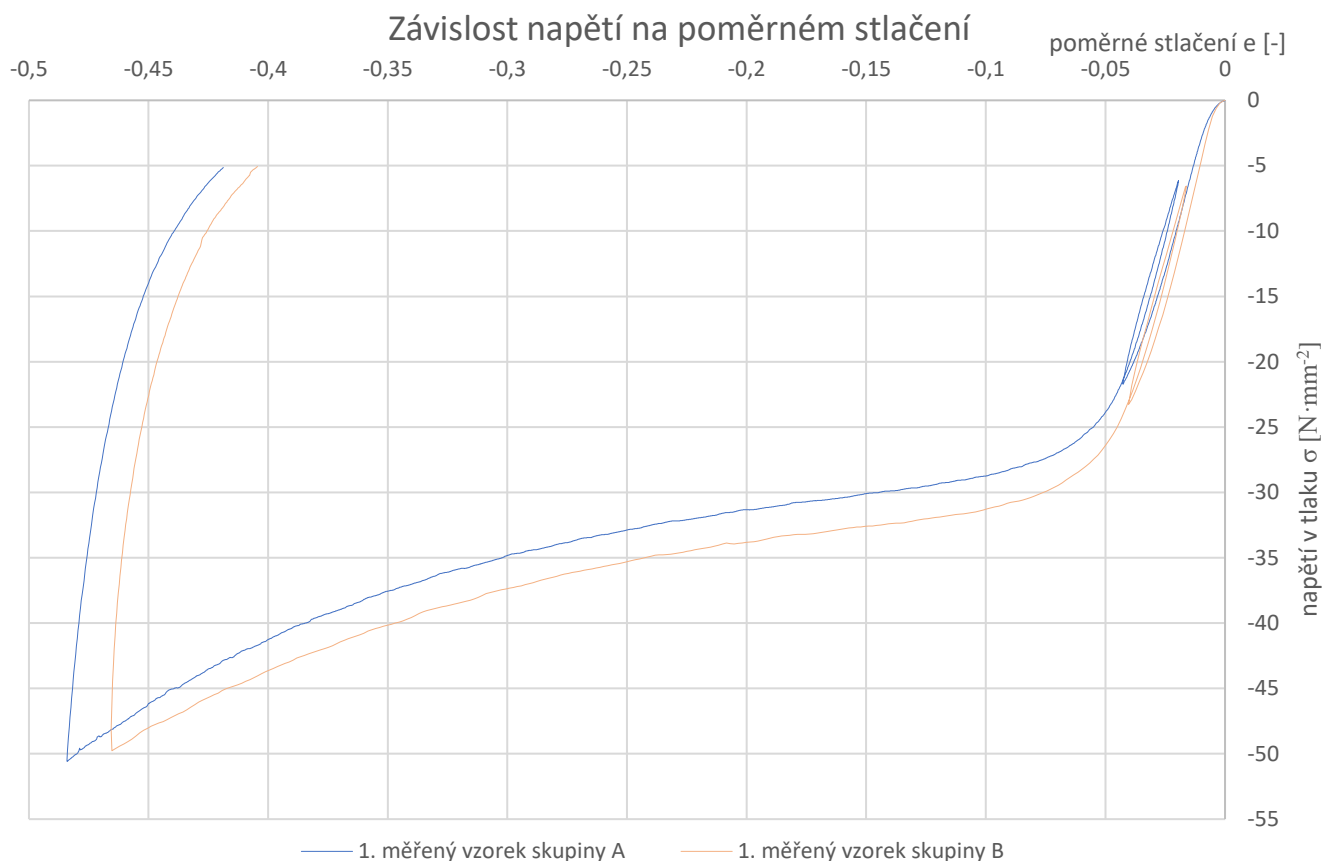
Kde  $F_i$  je síla v daném bodě a  $S_n = \varnothing \text{ Šírka} \cdot \varnothing \text{ Délka}$  vzorku.

Poměrné stlačení  $e [-]$  bylo stanoveno z výchozího bodu dle rovnice ( 3 ).

$$e = \frac{f_i - f_0}{h_n} \quad [-] \quad (3)$$

Kde  $f_i$  je posuv v daném bodě,  $f_0$  posuv ve výchozím bodě a  $h_n$  je naměřená výška vzorku.

Výsledný graf vypočtených hodnot je zobrazen na Obr. 14.



Obr. 14: Graf závislost napětí na poměrném stlačení

### 5.1.3. Stabilní hladina napětí - $\sigma_{pl}$

Stabilní hladina napětí byla stanovena aritmetickým průměrem napětí mezi 20 % a 30 % deformace.

$$\sigma_{pl} = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_i}{n} [N \cdot mm^{-2}] \quad (4)$$

Ze stabilní hladiny napětí byl následně učiněn odhad  $\sigma_{pl}$  pro další měření, ze kterého byly dopočteny síly  $F_{70}$  a  $F_{20}$ , kdy  $F_{70}$  je síla, při které započne odlehčování a síla  $F_{20}$ , kdy se vzorek začne opět zatěžovat.

$$F_{70} = 0,7 \cdot \sigma_{pl} \cdot S_n [N] \quad (5)$$

$$F_{20} = 0,2 \cdot \sigma_{pl} \cdot S_n [N] \quad (6)$$

Odhadované hodnoty  $\sigma_{pl}$  a vypočtené hodnoty  $F_{70}$ ,  $F_{20}$ ,  $\sigma_{pl}$  s průměrem hodnot  $\overline{\sigma_{pl}}$  a směrodatnou odchylkou lze vidět v Tab. 5. Směrodatná odchylka byla stanovena dle rovnice (8).

$$\bar{\sigma}_{pl} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sigma_{pli} \quad [N \cdot mm^{-2}] \quad (7)$$

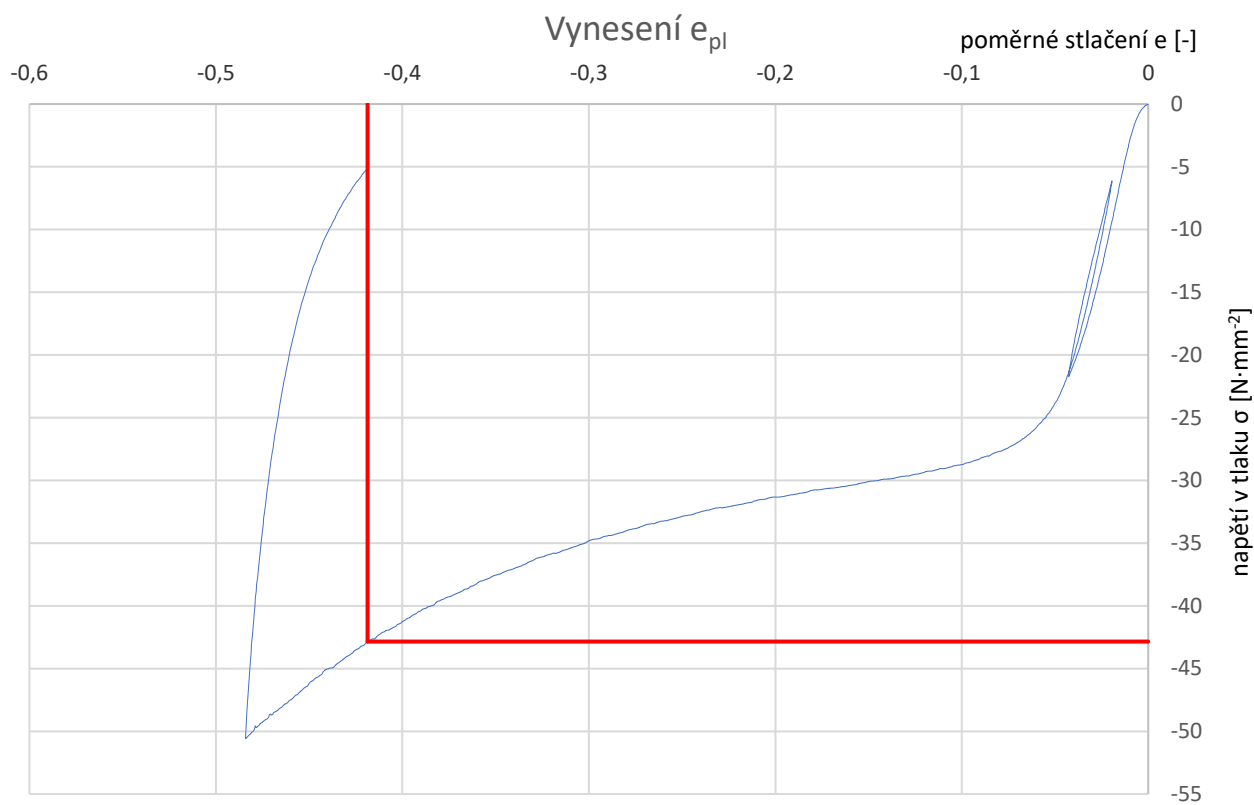
$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\sigma_{pli} - \bar{\sigma}_{pl})^2} \quad [N \cdot mm^{-2}] \quad (8)$$

Tab. 5: Vypočtené hodnoty sigma plastické,  $F_{70}$  a  $F_{20}$

Skupina	číslo vzorku	Odhadovaná $\sigma_{pl}$ [ $N \cdot mm^{-2}$ ]	$F_{70}$ [N]	$F_{20}$ [N]	$\sigma_{pl}$ [ $N \cdot mm^{-2}$ ]	odchylka	
A	1	31	2123	607	32,96	<b>32,85</b>	<b>0,26</b>
	2	32	2124	607	32,65		
	3	33	2295	656	33,27		
	4	33	2153	615	33,08		
	5	33	2303	658	32,56		
	6	33	2201	629	32,92		
	7	33	2193	627	32,43		
	8	33	2370	677	33,06		
	9	33	2310	660	32,66		
	10	33	2249	643	32,91		
B	11	33	2301	657	35,41	<b>35,73</b>	<b>0,42</b>
	12	35	2403	687	36,07		
	13	35	2682	766	35,05		
	14	35	2431	695	35,48		
	15	35	2352	672	36,22		
	16	35	2340	669	36,14		
	17	36	2615	747	35,59		
	18	36	2539	725	35,87		
	19	36	2562	732	35,27		
	20	36	2512	718	36,18		

#### 5.1.4. Konec stabilní hladiny - $e_{pl}$

Dle normy ČSN ISO 13314 se konec stabilní hladiny stanoví jako bod na křivce napětí-deformace, ve kterém je napětí 1,3násobkem  $\sigma_{pl}$ . Viz Obr. 15.



Obr. 15: Graf odečtení konce stabilní hladiny

Odečtené hodnoty  $e_{pl}$ , jejich průměr a směrodatnou odchylku naleznete v Tab. 6.

Tab. 6: Hodnoty konce stabilní hladiny

skupina	číslo vzorku	$e_{pl}$ [-]	odchylka	skupina	číslo vzorku	$e_{pl}$ [-]	odchylka		
A	1	0,4187	0,4172	0,0011	B	11	0,4290	0,4307	0,0016
	2	0,4150				12	0,4293		
	3	0,4176				13	0,4318		
	4	0,4181				14	0,4300		
	5	0,4162				15	0,4320		
	6	0,4168				16	0,4313		
	7	0,4161				17	0,4282		
	8	0,4183				18	0,4320		
	9	0,4178				19	0,4332		
	10	0,4170				20	0,4307		

#### 5.1.5. Modul a elastický gradient materiálu

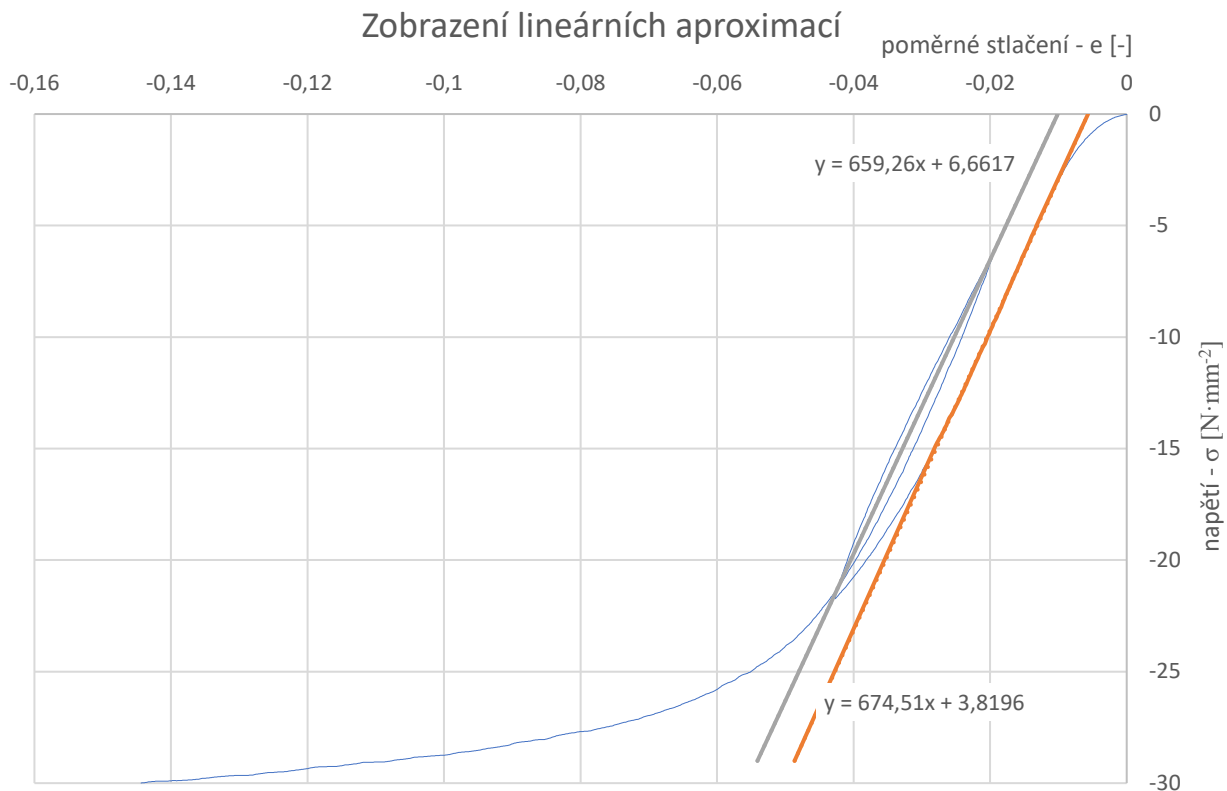
Modul materiálu byl stanoven směrnici lineární aproximace počáteční fáze zatěžování. Lineární aproximace hodnot byla provedena v programu Microsoft Excel.

Elastický gradient je směrnice elastické přímky. Elastická přímka je sečnou získanou z hysterezní smyčky, která se objeví během odlehčování a následného zatěžování. Elastický gradient reprezentuje tuhost závislou na porézności, nikoliv modul materiálu a obecně se mění v průběhu stlačování. [10]

Elastická přímka byla nalezena jako spojnice dvou bodů. První bod byl stanoven jako průsečík počátku a konce hysterezní křivky, kdy byly nalezeny dva téměř shodné body v časech při začátku a konci hysterezní křivky, ze kterých byl udělán průměr. Druhý bod byl určen, jako lokální maximum hysterezní křivky.

Přiblížení zatěžovacího grafu s vyhotovenými aproximačními přímkami a jejich rovnicemi je zobrazeno na Obr. 16. Stanovené hodnoty modulu a elastického gradientu včetně jejich průměrů a směrodatných odchylek všech vzorků jsou umístěny v Tab. 7.





Obr. 16: Graf lineárních aproximací

Tab. 7: Modul a elastický gradient vzorků

skupina	číslo vzorku	Modul [ $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$ ]		odchylka	Elastický gradient [ $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$ ]		odchylka
A	1	673,62	704,54	11,749	659,26	636,90	11,744
	2	709,13			655,95		
	3	711,60			637,99		
	4	705,87			633,14		
	5	704,15			626,28		
	6	718,85			636,15		
	7	704,84			623,63		
	8	706,47			634,28		
	9	706,70			630,71		
	10	704,14			631,56		

B	11	742,43	755,02	13.612	687,37	682,54	12,431
	12	760,69			690,87		
	13	729,30			674,62		
	14	754,78			675,91		
	15	769,83			702,89		
	16	766,62			688,72		
	17	743,20			657,39		
	18	763,14			690,77		
	19	750,02			680,07		
	20	770,21			676,83		

#### 5.1.6. Smluvní mez kluzu v tlaku – Rp

Smluvní mez kluzu v tlaku se odečte z grafu v bodě průsečíku rovnoběžky elastické přímky odsazené o 1 % poměrného stlačení. Rovnice rovnoběžky byla získána matematickou úpravou rovnice ( 9 ) elastické přímky. Následující rovnice jsou platné pouze pro první měřený vzorek, u zbylých vzorků se postupovalo obdobně.

$$y = 659,26x + 6,6617 \quad ( 9 )$$

Kdy na ose x je třeba hodnoty o 0,01 menší.

$$x = \frac{y - 6,6617}{659,26} - 0,01 \quad ( 10 )$$

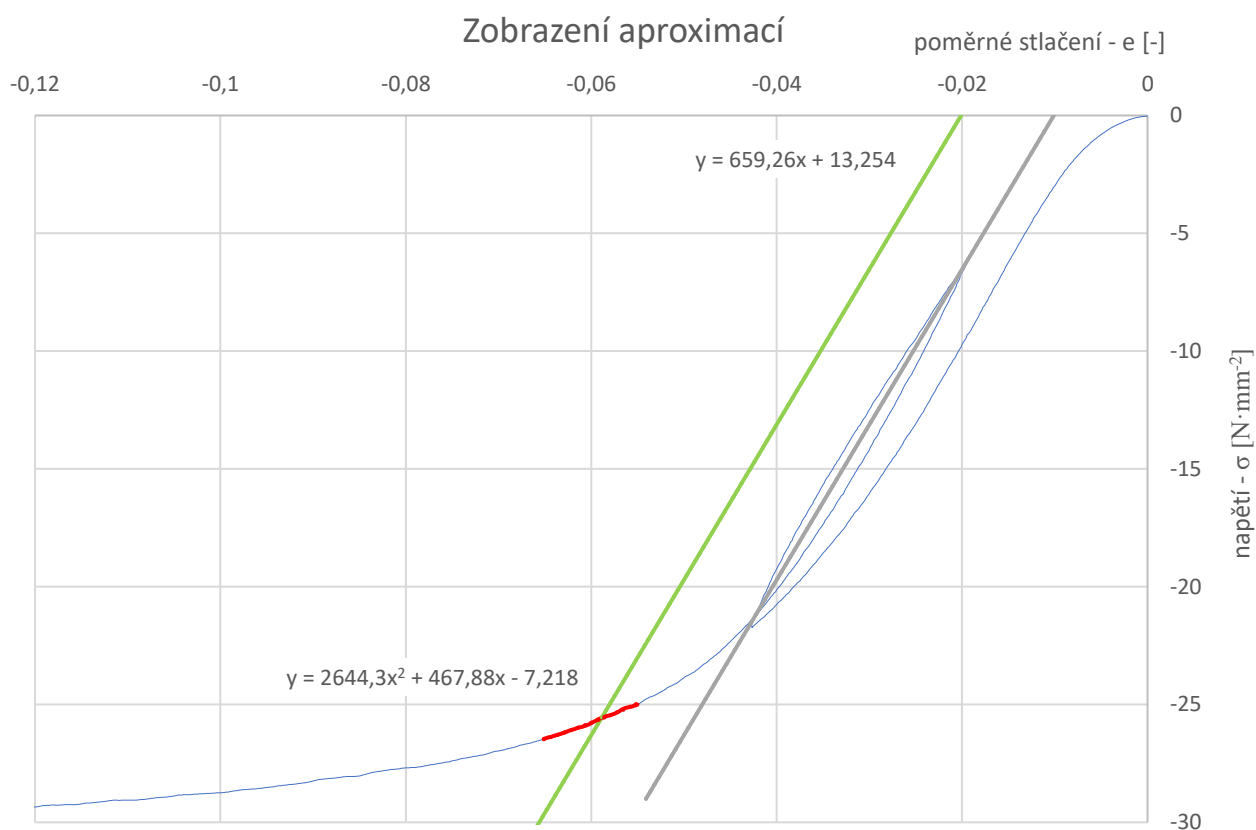
$$x = \frac{y - 6,6617 - 6,5926}{659,26} \quad ( 11 )$$

Z čehož byla utvořena rovnice ( 13 ) hledané rovnoběžky.

$$y = 659,26x + 6,6617 + 6,5926 \quad ( 12 )$$

$$y = 659,26x + 13,2543 \quad ( 13 )$$

Rovnoběžku byla následně vynesena do grafu. Oblast zatěžovací křivky, kde dojde k protnutí s rovnoběžkou, aproximována rovnicí ( 14 ) s polynomem druhého řádu. Vynesení do grafu a aproximovanou oblast (vyznačenou červeně) lze vidět na Obr. 17.



Obr. 17: Graf vynesení rovnoběžky a aproximace polynomem druhého řádu

$$y = 2644,3x^2 + 467,88x - 7,218 \quad (14)$$

Rovnici rovnoběžky ( 13 ) byla dána do rovnosti s aproximační rovnicí s polynomem druhého řádu ( 14 ).

$$2644,3x^2 + 467,88x - 7,218 = 659,26x + 13,2543 \quad (15)$$

$$2644,3x^2 - 191,38x - 20,4723 = 0 \quad (16)$$

$$x_{1,2} = \frac{191,38 \pm \sqrt{(-191,38)^2 + 4 \cdot 2644,3 \cdot 20,4723}}{2 \cdot 2644,3} \quad (17)$$

$$x_1 = 0,1313 \quad (18)$$

$$x_2 = -0,05895 \quad (19)$$

Jelikož se aproximovaná oblast pohybuje v rozmezí -0,055 až -0,065, není brán výsledek  $x_1$  v potaz. Dosazením  $x_2$  do jedné z rovnic ( 13 ) nebo ( 14 ) byla získána hodnota smluvní meze kluzu v tlaku.

$$R_p = 659,26x_2 + 13,2543 = 659,26 \cdot (-0,05895) + 13,2543 = -25,609 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} \quad (20)$$

Hodnoty smluvní meze kluzu v tlaku pro všechny vzorky jsou shrnuty v Tab. 8.

Tab. 8: Smluvní mez kluzu v tlaku

skupina	číslo vzorku	Smluvní mez kluzu [N·mm <sup>-2</sup> ]	odchylka	skupina	číslo vzorku	Smluvní mez kluzu [N·mm <sup>-2</sup> ]	odchylka		
A	1	25,61	25,95	0,25	B	11	27,78	28,53	0,34
	2	25,62				12	28,56		
	3	25,61				13	28,20		
	4	26,18				14	28,36		
	5	25,99				15	28,68		
	6	26,17				16	28,76		
	7	25,91				17	28,67		
	8	26,22				18	28,73		
	9	26,05				19	28,59		
	10	26,11				20	28,98		

### 5.1.7. Absorbovaná energie a účinnost absorbování energie

Absorbovaná energie  $W$  je plocha pod křivkou napětí-deformace až do  $e = -0,5$ , nebo do konce stabilní hladiny  $e_{pl}$ . Hodnoty budou stanovovány do  $e = -0,45$ . Hodnota  $e = -0,45$  byla stanovena, protože se v okolí této hodnoty pohybuje konec stabilní hladiny. [10]

Účinnost absorbování energie  $W_{ef}$  lze vyjádřit jako absorbovanou energii dělenou součinem maximálního napětí v tlaku uvnitř rozsahu deformace a velikosti odpovídající deformace.

Absorbovaná energie  $W$  a účinnost absorbování energie  $W_{ef}$  se vypočtou pomocí rovnic ( 21 ) a ( 22 ).

$$W = \int_0^{e_{0,45}} \sigma \cdot de \quad [MJ \cdot m^{-3}] \quad (21)$$

$$W_{ef} = \frac{W}{\sigma_{0,45} \cdot e_{0,45}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (22)$$

Plocha pod křivkou byla vypočtena pomocí programu Matlab a jeho funkce Trapz. Vypočtené hodnoty absorbované energie a následně dopočtené hodnoty účinnosti jsou zapsány v Tab. 9. Vzorky číslo 13 a 17 nedosáhly hranice stlačení  $e = -0,45$ , proto byly vyhodnoceny pro maximální stlačení,

kterého dosáhli. Nicméně tyto dopočtené hodnoty jsou zavádějící oproti ostatním vzorkům, a proto byly označeny červeně a nebyly započteny do průměru ani odchylky.

Tab. 9: Absorbovaná energie a účinnost absorbování energie

skupina	číslo vzorku	Absorbovaná energie [MJ·m <sup>-3</sup> ]		odchylka	Účinnost absorbování energie [%]		odchylka
A	1	14,254	14,276	0,130	68,77	68,75	0,15
	2	14,200			68,81		
	3	14,491			68,69		
	4	14,395			69,06		
	5	14,148			68,53		
	6	14,339			68,81		
	7	14,061			68,81		
	8	14,372			68,70		
	9	14,184			70,99		
	10	14,318			71,10		
B	11	15,363	15,536	0,168	71,80	71,14	0,22
	12	15,655			70,88		
	13	14,038			71,42		
	14	15,439			71,28		
	15	15,678			71,66		
	16	15,680			71,40		
	17	15,212			70,84		
	18	15,535			71,20		
	19	15,252			68,77		
	20	15,684			68,81		

#### 5.1.8. Porovnání výsledků různých rychlostí zkoušek

Měření při vyšší rychlosti vykazuje pro stejné poměrné stlačení jako pomalejší rychlost, lehce vyšší hodnoty napětí v tlaku. Z čehož vyplývá i zvýšená průměrná hodnota stabilní hladiny napětí.

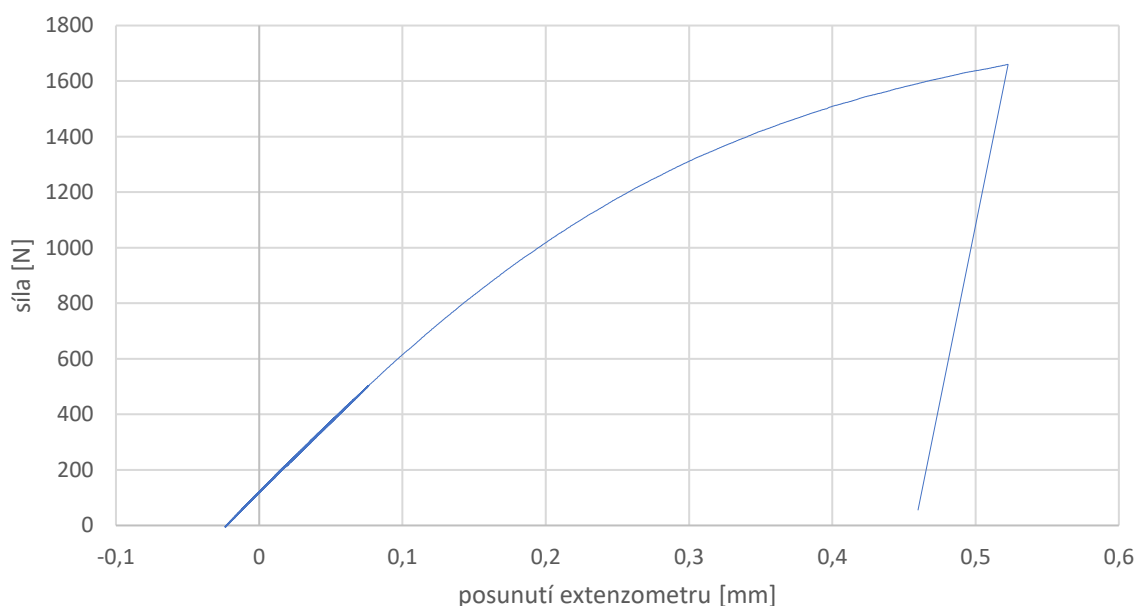
Pro pomalejší rychlosti je průměrná hodnota  $\sigma_{pl}$   $32,85 \pm 0,26 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$  a pro vyšší rychlost  $35,73 \pm 0,42 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ . Z vyšších hodnot stabilní hladiny napětí vychází i delší oblast stabilní hladiny, a to o 1,35 % poměrného prodloužení. Pro modul a elastický gradient se trend vyšších hodnot pro rychlejší zatěžování stále drží a výsledky pro vzorky skupiny B jsou vyšší cca o 8 %. Smluvní mez kluzu, absorbovaná energie a účinnost absorbované energie jen potvrzují, že pro vyšší rychlost zatěžování vycházejí vyšší hodnoty. Z předchozích výpočtů a grafů lze vyvodit, že naměřené hodnoty jsou lehce závislé na rychlosti zatěžování. Výsledky potvrzují úvahu, která vychází z údajů nastudované literatury. Souhrnné srovnání s uvedením výsledků v přehledné tabulce je provedeno v diskusi.

## 5.2. Zkouška tahem

### 5.2.1. Měření

Pomocí stroje MTS 858.2 Mini Bionix byly zaznamenávány hodnoty posunutí extenzometru, posunutí čelistí, síly a času. V grafu na Obr. 18 lze vidět ukázkové naměřené hodnoty, vynesené v závislosti síly na posunutí extenzometru. Tyto hodnoty byly dále zpracovávány při vyhodnocování tahové zkoušky. V první části grafu lze vidět opakované zatěžování a následně se pokračovalo do destrukce vzorku.

Závislost síly na posunutí extenzometru



Obr. 18: Graf závislosti síly na posunutí extenzometru

Tyto hodnoty byly následně převedeny do napětí a relativního prodloužení extenzometru. Napětí bylo vypočteno pomocí rovnice ( 23 ) a relativní posunutí extenzometru dle rovnice ( 24 ).

$$\sigma_i = \frac{F_i}{S_n} \quad [N \cdot mm^{-2}] \quad (23)$$

Kde  $F_i$  je síla v daném bodě a  $S_n = \varnothing \text{ Šířka} \cdot \varnothing \text{ Tloušťka}$  vzorku.

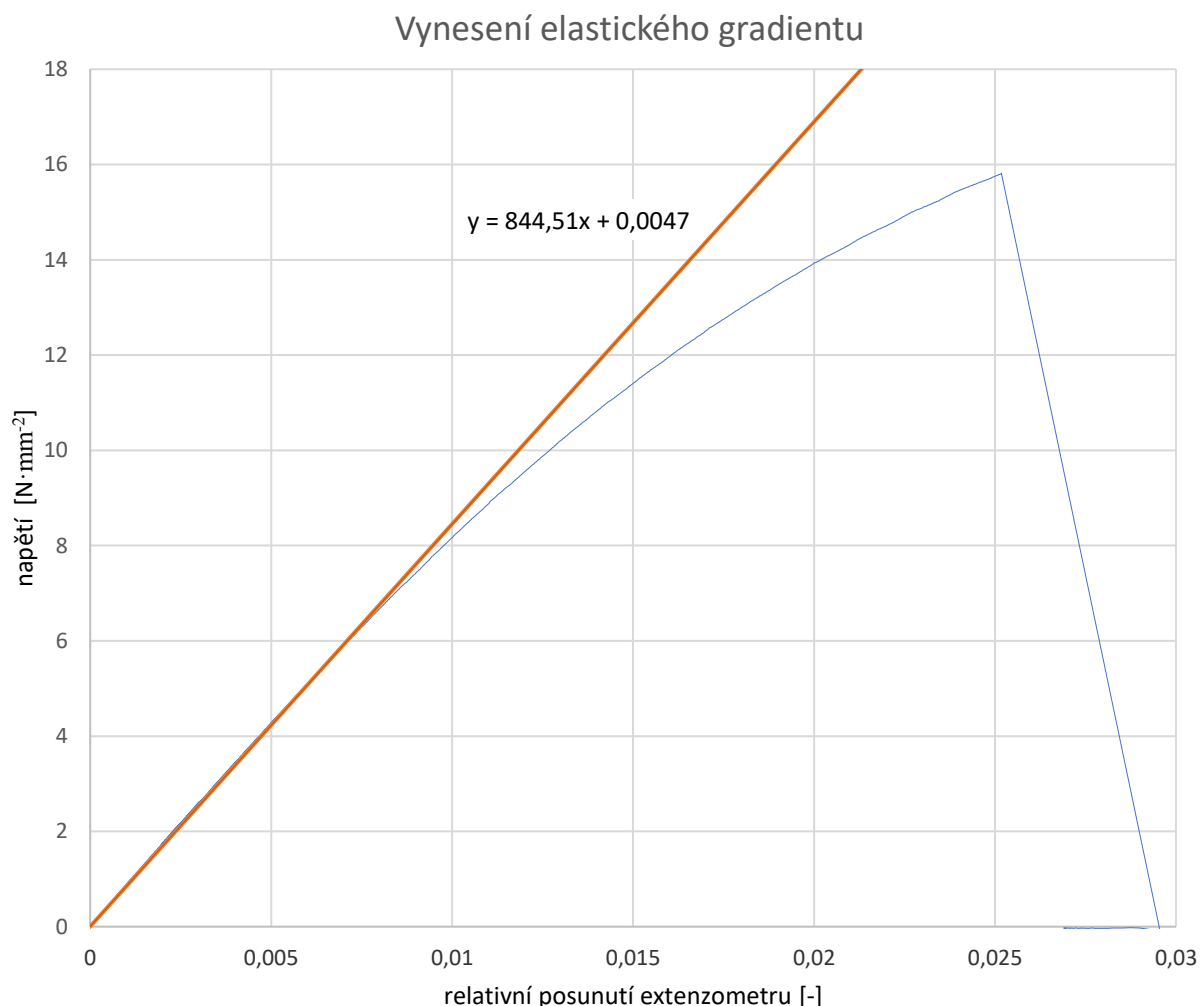
$$e = \frac{f_i - f_0}{l_v} \quad [-] \quad (24)$$

Kde  $f_i$  je posuv v daném bodě,  $f_0$  posuv ve výchozím bodě a  $l_v$  je volná délka extenzometru.

### 5.2.2. Elastický gradient

Elastický gradient je směrnice elastické přímky. Elastická přímka je sečnou získanou z hysterezní smyčky, která se objeví během odlehčování a následného zatěžování. Při měření byla hysterezní smyčka téměř totožná s křivkou zatěžování, proto lze elastický gradient považovat za téměř shodný s modulem pružnosti v tahu materiálu. Sečna byla vyhotovena jako spojnice maxima a minima hysterezní smyčky. Vynesenou elastickou přímkou lze vidět na

Obr. 19 spolu s její rovnicí, kde směrnice této rovnice je hledaný elastický gradient.



Obr. 19: Graf vynesení elastického gradientu

Výsledné hodnoty elastických gradientů pro měřené vzorky lze vidět v Tab. 10.

Tab. 10: Hodnoty elastických gradientů

číslo vzorku	Elastický gradient [N·mm <sup>-2</sup> ]	odchylka
1	844,51	837,66
2	840,16	
3	855,83	
4	842,85	
5	832,05	
6	845,65	
7	822,57	
8	832,58	
9	831,63	
10	828,73	

### 5.2.3. Smluvní mez kluzu v tahu - $R_{0,2}$

Smluvní mez kluzu byla stanovována pro hodnotu 0,2 % poměrného prodloužení. Byla vynesena rovnoběžka s elastickou přímkou, která je o 0,002 posunuta na ose X. Rovnice této rovnoběžky ( 29 ) byla stanovena matematicky pomocí rovnice elastické přímky ( 25 ) obdobně jako při vyhodnocování tlakové zkoušky.

$$y = 844,51x + 0,0047 \quad ( 25 )$$

$$x = \frac{y - 0,0047}{844,51} + 0,002 \quad ( 26 )$$

$$x = \frac{y - 0,0047 + 1,689}{844,51} \quad ( 27 )$$

$$y = 844,51x + 0,0047 - 1,689 \quad ( 28 )$$

$$y = 844,51x - 1,6843 \quad ( 29 )$$

Po vynesení rovnoběžky do grafu byla odhadnuta oblast průsečíku se zatěžovací křivkou a tato oblast byla aproximována polynomem druhého stupně v programu Microsoft Excel. Polynom druhého stupně a rovnice rovnoběžky byly položeny do rovnosti ( 30 ). Z té byly následně dopočteny x-ové hodnoty průsečíků.



$$-16334x^2 + 1073,1x - 1,0217 = 844,51x - 1,6843 \quad (30)$$

$$-16334x^2 + 228,59x + 0,6626 = 0 \quad (31)$$

$$x_{1,2} = \frac{-228,59 \pm \sqrt{(228,59)^2 + 4 \cdot 16334 \cdot 0,6626}}{2 \cdot (-16334)} \quad (32)$$

$$x_1 = 0,016459 \quad (33)$$

$$x_2 = -2,46 \cdot 10^{-3} \quad (34)$$

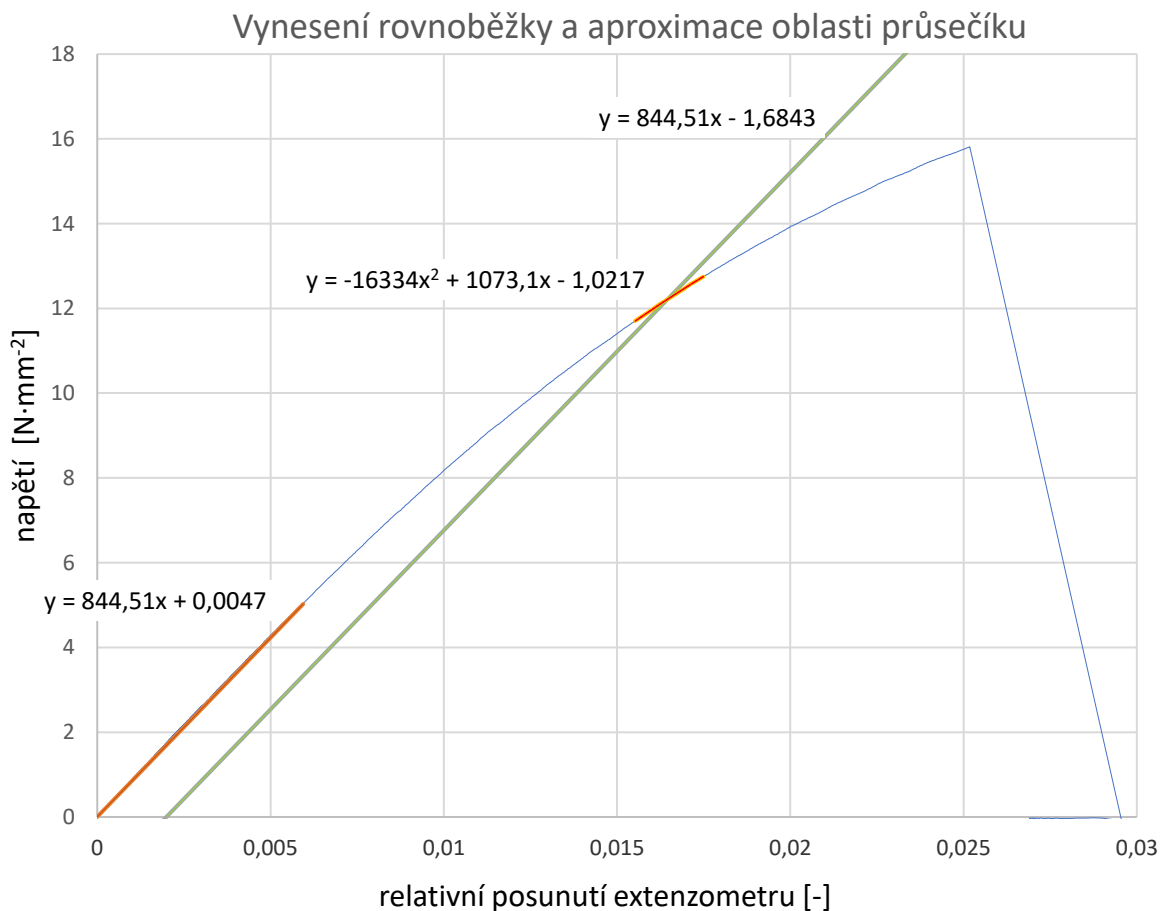
Hodnota  $x_2$  ( 34 ) není brána v potaz, protože křivka byla aproximována v oblasti  $x \in (0,0155; 0,0175)$ . Pro dopočtení smluvní meze kluzu bylo dosazeno  $x_1$  ( 33 ) do rovnice ( 29 ).

$$y = 844,51 \cdot 0,016459 - 1,6843 \quad (35)$$

$$y = 12,22 [N \cdot mm^{-2}] \quad (36)$$

Vynesení a aproximaci i s rovnicemi lze vidět na

Obr. 20. Tento postup byl opakován pro všechna měření.



Obr. 20: Graf vynesení rovnoběžky a aproximace oblasti průsečíku

Výsledné hodnoty smluvní meze kluzu pro všechna měření lze vidět v Tab. 11.

Tab. 11: Hodnoty smluvní meze kluzu

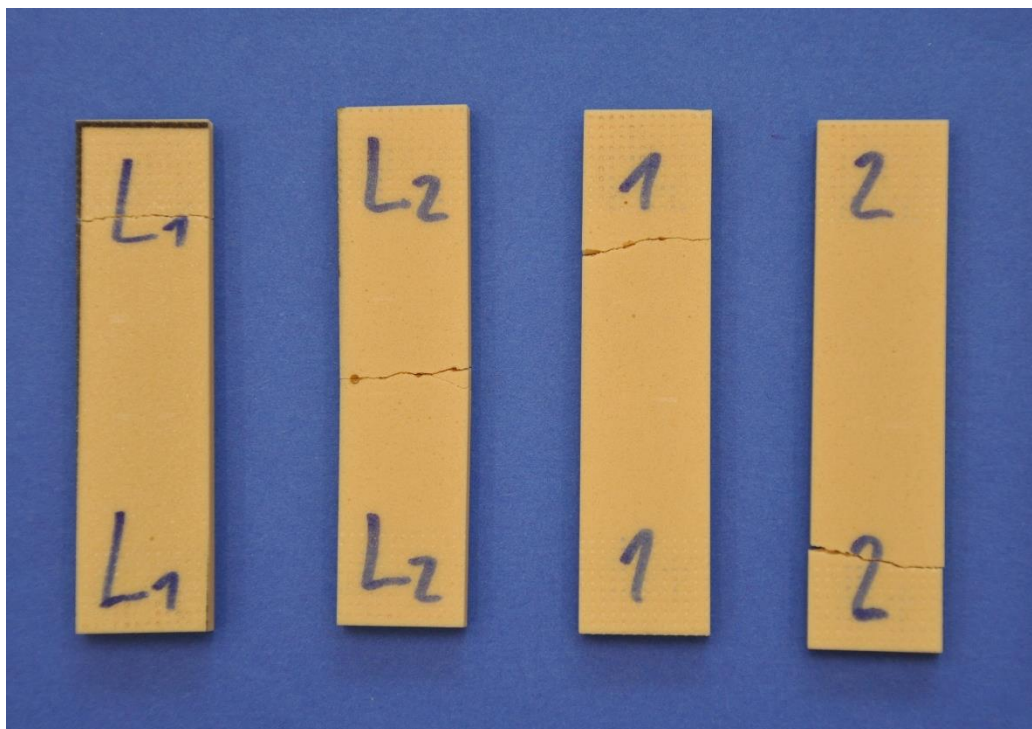
číslo vzorku	Smluvní mez kluzu [N·mm <sup>-2</sup> ]	odchylka
1	12,22	11,92
2	12,06	
3	12,17	
4	12,04	
5	11,86	
6	11,47	
7	11,76	
8	11,98	
9	11,89	
10	11,73	
		0,23

#### 5.2.4. Mez pevnosti v tahu - $\sigma_{pt}$

Mez pevnosti v tahu  $\sigma_{pt}$  byla vyhodnocena z maximální naměřené síly  $F_{max}$  před destrukcí vzorku a průřezu vzorku  $S_i$  dle rovnice ( 37 ).

$$\sigma_{pt} = \frac{F_{max}}{S_i} \quad ( 37 )$$

Z důvodu nevyříznutí vzorku se zúžením ve středu vzorky praskaly v oblasti ovlivněné sevřením čelistí nebo v místech pórovité vady (Obr. 21). Praskání v čelistech bylo předpokládáno a výsledky jsou proto brány jen jako orientační. U vzorku označeného L2 jde v levé části praskliny vidět pórovitá vada, která zapříčinila destrukci vzorku právě v tomto místě.



Obr. 21: Vzorčky po destrukci

Dopočtené hodnoty meze pevnosti  $\sigma_{pt}$ , maximální síla  $F_{max}$  a průřezy  $S_i$  jednotlivých vzorků jsou zapsány v Tab. 12.

Tab. 12: Hodnoty meze pevnosti v tahu

číslo vzorku	Průřez [mm <sup>2</sup> ]	F <sub>max</sub> [N]	Mez pevnosti v tahu [N·mm <sup>-2</sup> ]	odchylka
1	100,44	1590,33	15,83	17,89
2	90,84	1660,55	18,28	
3	99,69	1739,52	17,45	
4	104,09	1694,33	16,28	
5	102,07	1873,49	18,35	
6	109,86	1902,23	17,31	
7	89,81	1687,25	18,79	
8	94,29	1798,16	19,07	
9	94,81	1774,66	18,72	
10	96,25	1810,60	18,81	

## 6. Diskuse

Na základě nastudovaných informací byla prováděna tlaková zkouška pro dvě různé rychlosti, aby se ověřil předpoklad závislosti výsledků na rychlosti zatěžování. Tento předpoklad se podařilo potvrdit, kdy vzorky zatěžované rychleji vykazují vyšší hodnoty stabilní hladiny tlaku ( $\sigma_{pl}$ ), konce stabilní hladiny napětí ( $e_{pl}$ ), modulu, elastického gradientu, smluvní meze kluzu ( $R_p$ ), absorbované energie a účinnosti absorbované energie. Výsledné průměrné hodnoty pro skupinu vzorků A zatěžované rychlostí  $v_1 = 4,5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  a skupinu B zatěžované rychlostí  $v_2 = 45 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  jsou uvedeny v Tab. 13, kde je uveden procentuální nárůst hodnot u jednotlivých mechanických vlastností.

Tab. 13: Srovnání výsledků různých zatěžovacích rychlostí u zkoušky tlakem

	A	B	% nárůst
Stabilní hladina napětí $\sigma_{pl}$	$32,85 \pm 0,26 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$	$35,73 \pm 0,42 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$	8,77 %
konec stabilní hladiny napětí $e_{pl}$	$0,4172 \pm 0,0011 [-]$	$0,4307 \pm 0,0016 [-]$	3,24 %
modul	$704,54 \pm 11,75 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$	$755,02 \pm 13,62 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$	7,16 %
elastického gradient	$636,90 \pm 11,74 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$	$682,54 \pm 12,43 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$	7,17 %
smluvní mez kluzu $R_p$	$25,95 \pm 0,25 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$	$28,53 \pm 0,34 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$	9,94 %
absorbované energie $W$	$14,28 \pm 0,13 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$	$15,54 \pm 0,17 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$	8,83 %
účinnosti absorbované energie $W_{ef}$	$68,75 \pm 0,15 \%$	$71,14 \pm 0,22 \%$	3,48 %

Výrobce uvádí hodnoty měřené dle normy ASTM D1621, kde pro pevnost v tlaku materiálu je brána hodnota napětí, při které materiál přechází z elastické do plastické fáze. Tato výrobcem uváděná hodnota  $31 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$  přibližně odpovídá dopočtené hodnotě stabilní hladiny napětí u vzorků skupiny A. Norma ASTM D1621 také uvádí rychlost vztaženou na velikost vzorku, kdy na každých 25,4 mm délky vzorku připadá  $2,5 \pm 0,25 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . Výrobce bohužel neuvádí rychlost zatěžování ani velikost testovaných vzorků, dle normy lze však usoudit, že by se měla pohybovat přibližně okolo rychlosti, která byla zvolena pro skupinu vzorků A. Nicméně při porovnání modulu uváděného výrobcem  $759 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$  hodnoty odpovídají více skupině vzorků B, pro kterou byla dopočtena hodnota modulu  $755 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ .

Výsledné hodnoty se budou aplikovat do projektu, který se zabývá vrtáním do dolní čelisti, proto budou hodnoty srovnány s touto kostí. Pro vzorky čelistí stáří 56-90 let hustotou  $0,85\text{-}1,53 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  byla naměřena průměrná hodnota elastického modulu  $56 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$  a průměrná mez pevnosti v tlaku  $3,9 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$  [8]. Výsledné mechanické vlastnosti dolní čelisti jsou provedeny na vzorcích trámčité části kosti. Hodnotám uvedeným výrobcem se blíží pouze v oblasti hustoty  $0,64 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ . Změřené hodnoty elastického modulu a meze pevnosti jsou několikanásobně větší než hodnoty uváděné pro dolní čelist. S ohledem na stáří čelistí lze předpokládat, že u mladších vzorků budou hodnoty meze pevnosti a modulu vyšší. Při simulaci pouze trámčité části kosti by pro dosažení obdobných materiálových vlastností jako u kosti bylo vhodné volit řadu s označením PCF 12, která má ale menší hustotu.

Z tahové zkoušky byly určeny hodnoty elastického gradientu, který byl vyvozen z hysterezní smyčky. Hysterezní smyčka byla téměř totožná se zatěžovací křivkou, proto lze elastický gradient brát i jako modul materiálu v tahu. Dopočtené hodnoty se liší od údajů od výrobce. Výrobce uvádí modul  $1000 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$  a průměr hodnot získaných v rámci této práce je  $838 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ . Dále byla vyhodnocena smluvní mez kluzu  $R_{0,2} = 11,92 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ , výrobce smluvní mez kluzu neuvádí. Mez

pevnosti v tahu, výrobcem uváděná  $\sigma_{pt} = 19 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ , byla dopočtena s průměrnou hodnotou  $\sigma_{pt} = 17,89 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ . Dopočtená hodnota je zatížena chybou, která vznikla v důsledku nevyříznutí střední části, což zapříčinilo praskání vzorků v oblasti ovlivněné mechanickým zatížením čelistí nebo v místě pórovitých vad materiálu. Tyto chyby snížily hodnotu meze pevnosti v tahu, proto lze předpokládat že skutečná hodnota bude vyšší.

## 7. Závěr

Cílem práce bylo provedení tahové a tlakové zkoušky materiálu Sawbones 1522-05 Block GP40, vyhodnotit mechanické vlastnosti materiálu a porovnat tyto výsledky s hodnotami uváděnými výrobcem a jinou odbornou literaturou. Hodnoty byly měřeny z důvodu jejich využití v projektu, který se zabývá vrtáním do dolní čelisti, kde se materiál od firmy Sawbones používá z etických a ekonomických důvodů na nahrazení pravých lidských kostí.

V první části bakalářské práce byla provedena rešerše v oblasti mechanického testování tvrdých polyuretanových pěn, její výhody, nevýhody a vhodnost pro simulaci lidských kostí. Byly uvedeny hodnoty mechanických vlastností lidských kostí a PU. Dále byly zobrazeny zatěžovací křivky z měření uváděných v jiné odborné literatuře. Na základě těchto znalostí byl předpokládán vývoj experimentu a upraven průběh, kdy pro tlakovou zkoušku bylo provedeno měření při dvou různých rychlostech, aby se potvrdil předpoklad, že výsledky jsou závislé na rychlosti zatěžování.

Následně byla důkladně popsána metodika a příprava zkoušek, které vedly k vyhodnocení mechanických vlastností materiálu.

Výsledky tlakové zkoušky pro rychlosti  $v_1 = 4,5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  a  $v_2 = 45 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  potvrdil předpoklad závislosti na rychlosti zatěžování a v diskusi byly porovnány s hodnotami uváděnými výrobcem a mechanickými vlastnostmi lidských kostí. Výsledná stabilní hladina napětí pro  $v_1$   $\sigma_{pl} = 32,85 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$  se velice blížila hodnotě uváděné výrobcem  $\sigma_{pl} = 31 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ . Modul dopočtený pro rychlost  $v_2$   $755 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$  je téměř shodný s hodnotou udávanou výrobcem  $759 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ . V zájmu zpřesnění výsledků tlakové zkoušky by bylo možné dbát na pečlivější přípravu vzorků, přesnější dodržení kolmosti a rozměrů.

Hodnoty získané tahovou zkouškou se již tolik neblížily hodnotám uváděným výrobcem. Pro modul uváděný jako  $1000 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$  byla dopočtena hodnota  $838 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$  a mez pevnosti od výrobce  $\sigma_{pt} = 19 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$  vyšla  $\sigma_{pt} = 17,89 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ . Měření bylo ovšem zatíženo chybou, která byla vnesena do experimentu tvarem vzorků. Vzorky nebyly uprostřed zúženy, proto docházelo k praskání v oblasti čelistí nebo v místě pórovitých vad materiálu. Tento problém byl předpokládán již na začátku a bylo na něj upozorněno, aby byl brán v potaz při dalším použití dat v projektu. Zúžení vzorků by bylo nejvhodnější provádět vodním paprskem, aby nedošlo k ovlivnění materiálu. Tato úprava by však výrazně prodražila experiment.

Na závěr byla provedena diskuse, ve které byly naměřené a dopočtené hodnoty srovnány s odbornou literaturou zabývající se testováním PU a lidských kostí.

## Bibliografie

- [1] ANTUNES, Marcelo, Álvaro CANO, Vera REALINHO, David ARENCÓN a José Ignacio VELASCO. Compression Properties and Cellular Structure of Polyurethane Composite Foams Combining Nanoclay and Different Reinforcements. *International Journal of Composite Materials*. 2014, (45, 27-34. DOI: 0.5923/j.comaterials.201401.04. ISSN 2166-479X.
- [2] *Sawbones biomechanical test materials, catalog 2017*. 2017. Dostupné také z: [http://www.sawbones.com/wp/wp-content/uploads/2017/04/FINAL\\_Biomechanical\\_Catalog.pdf](http://www.sawbones.com/wp/wp-content/uploads/2017/04/FINAL_Biomechanical_Catalog.pdf)
- [3] SHIM, V., J. BOHEME, C. JOSTEN a I. ANDERSON. Use of Polyurethane Foam in Orthopaedic Biomechanical Experimentation and Simulation. *Polyurethane*. InTech., 2012, s. 171-200. ISBN 9789535107262.
- [4] Mechanical Properties of Biological Materials. PAL, Subrata. *Design of Artificial Human Joints & Organs - 2014*. Springer US, 2014, s. 23-40. ISBN 9781461462552.
- [5] MANE, J. V., S. CHANDRA, S. SHARMA, H. ALI, V. M. CHAVAN, B. S. MANJUNATH a R. J. PATEL. Mechanical Property Evaluation of Polyurethane Foam under Quasi-static and Dynamic Strain Rates - An Experimental Study. *Procedia Engineering*. 2017, (173), 726-731.
- [6] STIRNA, U., I. BEVERTE, V. YAKUSHIN a U. CABULIS. Mechanical properties of rigid polyurethane foams at room and cryogenic temperatures. *Journal of Cellular Plastics*. 2011, (47), 337-355. DOI: 10.1177/0021955X11398381.
- [7] GOGA, Vladimír. MEASUREMENT OF THE ENERGY ANSORPTION CAPABILITY OF POLYURETHANE FOAM. In: *Posterus* [online]. Kopčianska 14 Bratislava 851 01, 2010, 3 [cit. 2018-06-02]. ISSN 1338-0087. Dostupné z: <http://www.posterus.sk/?p=4244&output=pdf>
- [8] MISCH, Carl E., Zhimin QU a Martha W. BIDEZ. Mechanical properties of trabecular bone in the human mandible: Implications for dental implant treatment planning and surgical placement. *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*. 1999, 57(6), 700-706. DOI: 10.1016/S0278-2391(99)90437-8.
- [9] ROSINA, Josef a Leoš NAVRÁTIL. *Medicínská biofyzika*. Grada, 2005. ISBN 80-247-1152-4.
- [10] ČSN ISO 13314. *Mechanické zkoušení kovů – Zkoušení tváritelnosti – Zkouška poréznych a pěnových kovů tlakem*. Praha, 2012.

## Seznam obrázků

Obr. 1: Odebírání materiálu PU [3] .....	4
Obr. 2: Vnitřní struktura lidské kosti [4].....	5
Obr. 3: Podélný řez vrchní části stehenní kosti [4].....	5
Obr. 4: Vlevo mikrostruktura PU, vpravo mikrostruktura lidské kosti [3] .....	5
Obr. 5: Typická křivka talkového zatěžování PU [5] .....	6
Obr. 6: Graf postupného a dynamického zatížení v tlaku [5].....	6
Obr. 7: Zatěžovací charakteristika PU desek tlakem [7] .....	7
Obr. 8: Umístění vzorku .....	9
Obr. 9: Rozdělení a popsání vzorků.....	10
Obr. 10: Graf průběhu síly .....	12
Obr. 11: Připravené vzorky.....	13
Obr. 12: Upnutí vzorku s extenzometrem.....	14
Obr. 13: Graf závislosti síly na posuvu .....	15
Obr. 14: Graf závislost napětí na poměrném stlačení.....	16
Obr. 15: Graf odečtení konce stabilní hladiny.....	18
Obr. 16: Graf lineárních aproximací .....	20
Obr. 17: Graf vynesení rovnoběžky a aproximace polynomem druhého řádu.....	22
Obr. 18: Graf závislosti síly na posunutí extenzometru .....	25
Obr. 19: Graf vynesení elastického gradientu.....	26
Obr. 20: Graf vynesení rovnoběžky a aproximace oblasti průsečíku .....	28
Obr. 21: Vzorky po destrukci.....	30

## Seznam tabulek

Tab. 1: Srovnání modulu pružnosti a meze pevnosti v tlaku z různých publikací .....	7
Tab. 2: Hodnoty udávané výrobcem [2].....	8
Tab. 3: Naměřené a vypočtené rozměry vzorků .....	10
Tab. 4: Změřené a doložené rozměry vzorků .....	13
Tab. 5: Vypočtené hodnoty sigma plastické, $F_{70}$ a $F_{20}$ .....	17
Tab. 6: Hodnoty konce stabilní hladiny .....	19
Tab. 7: Modul a elastický gradient vzorků .....	20
Tab. 8: Smluvní mez kluzu v tlaku .....	23
Tab. 9: Absorbovaná energie a účinnost absorbování energie .....	24
Tab. 10: Hodnoty elastických gradientů.....	27
Tab. 11: Hodnoty smluvní meze kluzu .....	29
Tab. 12: Hodnoty meze pevnosti v tahu .....	30
Tab. 13: Srovnání výsledků různých zatěžovacích rychlostí u zkoušky tlakem .....	31