

# **Vliv vyztužení okrajů otevřených tenkostěnných plastových profilů na mechanické chování v ohybu**

František Zetík

---

Bakalářská práce  
2008



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Baťa ve Zlíně  
Fakulta technologická  
Ústav výrobního inženýrství  
akademický rok: 2007/2008

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **František ZETÍK**  
Studijní program: **B 3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Technologická zařízení**

Téma práce: **Vliv vyztužení okrajů otevřených tenkostěnných  
plastových profilů na mechanické chování v ohybu**

### Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární studii na dané téma
2. Navrhněte a zhotovte zkušební tělesa
3. Proveďte experimentální zkoušky v laboratorních podmínkách
4. Proveďte vyhodnocení experimentálních zkoušek

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

**Dle doporučení vedoucího bakalářské práce**

Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. František Rulík, CSc.**  
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

**19. února 2008**

Termín odevzdání bakalářské práce:

**6. června 2008**

dne

doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.  
*děkan*



doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.  
*ředitel ústavu*

## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce se zabývá technologií tvarování a mechanickými vlastnostmi vytvořených profilů s vyztuženými okraji při ohybovém zatížení. Pro tyto profily byla teoreticky určena hodnota kvadratického momentu průřezu plochy jak pro reálný, tak pro idealizovaný profil a porovnávaly se. V experimentální části se pak porovnávaly naměřené hodnoty vyztužených profilů s profily nevyztuženými. V závěru práce je uvedeno shrnutí výsledků a jejich diskuze.

Klíčová slova: Kvadratický moment průřezu plochy, těžiště plochy, vliv vyztužení profilů na mechanické chování v ohybu, mez pevnosti při ohybu, modul pružnosti v ohybu.

## **ABSTRACT**

This Bachelor thesis deals with the technology of forming and mechanical properties of hard-edged profiles when being bent. For these profiles there were the quantities of quadratic moments of surface cross section determined for the realistic as well as ideal profile, and were compared.

In the practical part the measured quantities of hardened and non-hardened profiles were compared.

The conclusion includes the results and discussion.

Keywords: Quadratic moment of surface cross section, centre of surface gravity, influence of hardening profiles on mechanical properties when bending, the limit of firmness when bending, the modulation of flexibility when bending, Young's modulus.

Děkuji Ing. Františkovi Rulíkovi, CSc., vedoucímu mé bakalářské práce, za odborné vedení, poskytování rad, které mi pomohly k řešení dané problematiky. Zároveň také děkuji Ing. Milanu Žaludkovi, Ph.D., Ing. Vladimíru Šumberovi, Ing. Jiřímu Šálkovi a dalším pracovníkům UTB ve Zlíně.

Souhlasím s tím, že s výsledky mé práce může být naloženo podle uvážení vedoucího bakalářské práce a ředitele ústavu. V případě publikace budu uveřejněn jako spoluautor.

Prohlašuji, že jsem na celé bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval.

Ve Zlíně, 2.6.2008

.....

podpis

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>10</b>
<b>1 TVAROVÁNÍ (FORMOVÁNÍ)</b> .....	<b>11</b>
1.1 TVAROVÁNÍ ZA TEPLA .....	11
1.1.1 Mechanické tvarování .....	11
1.1.2 Pneumatické tvarování .....	13
1.1.2.1 Negativní pneumatické tvarování .....	16
1.1.2.2 Pozitivní pneumatické tvarování .....	16
1.1.2.3 Formy pro pneumatické tvarování .....	17
<b>2 OHYB</b> .....	<b>18</b>
2.1 DEFORMACE KRAJNÍCH VLÁKEN PŘI OHYBU .....	18
2.2 NAPĚTÍ PŘI OHYBU .....	19
2.3 OHYBOVÁ TUHOST V LINEÁRNĚ ELASTICKÉ OBLASTI.....	20
2.3.1 Modul pružnosti .....	20
2.3.2 Hookeův zákon.....	21
2.3.3 Vlastnosti modulu pružnosti .....	22
<b>3 GEOMETRICKÉ CHARAKTERISTIKY PRŮŘEZU</b> .....	<b>23</b>
3.1 LINEÁRNÍ MOMENT PRŮŘEZU PLOCHY .....	23
3.2 KVADRATICKÝ MOMENT PRŮŘEZU .....	24
3.2.1 Obdélník.....	24
3.2.2 Kruh.....	25
3.3 KVADRATICKÝ MOMENT PRŮŘEZU PLOCHY K MIMOTĚŽIŠŤOVÉ OSE .....	26
3.4 POLÁRNÍ KVADRATICKÝ MOMENT .....	26
3.5 DEVIČNÍ MOMENT .....	27
<b>4 TENKOSTĚNNÉ PROFILY</b> .....	<b>28</b>
4.1 PLASTOVÉ TENKOSTĚNNÉ PROFILY .....	28
4.2 UZAVŘENÉ TENKOSTĚNNÉ PROFILY .....	28
4.3 OTEVŘENÉ TENKOSTĚNNÉ PROFILY .....	28
4.4 TENKOSTĚNNÉ PROFILY BEZ VYZTUŽENÝCH OKRAJŮ (ČISTÉ).....	29
4.5 TENKOSTĚNNÉ PROFILY S VYZTUŽENÝMI OKRAJI.....	29
<b>5 PLASTY</b> .....	<b>31</b>
5.1 PŘÍPRAVA PLASTŮ .....	32
5.2 ROZDĚLENÍ PLASTŮ PODLE TEPLOTNÍHO CHOVÁNÍ .....	32
5.2.1 Reaktoplasty .....	32
5.2.2 Termoplasty.....	32
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>35</b>

<b>6</b>	<b>TENKOSTĚNNÉ PLASTOVÉ PROFILY TVARU „U“</b> .....	<b>36</b>
6.1	VYTVOŘENÍ U-PROFILU .....	36
6.2	POSOUZENÍ KVADRATICKÝCH MOMENTŮ REÁLNÉHO U-PROFILU A IDEALIZOVANÉHO U-PROFILU NA ZÁKLADĚ VZOROVÉHO VÝPOČTU .....	38
6.2.1	Reálný u-profil a jeho rozměry .....	38
6.2.2	Idealizovaný u-profil .....	41
6.3	POSOUZENÍ VELIKOSTI VYPOČTENÝCH KVADRATICKÝCH MOMENTŮ REÁLNÉHO PROFILU BEZ VYZTUŽENÍ A S VYZTUŽENÍM OKRAJŮ .....	44
6.4	VÝPOČET OHYBOVÉ TUHOSTI PROFILU .....	47
6.5	OHYBOVÁ ZKOUŠKA NA STROJI ZWICK .....	49
6.5.1	Měření 1. a 2. série u-profilu otočeného dnem nahoru a dolů .....	51
6.5.2	Měření 3. a 4. série u-profilu otočeného dnem nahoru a dolů .....	54
6.5.3	Měření 5. a 6. série u-profilu otočeného dnem nahoru a dolů .....	57
6.5.4	Měření 7. a 8. série u-profilu otočeného dnem nahoru a dolů .....	60
6.5.5	Grafické znázornění $F_{max}$ (maximální síly) na $y$ (průhybu) pro vybrané naměřené hodnoty při ohybu u-profilů 1.-8.série .....	63
6.6	OHYBOVÁ ZKOUŠKA U-PROFILŮ S NEVYZTUŽENÝMI OKRAJI .....	65
6.6.1	Měření I.a II.série pro profil bez vyztužených okrajů .....	66
6.7	SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ A JEJICH DISKUZE .....	69
6.7.1	Výpočet ohybové tuhosti .....	69
<b>7</b>	<b>TENKOSTĚNNÉ PLASTOVÉ PROFILY TVARU PŮLKRUHU</b> .....	<b>70</b>
7.1	VYTVOŘENÍ PŮLKRUHOVÉHO PROFILU .....	70
7.2	VÝPOČET OHYBOVÉ TUHOSTI .....	71
7.3	POSOUZENÍ KVADRATICKÝCH MOMENTŮ REÁLNÉHO PŮLKRUHOVÉHO PROFILU A IDEALIZOVANÉHO PŮLKRUHOVÉHO PROFILU NA ZÁKLADĚ VZOROVÉHO VÝPOČTU .....	72
7.3.1	Reálný půlkruhový profil a jeho rozměry .....	72
7.3.2	Idealizovaný půlkruhový profil a jeho rozměry .....	75
7.4	POSOUZENÍ VELIKOSTI VYPOČTENÝCH KVADRATICKÝCH MOMENTŮ REÁLNÉHO PROFILU BEZ VYZTUŽENÍ A S VYZTUŽENÍM OKRAJŮ .....	78
7.5	OHYBOVÁ ZKOUŠKA NA STROJI ZWICK .....	81
7.5.1	Měření 1. a 2. série půlkruhového profilu otočeného nahoru a dolů .....	83
7.5.2	Měření 3. a 4. série půlkruhového profilu otočeného nahoru a dolů .....	86
7.5.3	Grafické znázornění $F_{max}$ (maximální síly) na $y$ (průhybu) pro vybrané naměřené hodnoty při ohybu půlkruhových profilů 1.-4.série .....	89
7.6	OHYBOVÁ ZKOUŠKA PŮLKRUHOVÝCH PROFILŮ S NEVYZTUŽENÝMI OKRAJI .....	91
7.6.1	Měření I.a II. série pro půlkruhový profil bez vyztužených okrajů .....	92
7.7	SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ A JEJICH DISKUZE .....	95
7.7.1	Výpočet ohybové tuhosti .....	95
	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>96</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</b> .....	<b>97</b>

<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>98</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>100</b>
<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>103</b>



## ÚVOD

Plasty jsou ve srovnání s tradičními materiály jako jsou kovy mnohem méně tuhé a pevné, mají velký sklon k tečení, jejich mechanické charakteristiky jsou dost závislé na teplotě. Také mají vysokou teplotní roztažnost. Avšak naproti těmto nevýhodám mají také své výhody jako jsou například jejich snadné zpracování, malá hmotnost a zvláště v současné době jejich obrovské možnosti použití v různých průmyslech jako jsou například automobilový průmysl, elektronický průmysl (např. televize, dvd, počítače) atd.

Plastové výrobky se vyrábějí nejčastěji technologií vstřikování, kdy se vstřikuje polymer ve formě taveniny do dutiny vstřikovací formy. Je tedy zapotřebí vstřikovacího stroje, který musí být pro daný výrobek vhodně a s co nejmenšími náklady navrhnout konstruktérem vstřikovací formy. Stejně tak je důležitý návrh vyráběného výrobku, který je také podmíněn co možná nejnižšími náklady na výrobu, požadovanou kvalitou a samozřejmě také co nejdelší životností kterou musí zajistit konstruktér výrobku. Je proto nutné vzájemné komunikace mezi konstruktérem vstřikovací formy a konstruktérem vyráběného výrobku. Také je nutná znalost vlastností a chování vstřikovaného materiálu při zpracování. Plastové výrobky však také můžeme vyrábět pomocí tvarování (tvarovacích strojů). K tvarování jsou určeny nejčastěji desky a fólie z plastu. Polotovar (deska, fólie) je ohřátá na požadovanou teplotu a vhodným způsobem vytvarována. Tvarováním se zpracovávají desky do tloušťky 10 mm a fólie od tloušťky 0,1 mm. Patří sem hlavní dva druhy tvarování a to mechanické a pneumatické tvarování.

Plastové výrobky jsou nejčastěji navrhovány jako tenkostěnné z důvodů co nejnižší hmotnosti a úspory materiálu. Pro jejich vyšší pevnost se tenkostěnné plastové profily vyztužují pomocí různých žeber (žebrováním) po celé ploše profilu, vyztužováním okrajů profilu. U plastů se deformace zvyšují s rostoucí dobou zatížení a s rostoucí teplotou.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

# 1 TVAROVÁNÍ (FORMOVÁNÍ)

Výrobní postup, u kterého polotovar (deska, fólie, trubka, apod.), mění tvar bez většího přemísťování částic hmoty (ohýbání, apod.), děje se většinou za tepla.

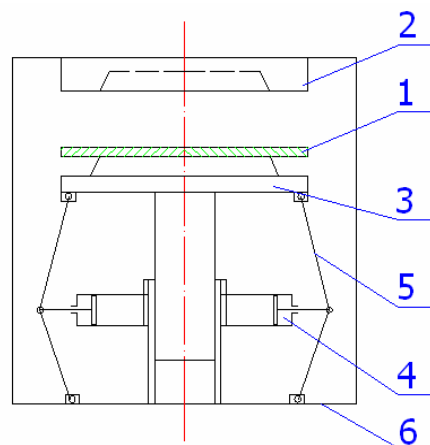
## 1.1 Tvarování za tepla

- u tvarování za tepla se zpracovávají nejčastěji polotovary z plastů a to desky a fólie. Tváření za tepla probíhá za těchto operací: ohřev, tvarování, ochlazení, vyjmutí a nakonec dodatečné začištění výrobku (výlisku). Zpracovávají se desky tloušťky do 10 mm a fólie od tloušťky 0,1 mm. Typickými výrobky z desek jsou velkoplošné výlisky např. (kryty osvětlovacích světel, kryty strojů) a z fólií pak jsou to např. (obaly, kelímky). Tvarovací stroje můžeme podle technologie rozdělit na mechanické a pneumatické. [1]

### 1.1.1 Mechanické tvarování

- lze využít různých konstrukcí lisů (lisovacích strojů). Mechanické tvarování však umožňuje vyrábět výrobky omezené hloubky, protože při tomto způsobu zpracování dochází k nepříznivému zeslabování stěn. U tohoto způsobu tvarování se změny tvaru polotovaru dosahuje jednotlivými částmi dvoudílné formy. [1]

#### a) Mechanické tvarování desek



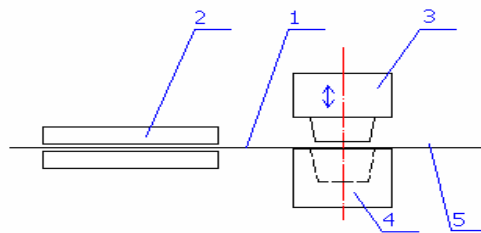
- 1 – deska
- 2 – tvárnice
- 3 – tvárník
- 4 – pneumatický válec
- 5 – pákový mechanismus
- 6 – rám stroje

Obr.1 Tvarovací lis

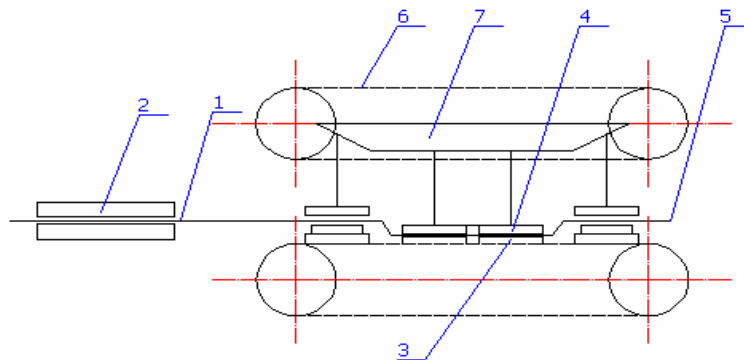
### b) Mechanické tvarování fólií

Vzhledem k malým tloušťkám je možno ohřev zařadit přímo do tvarovacího procesu. Stroje pro mechanické tvarování fólií mohou pracovat cyklicky a nebo kontinuálně. K ohřevu dochází konvekcí (cirkulujícím horkým vzduchem), kondukcí (kontaktem fólie s ohřívanou plochou), pomocí zářičů popř. kondukcce a sálání. Předehřátá fólie vstupuje mezi tvárník a tvárnici, kde dochází k vytvarování. Přerušovaný převod je vyvozován pomocí pneumatického válce.

U kontinuálního mechanického tvarování je fólie tvarována řadou tvárníků a tvárníc nesených na řetězech. Výlisek je z fólie po dokončení tvarování vystřihnut a zůstává na tvárníku ze kterého je stažen vyhazovačem. Vyhazovač je ovládán mechanicky nebo pneumaticky. Nevýhodou je složitá konstrukce, nutnost výroby velkého množství forem. [1]



Obr. 2 Tvarování fólií – cyklické



Obr.3 Tvarování fólií - kontinuální

Obr. 2 a 3 – Tvarování fólií cyklické a kontinuální

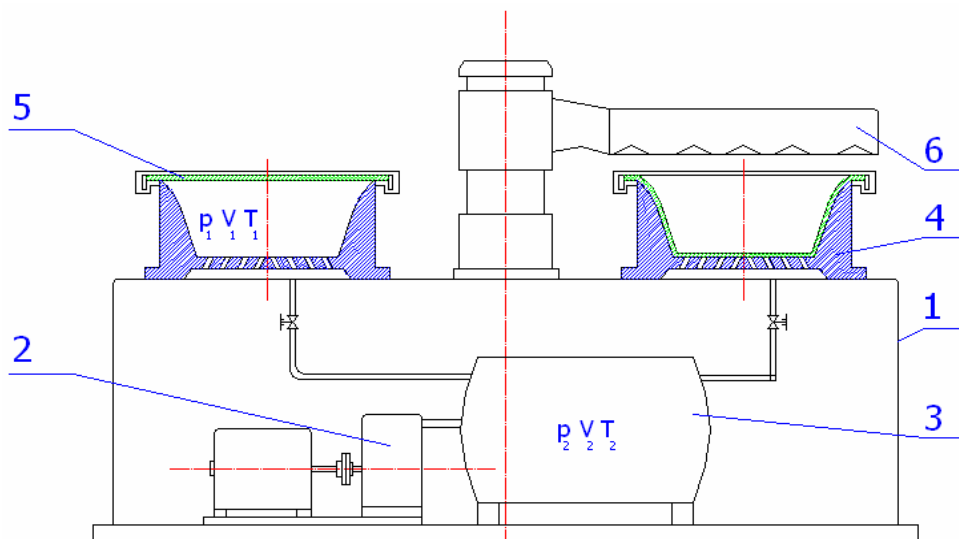
1 – fólie, 2 – ohřívací tunel, 3 – tvárník, 4 – tvárnice, 5 – zbytek fólie, 6 – nosný řetěz ,

7 – šablona

### 1.1.2 Pneumatické tvarování

Stroje určené pro pneumatické tvarování mohou pracovat buď s přetlakem nebo podtlakem nebo s jejich vzájemnou kombinací. V praxi je nejrozšířenější podtlakové tvarování, kde k dosažení požadovaného tvaru polotovaru postačuje rozdíl atmosférického tlaku a vakua vytvořeného v dutině formy vývěvou. Tvarovací tlak je tedy maximálně několik desítek KPa. U přetlakového tvarování se síla k tvarování vyvozuje působením tlakového média (obvykle stlačeného vzduchu), kde tlak bývá v rozmezí asi od 0,2 do 0,1 MPa.

K přednostem podtlakového tvarování patří možnost vyrábět předměty s větší plochou a přitom s tenkou stěnou, jednoduché a tedy i levné tvarovací formy, málo nákladná tvarovací zařízení. [1]



Obr.4 Dvojitý podtlakový tvarovací stroj na desky

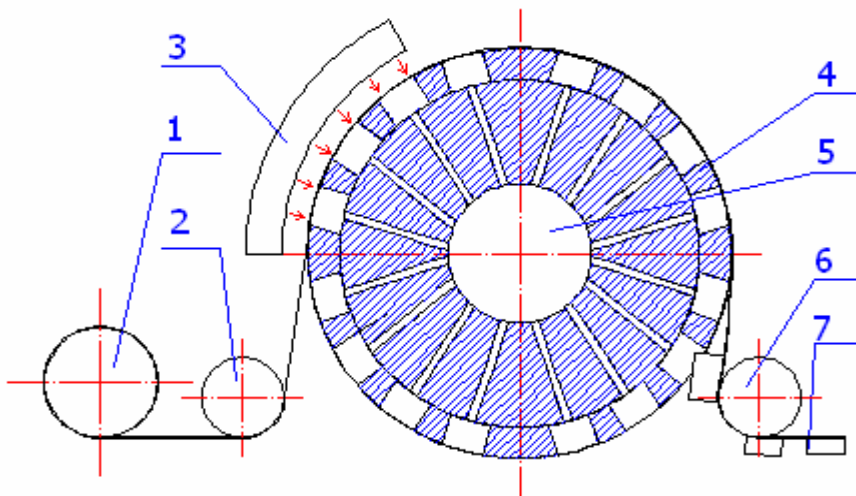
1 – fréza, 2 – vývěva, 3 – zásobník, 4 – tvárnice, 5 – deska, 6 - topení

### a) Pneumatické tvarování desek (obr. 4)

Deska 5 je upnuta nad tvárnici 4. Ohřev zajišťuje otočný topný panel 6. Zatímco na jedné polovině probíhá ohřev a tvarování, na druhé je výrobek vyjímán z tvárnice 4 a připravován další polotovar. Jakmile je deska 5 prohřátá na tvarovací teplotu, spojí se prostor ve tvárnici 4 uzavřený deskou 5 se zásobníkem podtlaku a přetlakem vnější atmosféry se deska vytvaruje. Pak následuje chlazení a vyjímání výrobku. Zásobník podtlaku je napojen na vývěvu 2, která udržuje tlak v zásobníku na požadované hodnotě. [1]

### b) Pneumatické tvarování fólií

Kontinuálně pracující podtlakové rotační zařízení na výrobu kelímků ukazuje následující obrázek 5. Fólie je odvíjena z balíku 1 přes váleček 2, je zaváděna pod topný panel 3. Tvárnice 4 jsou spojeny odsávacími kanálky s podtlakovou komorou 5. Vnější přetlakem dojde k vytvarování a ochlazení. [1]



Obr.5 Rotační tvarovací stroj

1 – odvíjení fólie, 2, 6 – převáděcí válce, 3 – topný panel, 4 – nástroj, 5 - podtlaková komora, 7 – vytvarovaný díl

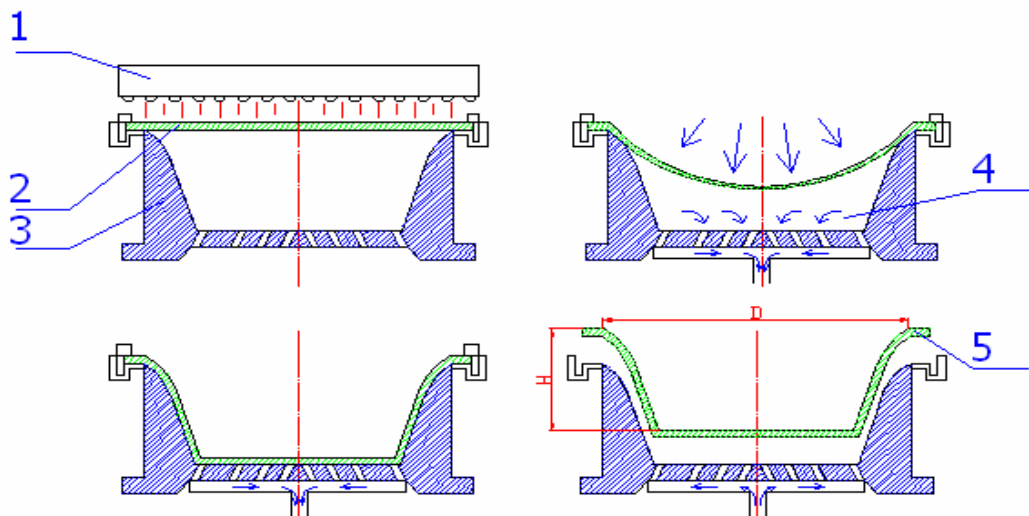
U pneumatického tvarování můžeme lze formovat plast do mnoha různých tvarů. Na ručních strojích lze zpracovávat materiál tloušťky od 1 do 12 mm a rozměrech i v metrech (3x 1,5 m). Každý materiál má odlišný způsob zpracování a má také jiné vlastnosti při zpracování. Můžeme zpracovávat velké množství materiálů (např. PVC, PS, PC, PE, PLEXI, ) [1]

Je nutné, aby desky během skladování neabsorbovaly vlhkost. Při ohřevu by se v důsledku toho mohly vytvořit na deskách bubliny. Desky je proto nutné sušit. Většinou se suší přes noc při teplotě ( 70 – 80 °C). Průměrná tvarovací teplota je 140°C – 190 °C v závislosti na tloušťce materiálu, ohřevu, nástrojích, atd. Teplota, kterou je nutno dodržet během tvarování je asi 160°C. Teplota matrice by se měla pohybovat v rozmezí 60°C a 70°C. Po tvarování za tepla se musí materiál rovnoměrně a pomalu chladit. [1]

Máme různé technologie pneumatického tvarování, například: negativní pneumatické tvarování, pozitivní pneumatické tvarování atd. [1]

### 1.1.2.1 Negativní pneumatické tvarování

Je nejpoužívanější způsob tvarování. Technické zařízení je levnější než u tlakových nebo mechanických technologií. Jednoduché negativní tvarování se hodí jen pro tažení mělkých výtažků, u nichž hloubka horního průměru  $H \leq 0,4 \cdot D$ . Je to proto, že se při tažení deska ztenčuje velmi nerovnoměrně a tedy v tloušťce stěny výtažku vznikají velké rozdíly. Stejnou tloušťku stěny nelze dosáhnout. Ztenčení je tím větší, čím je větší poměr  $H/D$ . Nejtenčí stěna je v rozích u dna. [8]



Obr.6 Negativní pneumatické tvarování

1 – ohřivací panel, 2 – deska, 3 – forma, 4 – odsávaný vzduch, 5 – hotový výrobek (vyhození výrobku)

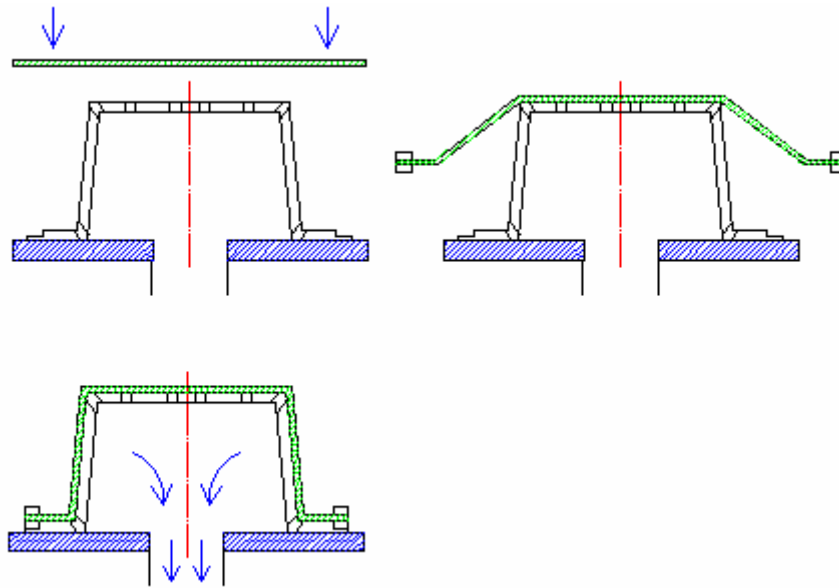
V první fázi se při negativním tvarování deska upevní do rámu a zahřeje na teplotu vhodnou pro tvarování. V druhé a třetí fázi nám deska přejde do pružného stavu, vzduch se z dutině vakuově odsaje a podtlak nám stlačí desku do požadovaného tvaru dutiny formy. V poslední fázi, až je deska dostatečně ochlazená, vyjme se z dutiny formy a to ručně nebo stlačeným vzduchem. (viz. obr.6) [8]

### 1.1.2.2 Pozitivní pneumatické tvarování

Je méně používaná technologie než negativní tvarování. Je složitější než negativní tvarování. Pozitivní formy se lépe vyrábějí, ale rychle se poškodí a opotřebují. Výhodou tohoto tvarování je to, že deska si ponechává téměř celou svou tloušťku v celém tvarovaném profilu při hloubce tažení, která se udává poměrem  $H/D = 1$ .



Maximální poměr může být  $H/D$  ( hloubka / průměr ) = 4:1. [8]



Obr.7 Pozitivní pneumatické tvarování

Hlavní rozdíl mezi negativním a pozitivním tvarováním je v tom, že deska je po upnutí a ohřevu mechanicky natažena na formu a potom pomocí tlakového rozdílu přesně vytvářena na razník. ( viz.obr.7 ) [8]

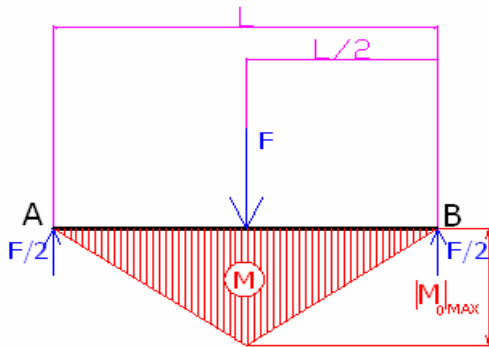
### 1.1.2.3 Formy pro pneumatické tvarování

Druhy forem:

1. Dřevěné formy – jsou levné a málo odolné, pro malosériovou výrobu i s povrchovou úpravou. Kvalita jejich povrchu se vlivem teplotních změn postupně zhoršuje.
2. Lité formy – sériová výroba, vyšší cena, dobrý povrch a značná trvanlivost.
3. Ocelové formy – hromadná výroba, jsou nejtrvanlivější ale používají se málo.
4. Sádrové formy – hodí se jen pro zhotovení několika kusů, protože sádra vlivem teplotních změn velmi často po kratší době praská.
5. Formy z tvrzené tkaniny – mohou se použít na výrobu až 20000 kusů. Je u nich však obtížné dosáhnout leštěním hladkého povrchu, podobně jako u dřevěných forem, proto je lepší tvrzené dřevo. [8]
6. Formy odlévané z epoxidových pryskyřic – kvalitní povrch i dobrá rozměrová stabilita.

## 2 OHYB

Ohýbání je proces vyvolaný působením momentů vnějších sil. V místě ohybu se průřezy kolmé k rovině momentu k sobě natáčejí kolem osy ležící mimo tvářený materiál. Ohnuté (prostorové) tvary lze rozvinout. Na obr.8, můžeme vidět 3-bodovou zkoušku ohybu.



Maximální ohybový moment:

$$M_{OMAX} = \frac{F}{2} \cdot \frac{L}{2} = \frac{F \cdot L}{4} \quad [\text{N} \cdot \text{mm}] \quad (1)$$

Modul průřezu v ohybu pro kruhový průřez:

$$W_0 = \frac{\pi \cdot d^3}{32} \quad [\text{mm}^3] \text{ - dle tabulek} \quad (2)$$

Obr.8 3-bodová zkouška ohybu

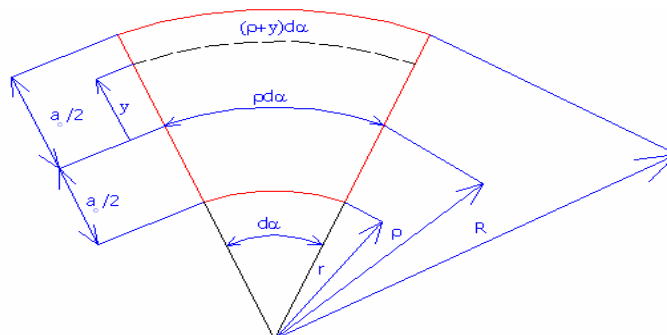
Pak celkové ohybové napětí bude: 
$$\sigma_o = \frac{M_{OMAX}}{W_0} = \frac{8 \cdot F \cdot L}{\pi \cdot d^3} \quad [\text{MPa}] \quad (3)$$

Ohybový moment je tím větší, čím větší je zatěžující síla a čím větší je rameno na kterém tato síla působí. Obecně tedy platí:

$$\mathbf{M} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{L} \quad (\text{síla} \times \text{rameno}) \quad [\text{N} \cdot \text{mm}] \quad (4)$$

Podmínky zkoušky pro plasty předepisuje norma ČSN EN ISO 178 (640607).

### 2.1 Deformace krajních vláken při ohybu



Obr.9 Deformace krajních vláken

$r$  – malý poloměr elementu,  $R$  – velký poloměr elementu,  $\rho$  – poloměr neutrální osy,  $y$  – zvolená vzdálenost elementu,  $d\alpha$  – úhel elementu,  $\rho d\alpha$  – délka vlákna v neutrální ose,  $(\rho+y)d\alpha$  – délka vlákna ve vzdálenosti  $y$  od neutrální osy

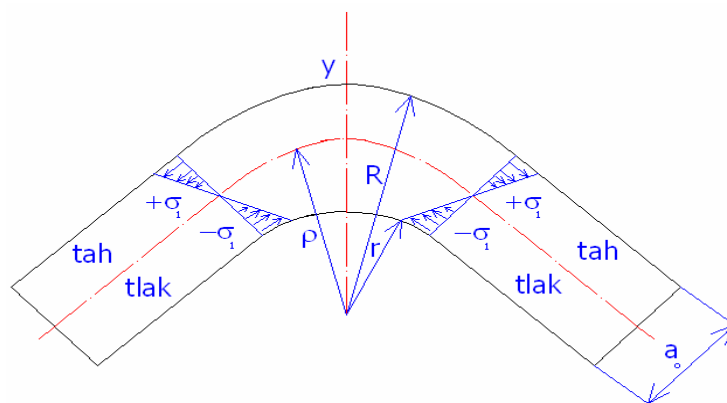
Neutrální vrstva má poloměr  $\rho$ . Délka vlákna na neutrální ose je  $L_0 = \rho d\alpha$ .

Délka vlákna ve vzdálenosti  $y$  od neutrální osy je  $L_1 = (\rho + y)d\alpha$ .

Poměrná deformace po dosažení  $L_1$  a  $L_0$ : [2]

$$\varepsilon = \frac{L_1 - L_0}{L_0} = \frac{(\rho + y).d\alpha - \rho d\alpha}{\rho d\alpha} = \frac{y d\alpha}{\rho d\alpha} = \frac{y}{\rho} \quad (5)$$

## 2.2 Napětí při ohybu



Obr.10 Napětí při ohybu

Podle obr.10 můžeme vidět, že při ohybu v horní části profilu ( tj.nad osou  $\rho$ ) vzniká napětí  $(+\sigma_1)$  tahové, ve spodní části ohýbaného profilu nám působí napětí tlakové  $(-\sigma_1)$ . Můžeme tedy říct, že horní vlákna profilu jsou tlačena a spodní vlákna profilu jsou tažena. Analogicky při ohybu z druhé strany by tomu bylo naopak. Je-li deformace přímo úměrná vzdálenosti vlákna od neutrální osy  $\rho$ , pak pro pružnou oblast dosazením do Hookova zákona

(  $\sigma = E.\varepsilon$  ) platí:

$$\sigma = E.\frac{y}{\rho} \quad (6)$$

Pak v krajních vláknech: 
$$\sigma_1 = \frac{a_0}{2.\rho}.E \quad (7)$$

Kde:  $\rho$  – poloměr zakřivení neutrální osy ,  $E$  – modul pružnosti v tahu

$\varepsilon$  - poměrná deformace ( poměrné prodloužení )

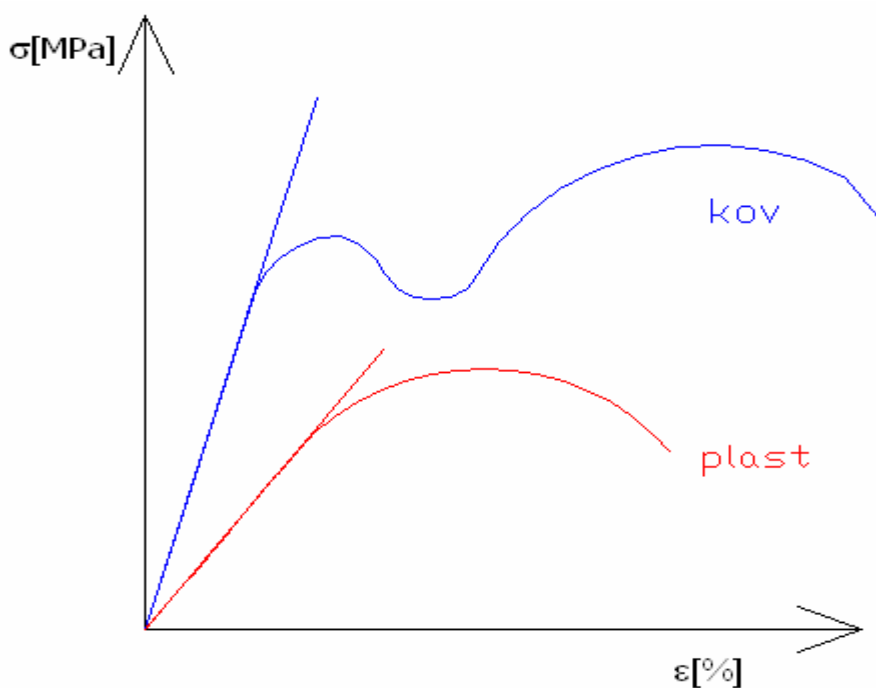
### 2.3 Ohybová tuhost v lineárně elastické oblasti

Ohybová tuhost materiálu je matematicky definována jako součin  $EJ$ , kde  $E$  je modul pružnosti v tahu a  $J$  je kvadratický moment plochy průřezu k neutrální ploše průřezu. [3]

#### 2.3.1 Modul pružnosti

Modul pružnosti patří k nejčastěji používaným parametrům, které popisují mechanické chování těles. Zjišťuje se na základě statických testů, jako poměr mezi mechanickým napětím a relativní zkrácení (prodloužení), méně často pak na základě měření oscilací těles. Modul pružnosti je dán jako poměr působícího namáhání  $\sigma$  k poměrné deformaci  $\varepsilon$ , která toto namáhání vyvolává tj.  $E = \sigma / \varepsilon$ . Modul pružnosti popisuje tuhost materiálu v tom smyslu, že čím je modul pružnosti větší, tím tužší je materiál. Youngův modul pružnosti  $E$  je definován jako směrnice tečny jednoosé tahové, respektive ohybové zkoušky v počátku souřadnicového systému a v praxi se hodnota modulu pružnosti  $E$  právě stanovuje jako hodnota směrnice tečny. [3]

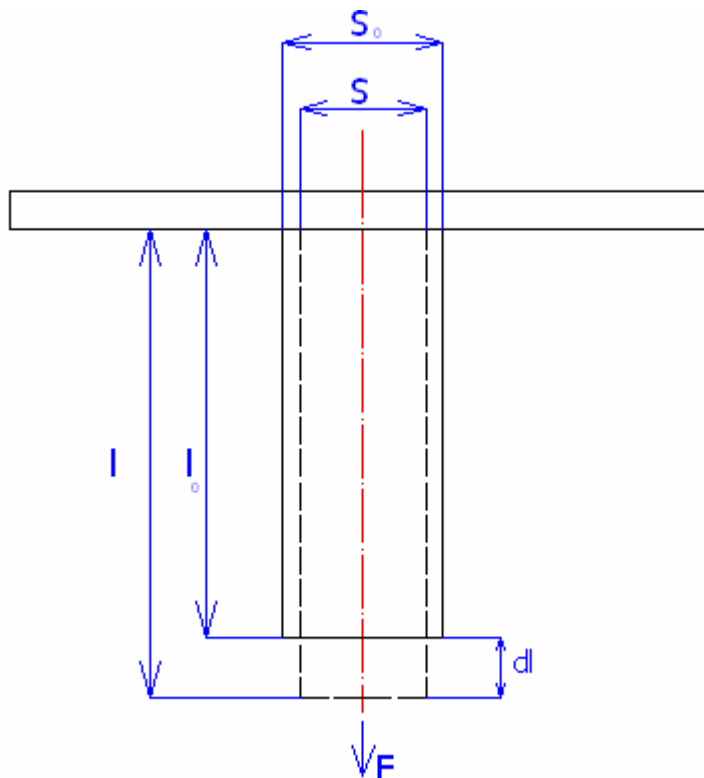
$$\sigma = k \cdot \varepsilon \Rightarrow k = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad a \quad E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad pak \quad \sigma = E \cdot \varepsilon \quad (8)$$



Obr.11 Obecný tvar závislosti funkce  $\sigma(\varepsilon)$

### 2.3.2 Hookeův zákon

Jde o zákon, kdy deformace tělesa je úměrná jeho namáhání. Velikost namáhání je v oblasti malých deformací a platí jen pro tahové (tlakové) namáhání, kdy po skončení namáhání dojde k vrácení tělesa do původního stavu (rozměru). Jedná se o pružnou deformaci. Linearita je typická pro krystalické látky, pokud namáhání nepřekročí mez, kdy dojde k posunu mezi krystalickými rovinami nebo k posunu mezi oblastmi ve struktuře látky. Hookeův zákon platí při jistém rozmezí namáhání i pro amorfnní látky a tělesa viskoelastická. [3]



Obr. 12 Namáhání tělesa tahem

$l_0$  – původní délka,  $l$  – délka po prodloužení,  $F$  – zatěžující síla,  $S_0$  – původní průřez,  $S$  – průřez po prodloužení,  $dl$  – prodloužení

Pro poměrné prodloužení  $\varepsilon$  platí vztah:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0} \quad [-] \quad (9)$$

Pro příčné poměrné zúžení platí vztah:

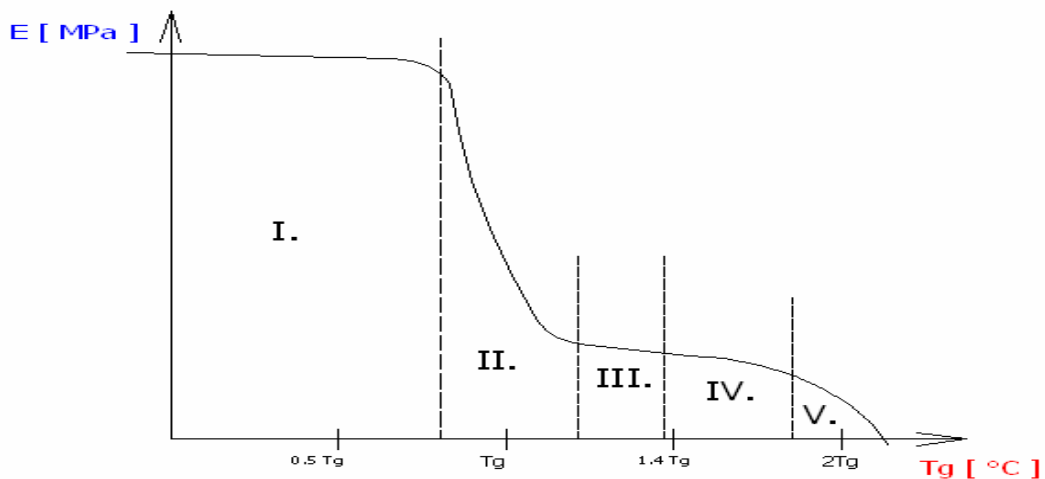
$$Z = \frac{\Delta S}{S} \cdot 100 = \frac{S_0 - S}{S_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (10)$$

Pro tažnost materiálu je dán vztah:

$$A = \frac{l - l_0}{l_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (11)$$

### 2.3.3 Vlastnosti modulu pružnosti

Plasty jsou závislé svými mechanickými vlastnostmi na teplotě. S rostoucí teplotou se modul pružnosti plastů snižuje a naopak. Pro amorfnní polymer je typická křivka viz obr.13. [3]



Obr.13 Závislost modulu pružnosti na teplotě skelného přechodu

I. Jde o skelnou ( sklovitou ) oblast, ve které se modul pružnosti téměř nemění. Při zatížení se polymer poruší křehkým lomem.

II. Oblast skelného přechodu. Dochází k velkému poklesu modulu pružnosti. Zde se stanovuje teplota skelného přechodu , která je střední hodnotou mezi začátkem a koncem této oblasti.

III. Kaučukovitá oblast

IV. Visko-elastická oblast

V. Oblast rozkladu polymeru

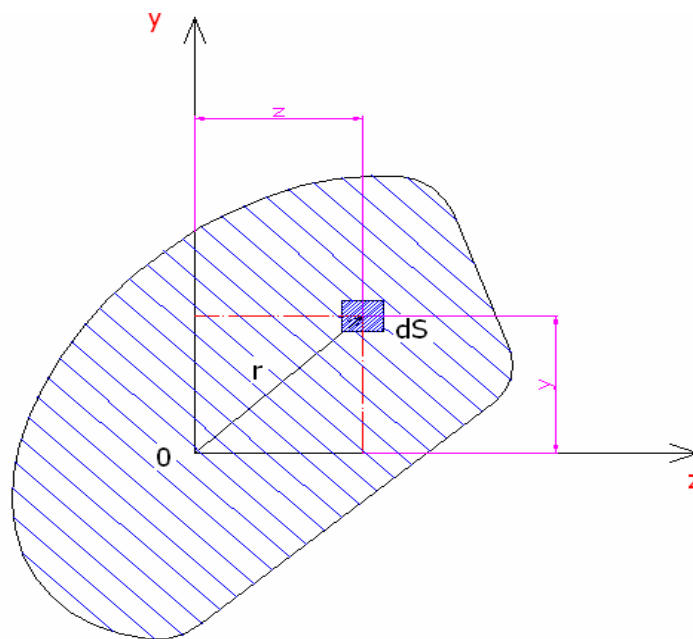
### 3 GEOMETRICKÉ CHARAKTERISTIKY PRŮŘEZU

#### 3.1 Lineární moment průřezu plochy

Tuto geometrickou charakteristiku můžeme také nazvat statický moment průřezu nebo také lineární. Tvar průřezu se určuje k přímce ležící v jeho rovině. Písmenem  $S$  můžeme označit obsah průřezu. Lineární moment celého průřezu k ose  $z$  a k ose  $y$  je určen součtem lineárních momentů elementů průřezů  $dS$ . [4]

Platí 
$$U_z = \int_S y dS \quad (12)$$

Stejně tak 
$$U_y = \int_S z dS \quad (13)$$



Obr.14 Lineární moment průřezu plochy

### 3.2 Kvadratický moment průřezu

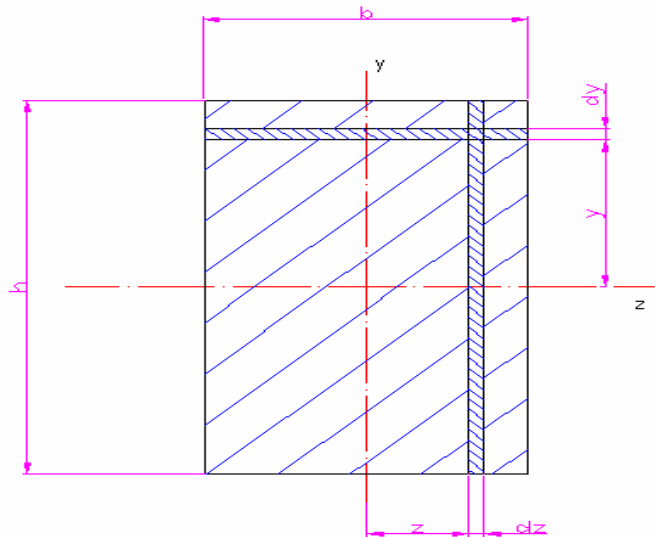
Kvadratický moment celého průřezu prutu o obsahu  $S$  k ose  $z$  popřípadě k ose  $y$ , která leží v rovině průřezu se určí součtem kvadratických momentů jeho elementárních částí. [4]

$$\text{- k ose } z: \quad J_z = \int_S y^2 dS \quad (14)$$

$$\text{- k ose } y: \quad J_y = \int_S z^2 dS \quad (15)$$

Kvadratické momenty základních tvarů průřezů

#### 3.2.1 Obdélník



Obr.15 Kvadratický moment průřezu obdélníka

-k ose  $z$ :

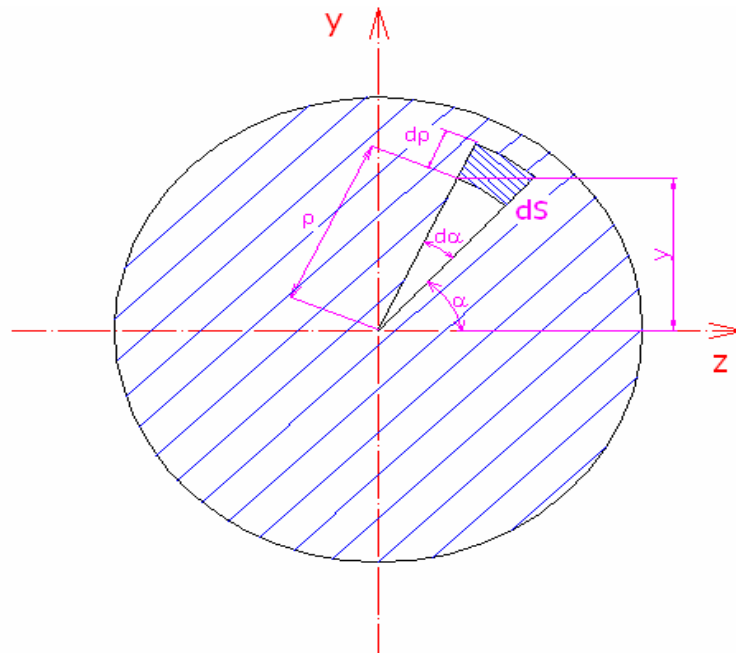
$$J_z = \int_S y^2 dS = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} y^2 \cdot b dy = b \cdot \left[ \frac{y^3}{3} \right]_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} = \frac{1}{3} \cdot b \cdot \left( \frac{h^3}{8} + \frac{h^3}{8} \right) = \frac{1}{12} b h^3 \quad (16)$$

- k ose  $y$ :

$$J_y = \int_S z^2 dS = \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} z^2 \cdot h dz = h \cdot \left[ \frac{z^3}{3} \right]_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} = \frac{1}{3} \cdot h \cdot \left( \frac{b^3}{8} + \frac{b^3}{8} \right) = \frac{1}{12} h b^3 \quad (17)$$



## 3.2.2 Kruh



Obr.16 Kvadratický moment průřezu kruhu

$$\sin \alpha = \frac{y}{\rho} \Rightarrow y = \rho \cdot \sin \alpha \quad , \quad dS = \rho \cdot d\alpha \cdot d\rho$$

- k ose z:

$$J_z = \int_S y^2 dS = \int_0^{2\pi} \int_0^r \rho^2 \cdot \sin^2 \alpha \cdot \rho \cdot d\rho \cdot d\alpha = \frac{r^4}{4} \int_0^{2\pi} \sin^2 \alpha \cdot d\alpha = \frac{\pi \cdot r^4}{4} = \frac{\pi \cdot d^4}{64} \quad (18)$$

- ose y:

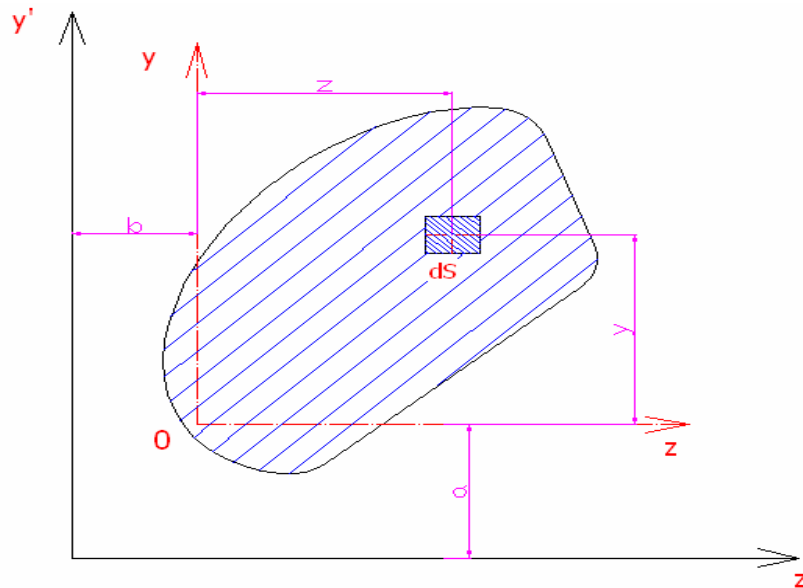
$$J_z = J_y \Rightarrow J_{z,y} = \frac{\pi \cdot d^4}{64} \quad (19)$$

Určení těžiště plochy:

$$\text{- osa z} \quad z_T = \frac{\sum z_i \cdot S_i}{S} \quad (20)$$

$$\text{- osa y} \quad y_T = \frac{\sum y_i \cdot S_i}{S} \quad (21)$$

### 3.3 Kvadratický moment průřezu plochy k mimotěžišťové ose



Obr.17 Kvadratický moment průřezu plochy k mimotěžišťové ose

Vyjádření pomocí tzv. *Steinerových vět*

$$\text{- k ose } z' : \quad J_{z'} = a^2 \cdot S + J_z \quad (22)$$

$$\text{- k ose } y' : \quad J_{y'} = b^2 \cdot S + J_y \quad (23)$$

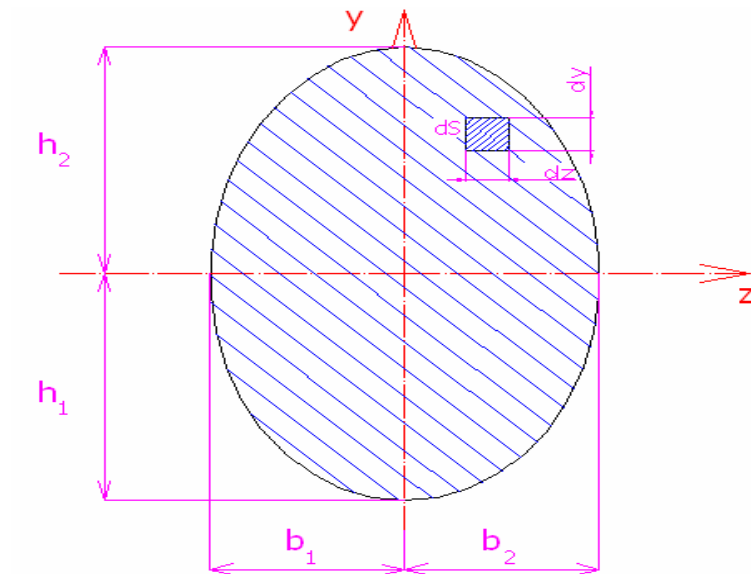
$$\text{- deviační moment k posunutým osám : } D_{z'y'} = a \cdot b \cdot S + D_{zy} \quad (24)$$

### 3.4 Polární kvadratický moment

Polární moment průřezu k počátku pravoúhlého souřadnicového systému se rovná součtu osových momentů k osám souřadnicového systému. [4]

$$J_p = \int_S r^2 dS = \int_S (y^2 + z^2) dS = \int_S y^2 dS + \int_S z^2 dS \Rightarrow J_p = J_z + J_y \quad (25)$$

## 3.5 Deviační moment



Obr.18 Deviační moment tělesa

Vztah pro deviační moment

$$D_{zy} = \int_S z \cdot y \cdot dS = \int_{-h_1}^{h_2} \int_{-b_1}^{b_2} z \cdot y \cdot dz \cdot dy = \frac{1}{2} \int_{-h_1}^{h_2} y (b_2^2 - b_1^2) dy = \frac{1}{4} (b_2^2 - b_1^2) (h_2^2 - h_1^2) \quad (26)$$

Pokud je těleso alespoň podle jedné osy symetrické a pokud tato osa prochází těžištěm, pak je deviační moment roven nule. [4]

## 4 TENKOSTĚNNÉ PROFILY

### 4.1 Plastové tenkostěnné profily

V současné době se téměř všechny plastové profily vyrábějí jako tenkostěnné. Hlavními důvody jsou úspora materiálu a také vyhovující nízká hmotnost. Nevýhodou tenkostěnných plastových profilů je jejich malá odolnost při namáhání na ohyb. Uvedenou nevýhodu se snažíme odstraňovat vyztužováním. *Měníme-li (v rámci Kirchhoffovy teorie čistého ohybu) tloušťku tenkostěnného prvku při daných okrajových podmínkách, tj. uložení a zatížení, závisejí ohybová napětí nepřímo na kvadrátu poměru změny tloušťek.*<sup>6</sup>

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \left( \frac{s_1}{s_2} \right)^2 \quad (27)$$

*To znamená, že při zvýšení tloušťky stěny např. o 50 % tj. o polovinu, poklesnou ohybová napětí 2,25krát. Ohybové deformace – průhyby, se budou měnit se změnou tloušťky výrazněji – s třetí mocninou poměru změny tloušťek.*<sup>6</sup>

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \left( \frac{s_1}{s_2} \right)^3 \quad (28)$$

*Například zvýší-li se tloušťka stěny o 50%, tj. o polovinu, ohybové deformace poklesnou 3,375krát.*<sup>6</sup>

### 4.2 Uzavřené tenkostěnné profily

Jsou vnitřně staticky neurčitě, tzn. říkáme, že jsou 3krát vnitřně staticky neurčitě. Pro teoretický výpočet ohybových momentů a vnitřních statických účinků je nutné provedení dvou myšlených řezů. Jejich ohybová tuhost a únosnost je vyšší než u otevřených profilů. [5]

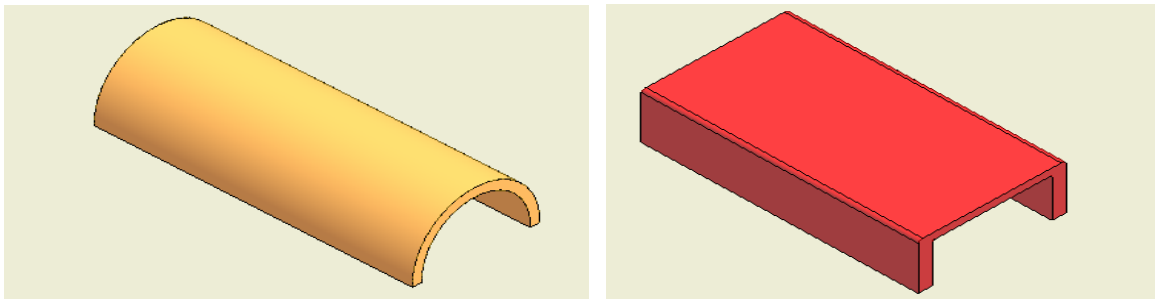
### 4.3 Otevřené tenkostěnné profily

Jsou staticky určité. Ohybová tuhost a únosnost je menší než u uzavřených tenkostěnných profilů. Právě otevřené tenkostěnné plastové profily je nutno řádně vyztužovat, aby více odolávali deformacím. [6]

#### 4.4 Tenkostěnné profily bez vyztužených okrajů (čisté)

Ohybová tuhost a únosnost je velmi malá. *Hlavním důvodem je, že hmota stěny je soustředěna poblíž střednice, což je plocha nulových ohybových napětí a tudíž je málo využita. Ramena vnitřních sil v průřezech stěny jsou tedy malá, takže materiál stěny je při přenosu ohybových momentů málo využit.*<sup>6</sup>

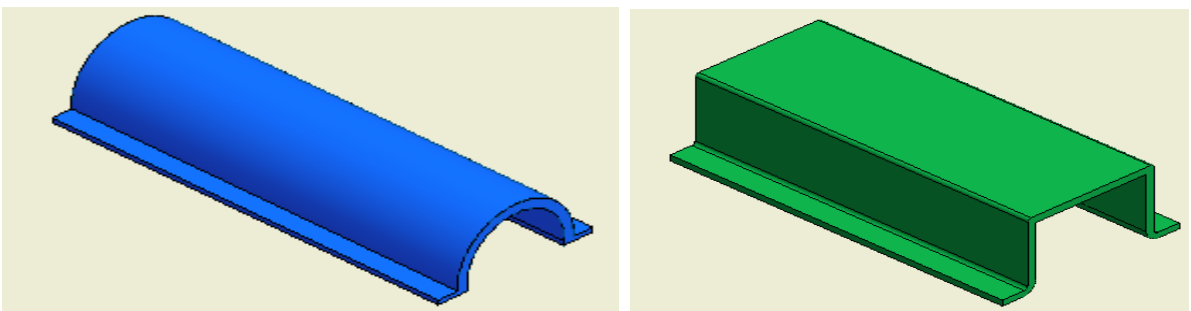
Proto zvyšování ohybové tuhosti stěny zvětšením tloušťky stěny bude málo účinné a také neekonomické. Proto veškerá tvarová řešení ohybově nosných částí upravujeme tak, aby většina průřezu byla ve větší vzdálenosti od neutrální plochy průřezu, což je poloha těžiště průřezu. [6]



Obr.19 Tenkostěnný půlkruhový profil a u-profil bez vyztužených okrajů

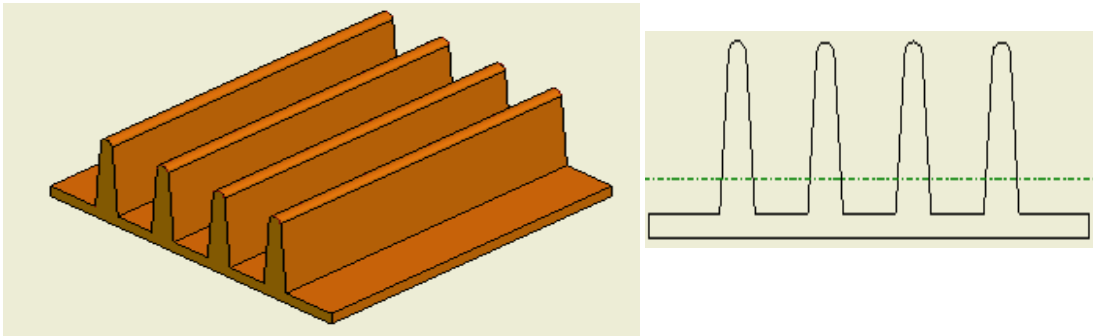
#### 4.5 Tenkostěnné profily s vyztuženými okraji

Vyztužování okrajů profilů nám zvyšuje odolnost proti vnějším zatížením, jako je například ohyb. Vyztužováním se zvyšuje tuhost a pevnost profilu. *U výztuží provedených jednosměrně, dochází k tzv.konstrukční ortotropii. Ve směru výztuže, vzniká ohybová tuhost, avšak ve směru příčném zůstává prakticky na úrovni nevyztužené stěny.*<sup>6</sup>



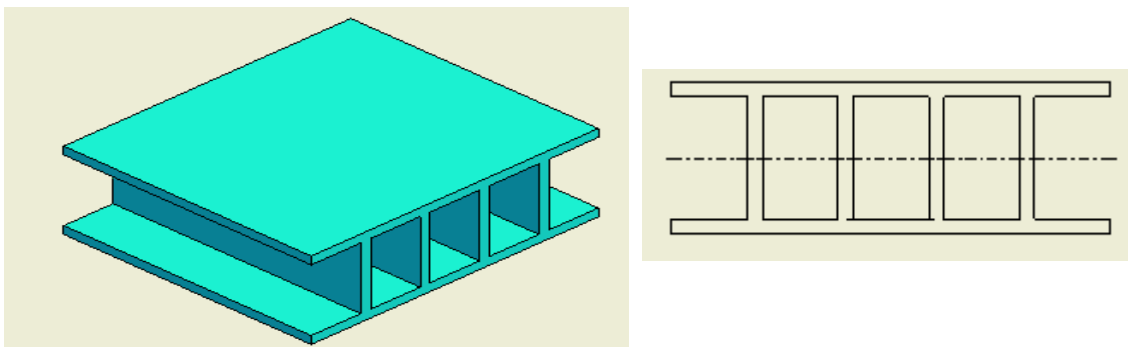
Obr.20 Tenkostěnný půlkruhový profil a u-profil s vyztuženými okraji

Málo efektivní jsou jednostranné typy vyztužení stěn s průřezy nesouměrnými k neutrální ose. Jsem patří zejména vyztužení stěn vstříkovaných výrobku jednostrannými žebry. Jejich nevýhodou je nesymetrie průřezu k neutrální ose, mající za následek relativně vysoké hodnoty ohybového napětí na koncích žeber.(viz.obr.21 ).<sup>6</sup>

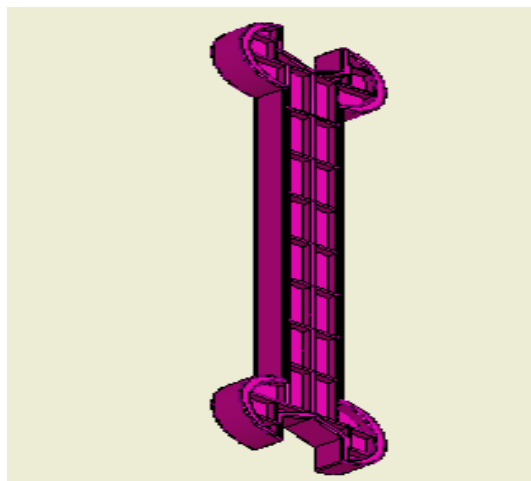


Obr.21 Nesymetrický vyztužený profil jednostrannými žebry

Symetrické plošné výztuhy vykazují vysoké poměry ohybové tuhosti ku objemu materiálu profilu.<sup>6</sup>



Obr.22 Symetricky vyztužený tenkostěnný profil



Obr.23 Dětský plastový klíč vyztužený žebry

## 5 PLASTY

V současné době existuje na trhu několik tisíc různých druhů plastů. V technické praxi však výrazné uplatnění má jen několik desítek druhů plastů. Z celkového objemu světové produkce plastů představuje skoro 80 % jen šest druhů plastů a 70 % výroby jen tři druhy, a to *polyolefíny, styrenové hmoty a polyvinylchlorid*. Sortiment termoplastů se neustále zvětšuje, a to v podstatě dvěma směry, kdy jednou cestou je výroba stále nových polymerů a druhou cestou je modifikace dosavadních polymerů. [7]

Při volbě materiálu je třeba vedle vlastností a ceny vzít v úvahu i jeho zpracovatelnost, která výrazně ovlivňuje mechanické a fyzikální vlastnosti konečného výrobku, ale i technologické podmínky, konstrukční řešení nástroje a volbu stroje. [7]

Vlastnosti a odolnost polymerů jsou dány jejich chemickou a fyzikální strukturou, ale mohou být i do značné míry ovlivněny procesem zpracování. [7]

*Mezi výhody* plastů patří jejich výborná zpracovatelnost, nízká hmotnost, izolační schopnosti, výborná odolnost proti korozi a také tlumí rázy a chvění. [7]

*Mezi nevýhody* určitě patří nízké mechanické vlastnosti, kríp (tečení) a také ekologická zatížitelnost. [7]

## 5.1 Příprava plastů

Synteticky připravované makromolekulární látky vznikají polyreakcemi (*polymerace, polykondenzace a polyadice.*). Jedná se o opakující se a velmi jednoduché chemické reakce, kdy původní nízkomolekulární sloučenina zvaná monomer přechází ve vysokomolekulární látku zvanou polymer. Plastem se polymer stává až poté, co ho smícháme a smísíme s nezbytnými přísadami a převedeme do formy vhodné k dalšímu technologickému zpracování, např. do formy granulí, prášků, tablet, apod. Obecný termín polymer představuje chemickou látku, zatímco plast je technický materiál, který musí mít vhodné užité vlastnosti. [7]

## 5.2 Rozdělení plastů podle teplotního chování

### 5.2.1 Reaktoplasty

-tyto polymerní materiály se dříve nazývaly termosety. Při jejich první fázi zahřívání se taví a měknou a lze je dobře tvářet, ale jenom do určité doby. Během dalšího zahřívání zde dochází k chemické reakci a k prostorovému zesíťování struktury (vytvrzování). Tento děj je nevratný a vytvrzené plasty není možno roztavit ani rozpustit. Patří sem například: epoxidové pryskyřice, polyesterové hmoty. [7]

### 5.2.2 Termoplasty

– jedná se o polymerní materiály které při zahřívání přecházejí do plastického stavu a můžeme je proto snadno tvářet a zpracovávat různými technologiemi. Do tuhého stavu přejdou ochlazením pod teplotu tání  $T_m$  (semikrystalické plasty), resp. teplotu viskózního toku  $T_f$  (amorfní plasty). Na rozdíl od reaktoplastů můžeme termoplasty zahřívát a přetvářovat teoreticky bez omezení. Je to pouze fyzikální proces. Patří sem například tyto polymery: polyethylen (PE), polypropylen (PP), polystyren (PS), polyvinylchlorid (PVC), polyamid (PA), atd. [7]

*Plasty* dále dělíme podle aplikace a podle *nadmolekulární struktury* (amorfní, krystalické). [7]





spínače, zásuvky a jejich skelety



obložení u řídiče vozu Audi A4



vedení válečkových  
a článkových řetězů



zadní nárazník vozu Škoda Fabia Combi

### Příklady aplikací termoplastů

Obr.24 Příklady aplikací termoplastů

## STANOVENÍ CÍLŮ PRO PRAKTICKOU ČÁST

V praktické části budu vyhodnocovat vliv vyztužení tenkostěnných na jejich chování při namáhání ohybem.

Navrhnou tvar a rozměry vzorků (u-profil a půlkruhový profil). To samozřejmě zahrnuje návrh výrobu dřevěných šablon, podle kterých se vytvoří daný profil (po dohodě s vedoucím bakalářské práce) na tvarovacím stroji Formtech. Profily vyrobím pro dvě základní tloušťky materiálu.

Po vyrobení profilů bude následovat zkouška namáhání ohybem na trhacím stroji Zwick. Naměřené hodnoty budou zpracovány programem TestExpert, který je nedílnou součástí tohoto stroje. Po provedení všech zátěžových zkoušek vyhodnotím naměřené hodnoty u profilů s vyztuženými a nevyztuženými okraji.

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 6 TENKOSTĚNNÉ PLASTOVÉ PROFILY TVARU „U“

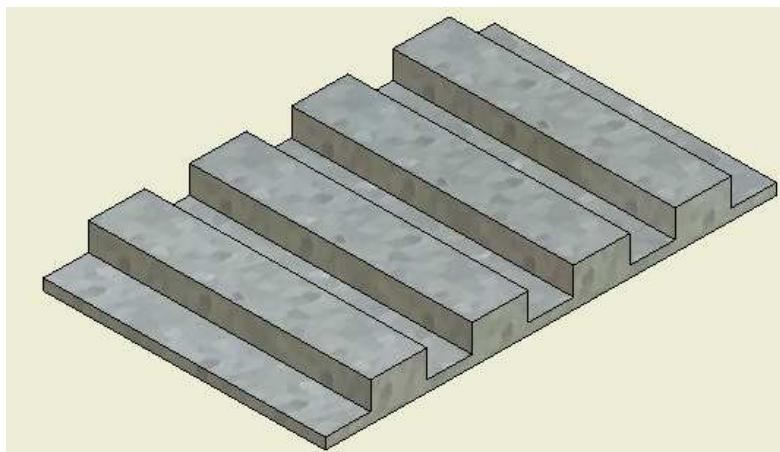
### 6.1 Vytvoření u-profilu

Pro vytvoření plastových profilů, které jsem chtěl ohýbat na trhacím stroji a následně porovnávat a vyhodnocovat výsledky zkoušky, jsem si nejdříve připravil vícenásobné dřevěné šablony, podle kterých se nám profily určené pro ohýbací zkoušku vytvořily (viz obr.25).

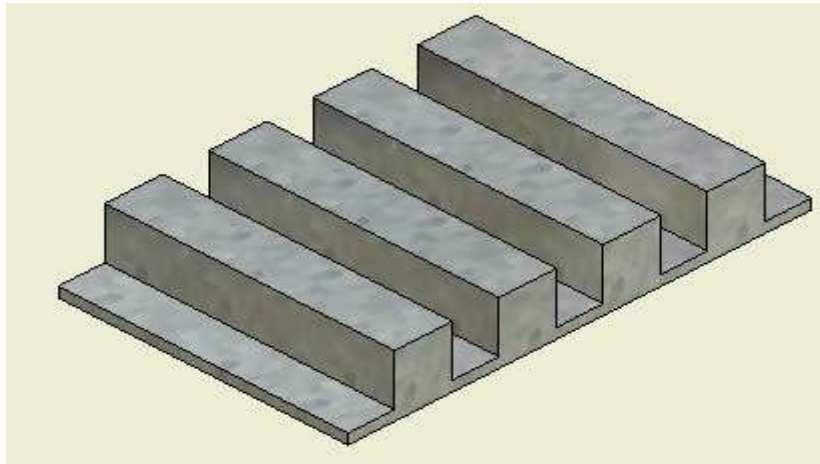
Plastové profily jsem vyrobil z plastových desek z polystyrenu (PS) o tloušťkách

1 a 2 mm. Dřevěné šablony jsem vložil do pneumatického podtlakového tvarovacího stroje. Dále jsem vložil předem připravenou plastovou desku o rozměrech 400x260 mm do rámu tvarovacího stroje.

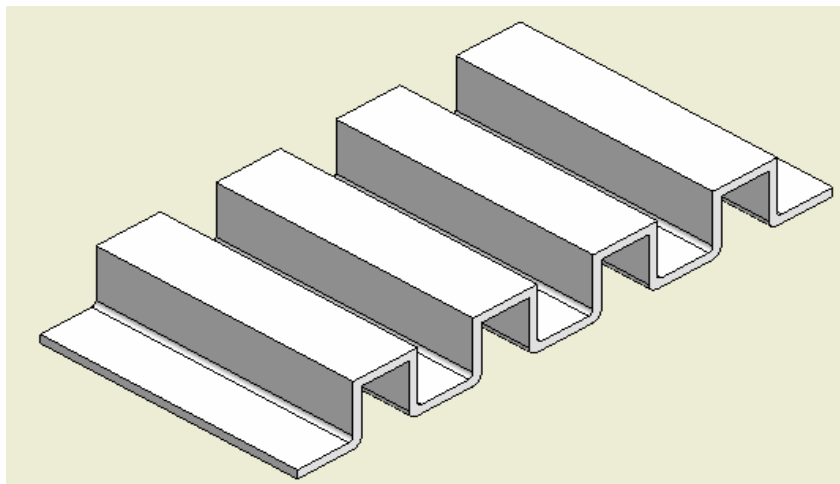
Na tvarovacím stroji *Formtech 300* jsem mohl nastavit tvarování různých materiálů a také různých tlouštěk. Mohl jsem zde také nastavit dobu ohřevu, intenzitu ohřívání a také způsob rozložení ohřevu po ploše. Doba ohřevu byla nastavena na 30-40 s pro tloušťku 1 mm a 60-70 s pro tloušťku 2 mm. Po zahřátí byla deska mechanicky natažena na šablonu a vlivem podtlaku došlo k vytvarování požadovaných u-profilů na desce. Po zchladnutí vytvarované desky se deska vyjmula z tvarovacího stroje a byla rozdělena na jednotlivé u-profily, které byly připraveny na ohýbací zkoušku.



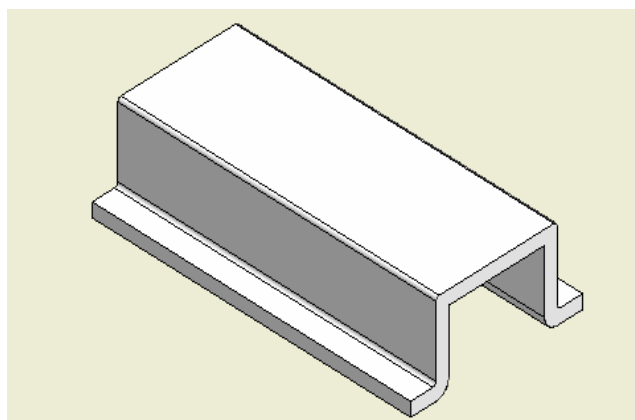
Obr.25 Dřevěná šablona pro nízký u-profil



Obr.26 Dřevěná šablona pro vysoký u-profil



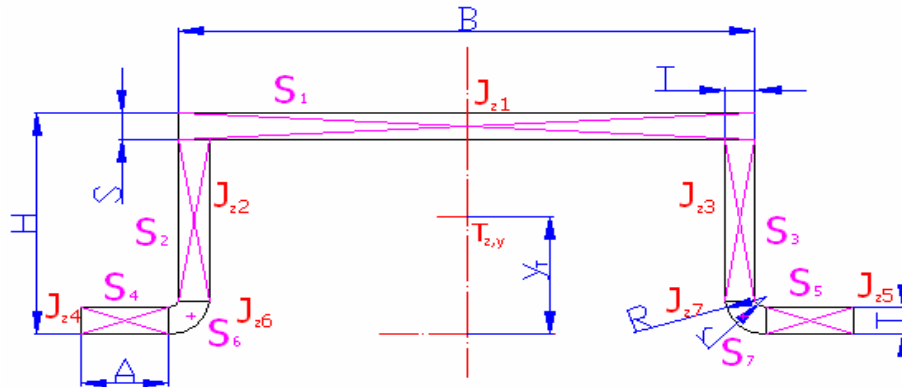
Obr.27 U-profil vytvořený na šabloně



Obr.28 U-profil vytvořený na šabloně po nařezání na kusy

## 6.2 Posouzení kvadratických momentů reálného u-profilu a idealizovaného u-profilu na základě vzorového výpočtu

### 6.2.1 Reálný u-profil a jeho rozměry



Obr.29.Reálný u-profil

Rozměry u-profilu č.1						
H	B	A	S	T	r	R
[ mm ]	[ mm ]	[ mm ]	[ mm ]	[ mm ]	[ mm ]	[ mm ]
25,75	49,32	11,10	1,77	1,55	1,90	3,40

Tab.1 Rozměry reálného u-profilu

#### Výpočet těžiště v ose y:

- obsahy jednotlivých ploch profilu:

$$S_1 = B \cdot S = 49,32 \cdot 1,77 = 87,29 \text{ mm}^2$$

$$S_2 = S_3 = T \cdot [H - (S + R)] = 1,55 \cdot [25,75 - (1,77 + 3,40)] = 31,89 \text{ mm}^2$$

$$S_4 = S_5 = A \cdot T = 11,10 \cdot 1,55 = 17,20 \text{ mm}^2$$

$$S_6 = S_7 = \frac{\pi \cdot (R^2 - r^2)}{4} = \frac{\pi \cdot (3,40^2 - 1,90^2)}{4} = 6,24 \text{ mm}^2$$

$$S_{CELK} = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_5 + S_6 + S_7 = 87,29 + 2 \cdot 31,89 + 2 \cdot 17,20 + 2 \cdot 6,24 = 197,9 \text{ mm}^2$$

-souřadnice y těžiště jednotlivých ploch profilu:

$$y_1 = H - \frac{S}{2} = 25,75 - \frac{1,77}{2} = 24,86 \text{ mm}$$

$$y_2 = y_3 = \frac{H - (S + R)}{2} + R = \frac{25,75 - (1,77 + 3,40)}{2} + 3,40 = 13,69 \text{ mm}$$

$$y_4 = y_5 = \frac{T}{2} = \frac{1,55}{2} = 0,77 \text{ mm}$$

$$y_6 = y_7 = R - \left( \frac{4}{3\pi} \cdot \frac{R^3 - r^3}{R^2 - r^2} \right) = 3,40 - \left( \frac{4}{3\pi} \cdot \frac{3,40^3 - 1,90^3}{3,40^2 - 1,90^2} \right) = 1,66 \text{ mm}$$

$$y_T = \frac{S_1 \cdot y_1 + S_2 \cdot y_2 + S_3 \cdot y_3 + S_4 \cdot y_4 + S_5 \cdot y_5 + S_6 \cdot y_6 + S_7 \cdot y_7}{S_{CELK}} = 15,61 \text{ mm}$$

**Výpočet kvadratických momentů jednotlivých ploch profilu k jejich těžištím:**

$$J_{z_1} = \frac{B \cdot S^3}{12} = \frac{49,32 \cdot 1,77^3}{12} = 22,8 \text{ mm}^4$$

$$J_{z_2} = J_{z_3} = T \cdot \frac{1}{12} \cdot [H - (S + R)]^3 = 1,55 \cdot \frac{1}{12} \cdot [25,75 - (1,77 + 3,40)]^3 = 1125,9 \text{ mm}^4$$

$$J_{z_4} = J_{z_5} = \frac{A \cdot T^3}{12} = \frac{11,10 \cdot 1,55^3}{12} = 3,4 \text{ mm}^4$$

$$J_{z_6} = J_{z_7} = \frac{\pi \cdot (R^4 - r^4)}{16} - \frac{\pi \cdot (R^2 - r^2)}{4} \cdot \left[ \frac{4}{3\pi} \cdot \frac{R^3 - r^3}{R^2 - r^2} \right]^2 = 23,7 - \frac{\pi \cdot (3,40^2 - 1,90^2)}{4}$$

$$\cdot \left[ \frac{4}{3\pi} \cdot \frac{3,40^3 - 1,90^3}{3,40^2 - 1,90^2} \right]^2 = 4,9 \text{ mm}^4$$

**Výpočet dílčích kvadratických momentů k těžišti profilu: Steinerova věta**

$$J_{z_1}' = J_{z_1} + B \cdot S \cdot \left[ H - \left( \frac{S}{2} + y_T \right) \right]^2 = 22,8 + (49,32 \cdot 1,77) \cdot \left[ 25,75 - \left( \frac{1,77}{2} + 15,61 \right) \right]^2 =$$

$$= 7493,2 \text{ mm}^4$$

$$J_{z_2}' = J_{z_3}' = J_{z_2} + [H - (S + R)] \cdot T \cdot \left[ \left( \frac{H - (S + R)}{2} + R \right) - y_T \right]^2 = 1125,9 + [25,75 - (1,77 + 3,40)] \cdot 1,55 \cdot$$

$$\left[ \left( \frac{25,75 - (1,77 + 3,40)}{2} + 3,40 \right) - 15,61 \right]^2 = 1244 \text{ mm}^4$$

$$J_{z_4}' = J_{z_5}' = J_{z_4} + AT \cdot \left( y_T - \frac{T}{2} \right)^2 = 3,4 + (11,10 \cdot 1,55) \cdot \left( 15,61 - \frac{1,55}{2} \right)^2 = 3792,1 \text{ mm}^4$$

$$J_{z_6}' = J_{z_7}' = J_{z_6} + \frac{\pi \cdot (R^2 - r^2)}{4} \cdot \left[ y_T - R + \left( \frac{4}{3\pi} \cdot \frac{R^3 - r^3}{R^2 - r^2} \right) \right]^2 = 4,9 + \frac{\pi(3,40^2 - 1,90^2)}{4}$$

$$\cdot \left[ 15,61 - 3,40 + \left( \frac{4}{3\pi} \cdot \frac{3,40^3 - 1,90^3}{3,40^2 - 1,90^2} \right) \right]^2 = 1219,4 \text{ mm}^4$$

**Velikost celkového kvadratického momentu reálného u-profilu:**

$$J_{z_{CELK}} = J_{z_1}' + J_{z_2}' + J_{z_3}' + J_{z_4}' + J_{z_5}' + J_{z_6}' + J_{z_7}' = 7493,2 + (2 \cdot 1244) + (2 \cdot 3792,1) + (2 \cdot 1219,4) = 20004,13 \text{ mm}^4$$

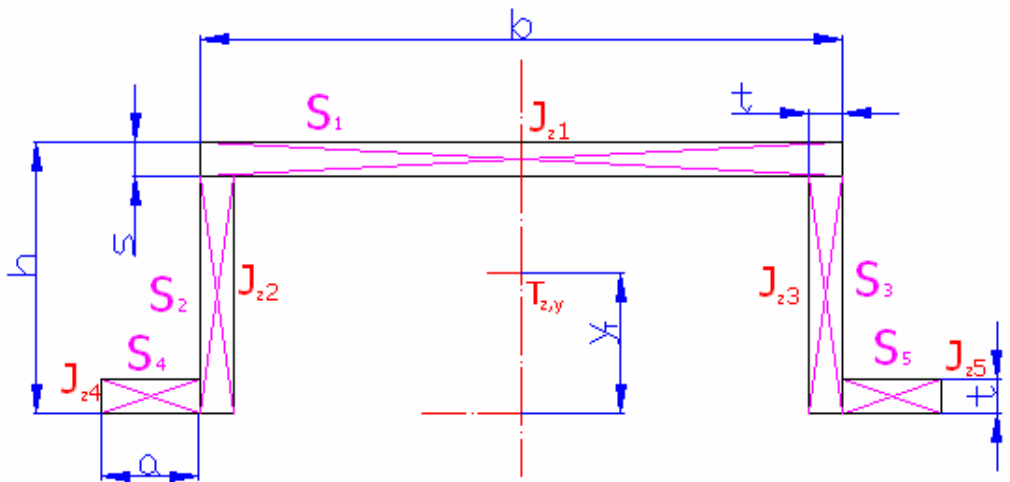
**Vyhodnocení vypočtených hodnot reálného u-profilu**

reálný u-profil	Vyhodnocení vypočtených hodnot							CELK
	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>5</sub>	S <sub>6</sub>	S <sub>7</sub>	S <sub>celk</sub>
[mm <sup>2</sup> ]	87,29	31,89	31,89	17,205	17,205	6,24	6,24	197,99
	y <sub>1</sub>	y <sub>2</sub>	y <sub>3</sub>	y <sub>4</sub>	y <sub>5</sub>	y <sub>6</sub>	y <sub>7</sub>	y <sub>T</sub>
[mm]	24,86	13,69	13,69	0,775	0,775	1,66	1,66	15,61
	Jz <sub>1</sub>	Jz <sub>2</sub>	Jz <sub>3</sub>	Jz <sub>4</sub>	Jz <sub>5</sub>	Jz <sub>6</sub>	Jz <sub>7</sub>	
[mm <sup>4</sup> ]	22,8	1125,9	1125,9	3,4	3,4	4,9	4,9	
	Jz <sub>1</sub> '	Jz <sub>2</sub> '	Jz <sub>3</sub> '	Jz <sub>4</sub> '	Jz <sub>5</sub> '	Jz <sub>6</sub> '	Jz <sub>7</sub> '	Jz <sub>celk</sub>
[mm <sup>4</sup> ]	7493,2	1244	1244	3792,1	3792,1	1219,4	1219,4	20004,13

Tab.2 Vypočtené hodnoty reálného u-profilu č.1



## 6.2.2 Idealizovaný u-profil



Obr.30 Rozměry idealizovaného u-profilu

Rozměry u-profilu č.1				
<b>h</b>	<b>b</b>	<b>a</b>	<b>s</b>	<b>t</b>
[ mm ]	[ mm ]	[ mm ]	[ mm ]	[ mm ]
25,75	49,32	13,00	1,77	1,55

Tab.3 Rozměry idealizovaného u-profilu

## Výpočet těžiště v ose y:

- obsahy jednotlivých ploch profilu:

$$S_1 = b \cdot s = 49,32 \cdot 1,77 = 87,29 \text{ mm}^2$$

$$S_2 = S_3 = t \cdot [h - s] = 1,55 \cdot [25,75 - 1,77] = 37,16 \text{ mm}^2$$

$$S_4 = S_5 = a \cdot t = 13 \cdot 1,55 = 20,15 \text{ mm}^2$$

$$S_{CELK} = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_5 = 87,29 + 37,16 + 37,16 + 20,15 + 20,15 = 201,93 \text{ mm}^2$$

-souřadnice y těžiště jednotlivých ploch profilu:

$$y_1 = h - \frac{s}{2} = 25,75 - \frac{1,77}{2} = 24,86 \text{ mm}$$

$$y_2 = y_3 = \frac{h - s}{2} = \frac{25,75 - 1,77}{2} = 11,99 \text{ mm}$$

$$y_4 = y_5 = \frac{t}{2} = \frac{1,55}{2} = 0,77 \text{ mm}$$

$$y_T = \frac{S_1 \cdot y_1 + S_2 \cdot y_2 + S_3 \cdot y_3 + S_4 \cdot y_4 + S_5 \cdot y_5}{S_{CELK}} = 15,32 \text{ mm}$$

**Výpočet kvadratických momentů jednotlivých ploch profilu k jejich těžištím:**

$$J_{z_1} = \frac{b \cdot s^3}{12} = \frac{49,32 \cdot 1,77^3}{12} = 22,8 \text{ mm}^4$$

$$J_{z_2} = J_{z_3} = t \cdot \frac{1}{12} \cdot [h - s]^3 = 1,55 \cdot \frac{1}{12} \cdot [25,75 - 1,77]^3 = 1781,1 \text{ mm}^4$$

$$J_{z_4} = J_{z_5} = \frac{a \cdot t^3}{12} = \frac{13 \cdot 1,55^3}{12} = 4,0 \text{ mm}^4$$

**Výpočet dílčích kvadratických momentů k těžišti profilu: Steinerova věta**

$$J_{z_1}' = J_{z_1} + b \cdot s \cdot \left[ h - \left( \frac{s}{2} + y_T \right) \right]^2 = 22,8 + (49,32 \cdot 1,77) \cdot \left[ 25,75 - \left( \frac{1,77}{2} + 15,32 \right) \right]^2 =$$

$$= 7979,9 \text{ mm}^4$$

$$J_{z_2}' = J_{z_3}' = J_{z_2} + (h - s) \cdot t \cdot \left[ y_T - \left( \frac{h - s}{2} \right) \right]^2 = 1781,1 + [(25,75 - 1,77) \cdot 1,55] \cdot$$

$$\left[ 15,32 - \left( \frac{25,75 - 1,77}{2} \right) \right]^2 = 2192,7 \text{ mm}^4$$

$$J_{z_4}' = J_{z_5}' = J_{z_4} + a \cdot t \cdot \left( y_T - \frac{t}{2} \right)^2 = 4,0 + [13 \cdot 1,55] \cdot \left[ 15,32 - \frac{1,55}{2} \right]^2 =$$

$$= 4265,6 \text{ mm}^4$$

**Velikost celkového kvadratického momentu idealizovaného u-profilu:**

$$J_{z_{CELK}} = J_{z_1}' + J_{z_2}' + J_{z_3}' + J_{z_4}' + J_{z_5}' = 7979,9 + (2 \cdot 2192,7) + (2 \cdot 4265,6) = 20896,5 \text{ mm}^4$$

## Vyhodnocení vypočtených hodnot idealizovaného u-profilu

ideální u-profil	Vyhodnocení vypočtených hodnot					CELK
	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	Scelk
[mm <sup>2</sup> ]	87,29	37,16	37,16	20,15	20,15	201,91
	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	$y_5$	$y_T$
[mm]	24,86	11,99	11,99	0,77	0,77	15,32
	$Jz_1$	$Jz_2$	$Jz_3$	$Jz_4$	$Jz_5$	
[mm <sup>4</sup> ]	22,8	1781,1	1781,1	4	4	
	$Jz_1'$	$Jz_2'$	$Jz_3'$	$Jz_4'$	$Jz_5'$	Jzcelk
[mm <sup>4</sup> ]	7979,9	2192,7	2192,7	4265,6	4265,6	20896,5

Tab.4 Vypočtené hodnoty idealizovaného profilu

## Rozdíl kvadratických momentů k těžišti u-profilu pro idealizovaný a reálný profil:

Rozdíl kvadratických momentů k těžišti v % obou profilů			
u-profil č.1	Jz celk	%	Rozdíl v%
reálný profil	20004,13	100%	4,30%
idealizovaný profil	20896,5	x%	

Tab.5 Rozdíl kvadratických momentů

## Rozdíl těžišť obou profilů:

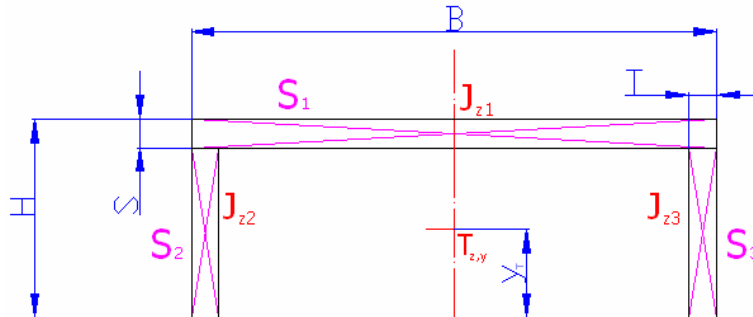
Rozdíl těžišť	
u-profil č.1	$y_T$ [mm]
reálný profil	15,61
idealizovaný profil	15,32

Tab.6 Rozdíl těžišť

Z uvedených výpočtů vyplývá, že rozdíl mezi idealizovaným a reálným profilem je do 5 %. V našem případě (4,30%). Obdobně je tomu u ostatních profilů.

### 6.3 Posouzení velikosti vypočtených kvadratických momentů reálného profilu bez vyztužení a s vyztužením okrajů

#### 1.U-profil bez vyztužených okrajů



Obr.31 U-profil bez vyztužených okrajů

Rozměry u-profilů				
	H	B	s	T
u-profil	[ mm ]	[ mm ]	[ mm ]	[ mm ]
č.1	22,35	49,32	1,77	1,55
č.2	22,89	49,48	0,90	0,82
č.3	15,49	50,00	1,80	1,58
č.4	15,53	49,29	0,89	0,78

Tab.7 Rozměry u-profilů bez vyztužení

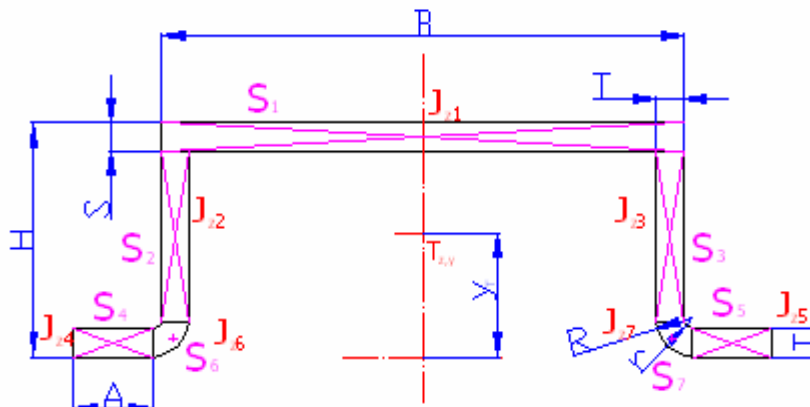
u-profil č.	Jz
1	6877,62
2	4066,38
3	2452,51
4	1316,39

Tab.8 Velikost kvadratických momentů

Velikost těžiště	
u-profil č.	y <sub>T</sub>
1	16,75
2	17,32
3	12,08
4	12,43

Tab.9 Velikost těžiště

## 2.U-profil s vyztuženými okraji



Obr.32 U-profil s vyztuženými okraji

Rozměry u-profilů							
u-profil	h [ mm ]	b [ mm ]	a [ mm ]	s [ mm ]	t [ mm ]	r [ mm ]	R [ mm ]
č.1	25,75	49,32	11,10	1,77	1,55	1,90	3,40
č.4	25,09	49,48	11,10	0,90	0,82	1,30	2,20
č.3	18,09	50,00	11,05	1,80	1,58	1,05	2,60
č.2	17,83	49,29	11,51	0,89	0,78	1,40	2,30

Tab.10 Rozměry u-profilů s vyztužením

u-profil č	Jz
1	20004,13
2	10542,69
3	8715,80
4	4779,20

Tab.11 Velikost kvadratických momentů

u-profil č	y <sub>T</sub>
1	15,61
2	15,29
3	11,27
4	11,07

Tab.12 Velikost těžišť

**Rozdíl kvadratických momentů mezi vyztuženým a nevyztuženým profilem**

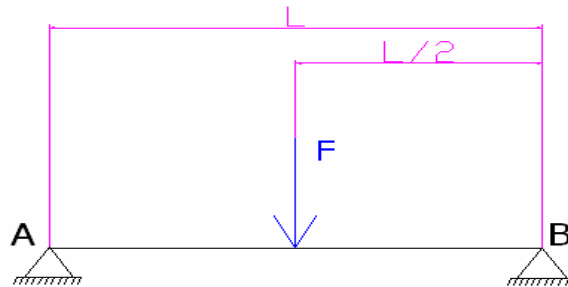
	bez vyztužení	s vyztužením	rozdíl v %
u-profil č.	Jz	Jz	%
1	6877,62	20004,13	65,62
2	4066,38	10542,69	61,43
3	2452,51	8715,80	71,87
4	1316,39	4779,20	72,46

Tab.13 Rozdíl mezi kvadratickými momenty u-profilů

Z uvedených výpočtů je zřejmé, že rozdíl mezi kvadratickými momenty vyztuženého profilu a profilu bez vyztužení je významný, pohybuje se v rozmezí cca 61-73%.

#### 6.4 Výpočet ohybové tuhosti profilu

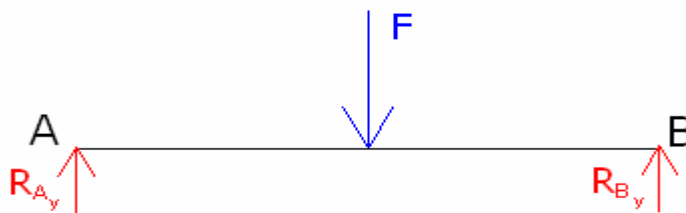
Pro výpočet ohybové tuhosti  $EJ$  vycházíme z tříbodové ohybové zkoušky (obr.33).



Obr.33 Schéma zatěžování nosníku

#### Řešení:

Pro reakce v podpěrách (obr.34) a maximální ohybový moment známé vztahy.



Obr.34 Úplné uvolnění nosníku

$$1. R_{Ay} = R_{By} = \frac{F}{2} \text{ N} \quad (29)$$

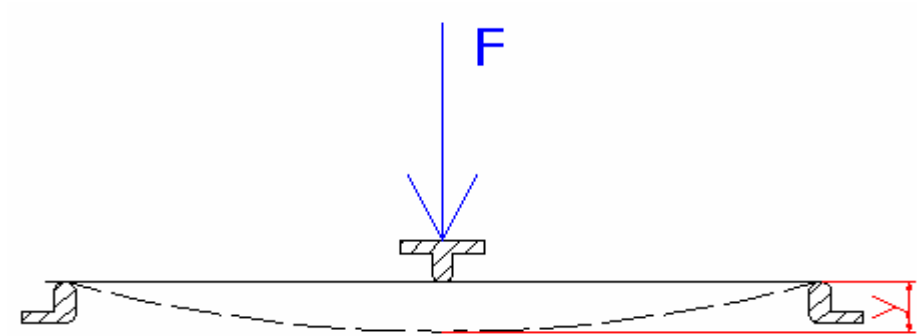
$$2. M_{OMAX} = \frac{F \cdot L}{4} \text{ N.mm}$$

kde:  $F$  – zatěžující síla [N]

$L$  – rozpětí podpěr [mm]

Průhyb uprostřed zkoušeného profilu (nosníku) je dán následným vztahem.

$$y = \frac{F.L^3}{48.E.J} \quad (30)$$



Obr.35 Schéma průhybu nosníku při zatížení silou F

### Výpočet ohybové tuhosti

Pokud znám velikost hodnoty průhybu nosníku  $y$ , pak mohu ze vztahu (30) vypočítat velikost ohybové tuhosti  $E.J$ . Platí:

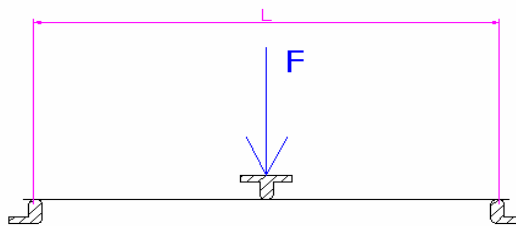
$$E.J = \frac{F.L^3}{y.48} \quad (31)$$

Kde:  $y$  – průhyb zjištěný měřením při ohybové zkoušce [mm]



### 6.5 Ohybová zkouška na stroji ZWICK

Praktickou ohybovou zkoušku jsem prováděl na trhacím stroji *ZWICK 1456*. Šlo o tříbodovou zkoušku ohybem, kdy jsem profil umístil na podpěry o vzdálenosti  $L = 180$  mm. Jednotlivé profily jsem zatěžoval oboustranně. Potřebné hodnoty nám vygeneroval program TestExpert, který je příslušenstvím trhacího stroje. Pro experimentální provedení byly zvoleny 2 základní u-profilů dané charakteristickými rozměry dřevěných šablon a to o výšce 17 mm a 25 mm, které oba byly vyrobeny z desek o charakteristické tloušťce  $t = 1$  mm a  $t = 2$  mm.



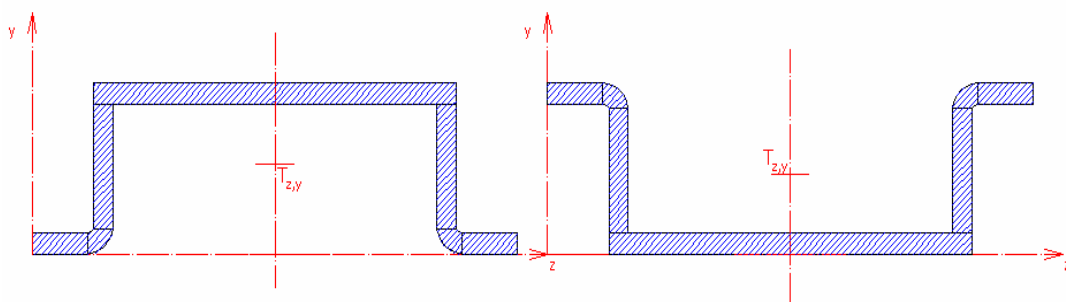
Obr.36 Schéma 3-bodové ohybové zkoušky

#### Schéma zatěžování profilů

Jednotlivé profily jsem zatěžoval otočené dnem nahoru a otočené dnem dolů jak ukazuje obr.37.

u-profil otočen dnem nahoru

u-profil otočen dnem dolů



Obr.37 Schéma otočení profilů

Následující tabulka uvádí jasný přehled, jak byly zatěžované profily označeny a seřazeny do sérií.

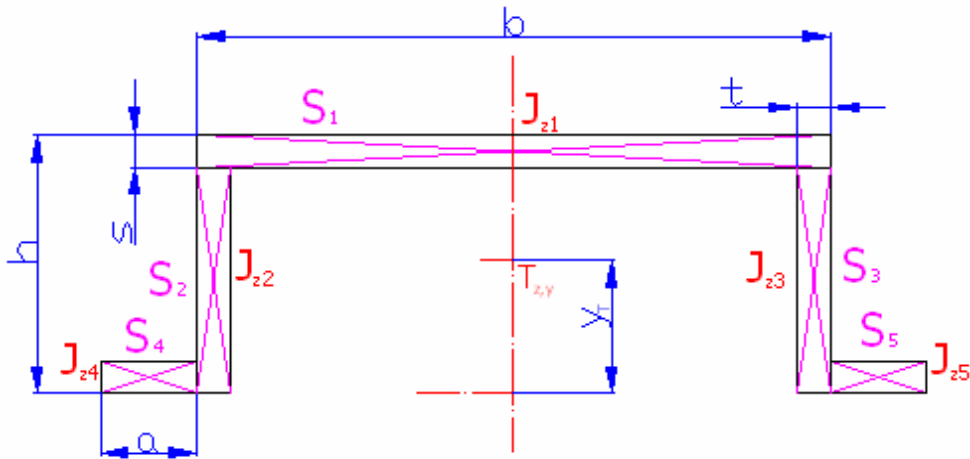
Každá série měření byla provedena vždy na pěti vzorcích, kromě 5.a 6. série které byly provedeny na čtyřech vzorcích. Důvodem bylo jejich poškození v průběhu experimentu.

Charakteristické rozměry		Označení profilu	Orientace profilu	Číslo série profilu
Výška šab. (mm)	Tloušťka mat. (mm)			
25	2	č.1	dnem nahoru	1.
			dnem dolů	2.
25	1	č.2	dnem nahoru	3.
			dnem dolů	4.
17	2	č.3	dnem nahoru	5.
			dnem dolů	6.
17	1	č.4	dnem nahoru	7.
			dnem dolů	8.

Tab.14 Přehled označení a orientace profilů

### 6.5.1 Měření 1. a 2. série u-profilu otočeného dnem nahoru a dolů

Profil byl vytvarován z desky tloušťky 2 mm do výšky ( $h = 25,75 \pm 0,05$  mm). V tabulce č.15 jsou uvedeny rozměry profilu dle (obr.38).



Obr.38 Profil č.1

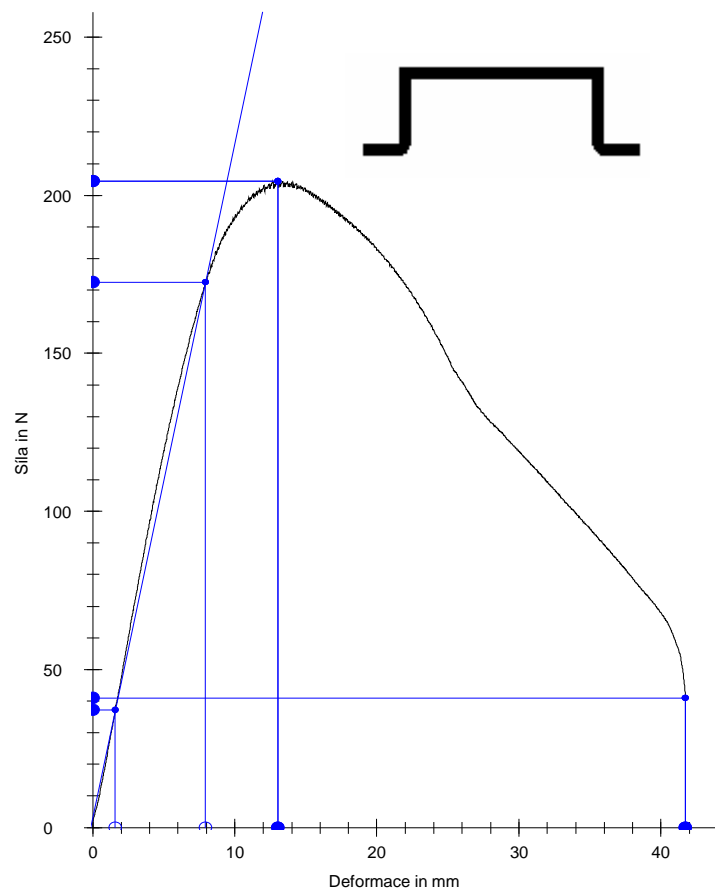
Profil č.1 Vysoký - 230x25x2 mm					
měření č.	h [ mm ]	b [ mm ]	a [ mm ]	s [ mm ]	t [ mm ]
1.	25,90	49,45	12,95	1,74	1,55
2.	25,70	49,36	12,97	1,78	1,54
3.	25,75	49,33	13,00	1,79	1,55
4.	25,76	49,37	13,02	1,75	1,55
5.	25,74	49,20	12,98	1,76	1,55
6.	25,70	49,40	13,00	1,78	1,55
7.	25,72	49,21	13,04	1,78	1,53
8.	25,72	49,10	12,98	1,76	1,55
9.	25,73	49,38	12,96	1,74	1,55
10.	25,76	49,35	13,05	1,77	1,55
ap	25,75	49,32	13,00	1,77	1,55
μ	0,05	0,10	0,03	0,02	0,01

Tab.15 Rozměry u-profilu č.1

## Naměřené hodnoty 1.série u-profilu otočeného dnem nahoru

1.série	E	Fmax	F <sub>1</sub> při y <sub>1</sub>	F <sub>2</sub> při y <sub>2</sub>	y při (Fmax)
měření č.	[Mpa]	[N]	[N]	[N]	[mm]
1	112183,9	198,82	22,95	135,32	10,24
2	122126,5	224,9	26,07	156,92	11,77
3	<b>127683,7</b>	<b>204,51</b>	<b>37,19</b>	<b>172,49</b>	<b>13,02</b>
4	128846,3	198,17	36,5	173,03	13,56
5	139041,8	218,08	64,23	211,57	10,47
ap	<b>125976,43</b>	<b>208,90</b>	<b>37,39</b>	<b>169,87</b>	<b>11,81</b>
u	<b>8796,70</b>	<b>10,74</b>	<b>14,55</b>	<b>24,97</b>	<b>1,33</b>

Tab.16 Naměřené hodnoty 1.série



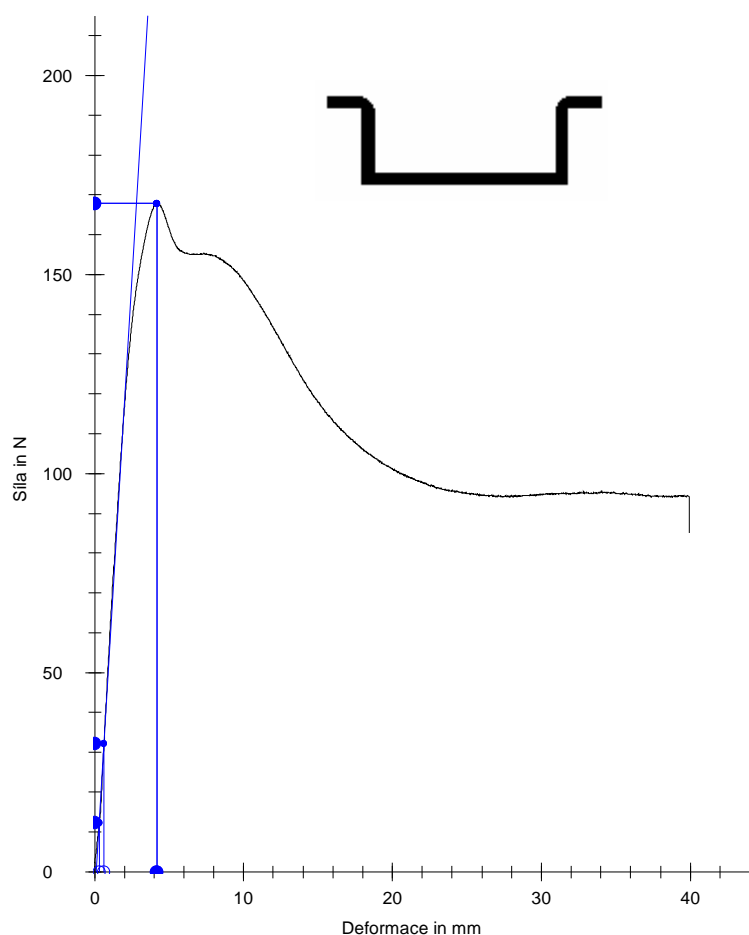
Graf č.1- pro 1.sérii

Graf č.1 odpovídá hodnotám z tabulky č.16 a to naměřeným hodnotám pro 1.sérii pro měření č.3. Hodnoty jsou zvýrazněny *tučně*.

## Naměřené hodnoty 2.série u-profilu otočeného dnem dolů

2.série	E	Fmax	F <sub>1</sub> při y <sub>1</sub>	F <sub>2</sub> při y <sub>2</sub>	y při (Fmax)
měření č.	[Mpa]	[N]	[N]	[N]	[mm]
1	58957,01	124,41	60,97	123,44	6,35
2	<b>56810,04</b>	<b>167,8</b>	<b>94,5</b>	<b>154,7</b>	<b>4,2</b>
3	35612,05	145,11	93,48	131,21	3,53
4	104528,2	176,24	59,93	170,7	6,6
5	34786,26	101,51	64,32	101,18	7,37
ap	<b>58138,71</b>	<b>143,01</b>	<b>74,64</b>	<b>136,25</b>	<b>5,61</b>
u	<b>25326,68</b>	<b>27,54</b>	<b>15,87</b>	<b>24,28</b>	<b>1,48</b>

Tab.17 Naměřené hodnoty 2.série



Graf č.2 - pro 2.sérii

Graf č.2 odpovídá hodnotám z tabulky č.17 a to naměřeným hodnotám pro 2.sérii pro měření č.2. Hodnoty jsou zvýrazněny *tučně*.

### 6.5.2 Měření 3. a 4. série u-profilu otočeného dnem nahoru a dolů

Profil byl vytvarován z desky tloušťky 1 mm do výšky ( $h = 25,09 \pm 0,08$  mm). V tabulce č.18 jsou uvedeny rozměry daného profilu dle (obr.38).

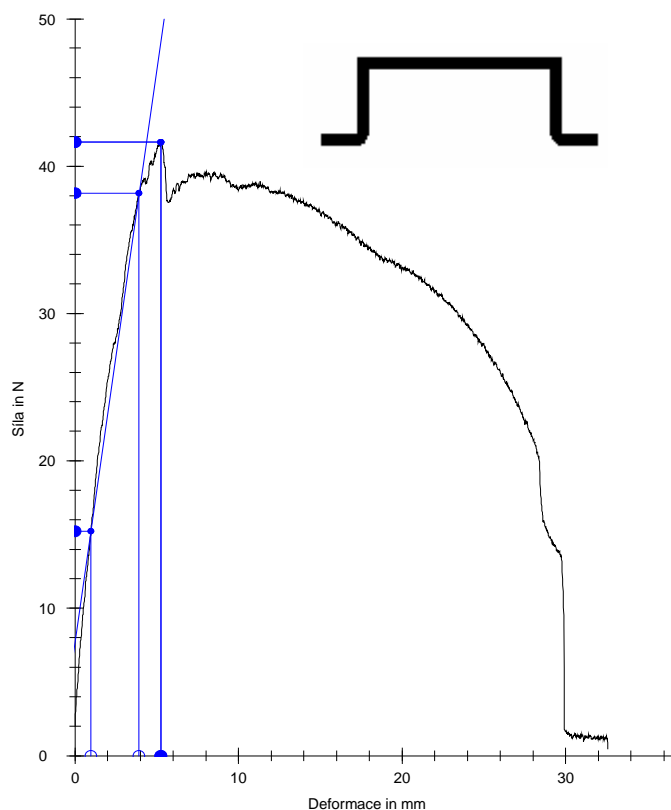
Profil č.2 Vysoký - 230x25x1 mm					
	<b>h</b>	<b>b</b>	<b>a</b>	<b>s</b>	<b>t</b>
měření č.	[ mm ]	[ mm ]	[ mm ]	[ mm ]	[ mm ]
1.	25,00	49,50	12,35	0,90	0,82
2.	25,10	49,51	12,37	0,90	0,82
3.	25,20	49,45	12,40	0,90	0,82
4.	25,00	49,50	12,42	0,91	0,81
5.	25,10	49,49	12,38	0,91	0,82
6.	25,21	49,44	12,40	0,90	0,81
7.	25,20	49,50	12,44	0,92	0,80
8.	25,01	49,50	12,38	0,90	0,82
9.	25,02	49,46	12,36	0,90	0,82
10.	25,10	49,49	12,45	0,90	0,82
<b>ap</b>	<b>25,09</b>	<b>49,48</b>	<b>12,40</b>	<b>0,90</b>	<b>0,82</b>
<b>μ</b>	<b>0,08</b>	<b>0,02</b>	<b>0,03</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>

Tab.18 Rozměry u-profilu č.2

### Naměřené hodnoty 3.série u-profilu otočeného dnem nahoru

3.série	<b>E</b>	<b>Fmax</b>	<b>F<sub>1</sub> při y<sub>1</sub></b>	<b>F<sub>2</sub> při y<sub>2</sub></b>	<b>y při (Fmax)</b>
měření č.	[Mpa]	[N]	[N]	[N]	[mm]
1	346834,73	44,87	14,36	37,67	10,43
2	<b>340892,39</b>	<b>41,64</b>	<b>15,24</b>	<b>38,16</b>	<b>5,24</b>
3	239536,88	39,73	13,53	29,64	9,13
4	287634,06	40,34	14,1	33,44	10,44
5	254476,2	40,34	12,51	29,61	19,58
<b>ap</b>	<b>293874,85</b>	<b>41,38</b>	<b>13,95</b>	<b>33,70</b>	<b>10,96</b>
<b>u</b>	<b>43724,62</b>	<b>1,85</b>	<b>0,91</b>	<b>3,71</b>	<b>4,71</b>

Tab.19 Naměřené hodnoty 3.série



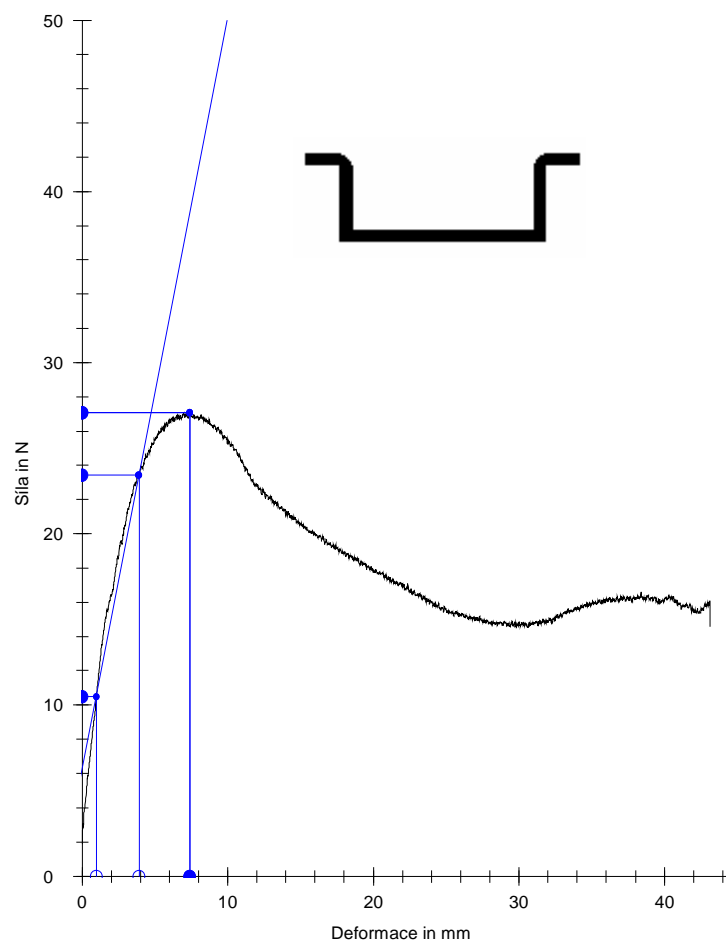
Graf č.3 - Graf pro 3.sérii

Graf č.3 odpovídá hodnotám z tabulky č.19 a to naměřeným hodnotám pro 3.sérii pro měření č.2. Hodnoty jsou zvýrazněny *tučně*.

#### Naměřené hodnoty 4.série u-profilu otočeného dnem dolů

4.série	E	Fmax	F <sub>1</sub> při y <sub>1</sub>	F <sub>2</sub> při y <sub>2</sub>	y při (Fmax)
měření č.	[Mpa]	[N]	[N]	[N]	[mm]
1	290281,19	35,06	12,98	32,49	6,6
2	153284,38	22,55	11,13	21,43	7,11
3	<b>192579,85</b>	<b>27,08</b>	<b>10,5</b>	<b>23,45</b>	<b>7,41</b>
4	301134,48	34,69	12,83	33,08	6,67
5	362352,52	39,35	10,21	34,57	7,06
ap	<b>259926,48</b>	<b>31,75</b>	<b>11,53</b>	<b>29,00</b>	<b>6,97</b>
u	<b>76182,29</b>	<b>6,06</b>	<b>1,16</b>	<b>5,44</b>	<b>0,30</b>

Tab.20 Naměřené hodnoty 4.série



Graf č.4 -Graf pro 4.sérii

Graf č.4 odpovídá hodnotám z tabulky č.20 a to naměřeným hodnotám pro 4.sérii pro měření č.3. Hodnoty jsou zvýrazněny *tučně*.



### 6.5.3 Měření 5. a 6. série u-profilu otočeného dnem nahoru a dolů

Profil byl vytvarován z desky tloušťky 2 mm a do výšky  $h = (18,09 \pm 0,08 \text{ mm})$ . V tabulce č.21 jsou uvedeny rozměry daného profilu dle (obr.38).

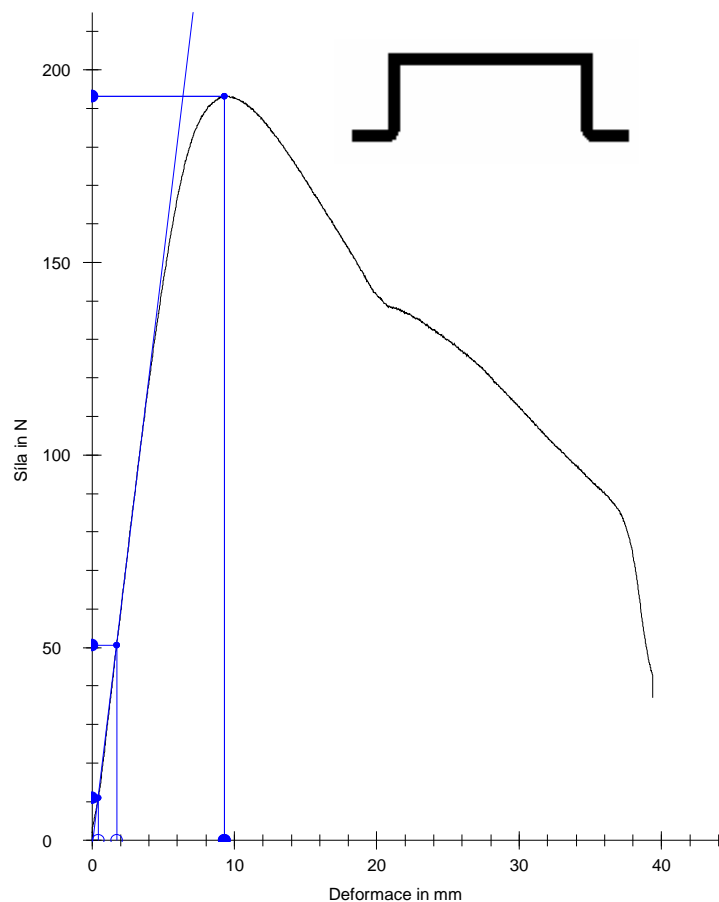
Profil č.3 Nízký - 230x218x2 mm					
měření č.	h [ mm ]	b [ mm ]	a [ mm ]	s [ mm ]	t [ mm ]
1.	18,00	50,05	12,07	1,80	1,58
2.	18,10	50,00	12,08	1,80	1,58
3.	18,00	50,00	12,05	1,81	1,57
4.	18,21	50,10	12,15	1,80	1,56
5.	18,24	49,89	12,20	1,82	1,58
6.	18,10	49,95	12,15	1,79	1,58
7.	18,05	49,95	12,07	1,80	1,57
8.	18,00	50,00	12,07	1,80	1,58
9.	18,10	50,10	12,06	1,80	1,58
10.	18,05	50,00	12,05	1,80	1,58
ap	18,09	50,00	12,10	1,80	1,58
$\mu$	0,08	0,06	0,05	0,01	0,01

Tab.21 Rozměry u-profilů č.3

### Naměřené hodnoty 5.série u-profilu otočeného nahoru

5.série	E	Fmax	F <sub>1</sub> při y <sub>1</sub>	F <sub>2</sub> při y <sub>2</sub>	y při (Fmax)
měření č.	[Mpa]	[N]	[N]	[N]	[mm]
1	190165,1	208,98	12,15	57,05	8,93
2	<b>168145,7</b>	<b>193,18</b>	<b>10,85</b>	<b>50,55</b>	<b>9,33</b>
3	172556,7	192,66	15,61	56,35	9,19
4	169332,8	184,57	12,89	52,87	9,48
ap	<b>175050,08</b>	<b>194,85</b>	<b>12,88</b>	<b>54,21</b>	<b>9,23</b>
u	<b>8874,66</b>	<b>8,84</b>	<b>1,74</b>	<b>2,64</b>	<b>0,20</b>

Tab.22 Naměřené hodnoty 5.série



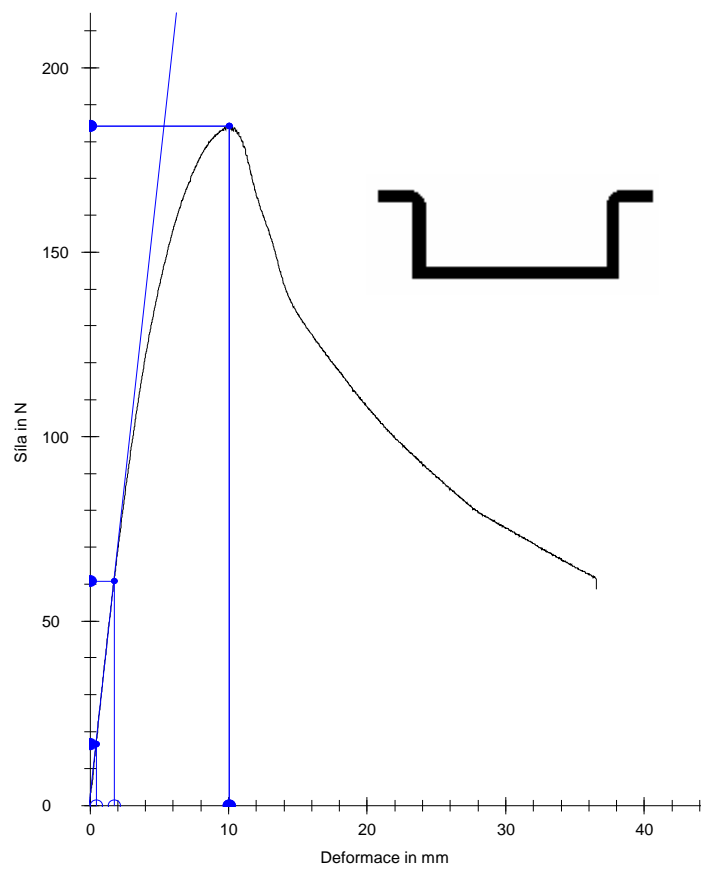
Graf č.5 - Graf pro 5.sérii

Graf č.5 odpovídá hodnotám z tabulky č.22 a to naměřeným hodnotám pro 5.sérii pro měření č.2. Hodnoty jsou zvýrazněny *tučně*.

#### Naměřené hodnoty 6.série u-profilu otočeného dnem dolů

6.série	E	Fmax	F <sub>1</sub> při y <sub>1</sub>	F <sub>2</sub> při y <sub>2</sub>	y při (Fmax)
měření č.	[Mpa]	[N]	[N]	[N]	[mm]
1	199767,2	188,1	16,92	64,08	9,29
2	<b>187356,9</b>	<b>184,23</b>	<b>16,5</b>	<b>60,74</b>	<b>10,03</b>
3	201957,7	201,33	16,84	64,52	10,49
4	199826,7	190,16	16,64	63,82	10,13
ap	<b>197227,12</b>	<b>190,96</b>	<b>16,73</b>	<b>63,29</b>	<b>9,99</b>
u	<b>5766,49</b>	<b>6,36</b>	<b>0,17</b>	<b>1,49</b>	<b>0,44</b>

Tab.23 Naměřené hodnoty 6.série



Graf č.6 - Graf pro 6.sérii

Graf č.6 odpovídá hodnotám z tabulky č.23 a to naměřeným hodnotám pro 6.sérii pro měření č.2. Hodnoty jsou zvýrazněny *tučně*.

#### 6.5.4 Měření 7. a 8. série u-profilu otočeného dnem nahoru a dolů

Profil byl vytvarován z desky tloušťky 1 mm do výšky ( $h = 17,83 \pm 0,11$  mm). V tabulce č.24 jsou uvedeny rozměry tohoto profilu dle (obr.38).

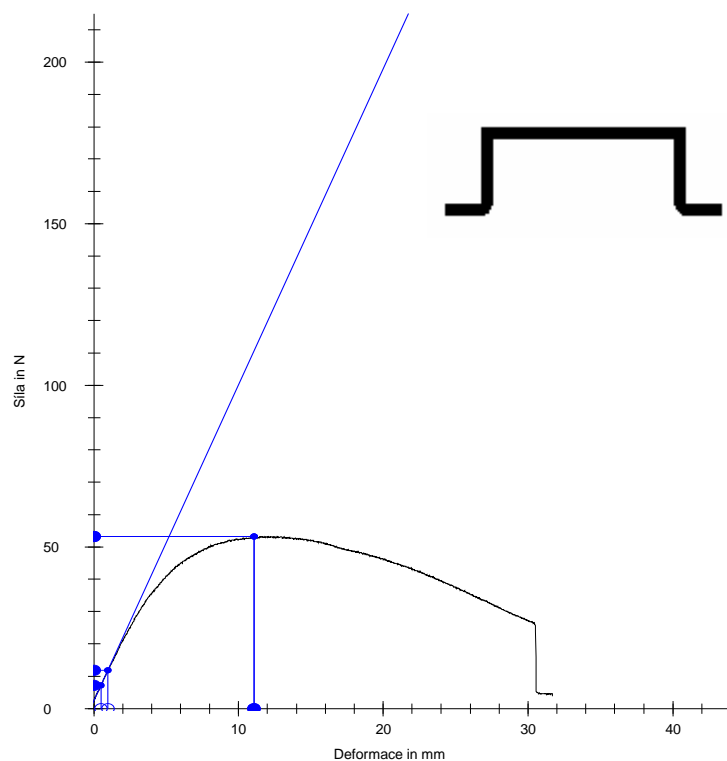
Profil č.4 Nízký - 230x218x1 mm					
	<b>h</b>	<b>b</b>	<b>a</b>	<b>s</b>	<b>t</b>
měření č.	[ mm ]	[ mm ]	[ mm ]	[ mm ]	[ mm ]
1.	17,90	49,56	12,90	0,89	0,78
2.	17,98	48,80	12,92	0,87	0,76
3.	17,89	48,90	12,92	0,89	0,77
4.	17,66	48,96	12,90	0,89	0,76
5.	17,85	49,45	12,91	0,88	0,78
6.	17,69	49,40	12,90	0,88	0,78
7.	17,65	49,60	12,90	0,89	0,78
8.	17,90	49,40	12,96	0,89	0,78
9.	17,88	49,45	12,90	0,89	0,78
10.	17,88	49,40	12,90	0,89	0,78
<b>ap</b>	<b>17,83</b>	<b>49,29</b>	<b>12,91</b>	<b>0,89</b>	<b>0,78</b>
<b>μ</b>	<b>0,11</b>	<b>0,28</b>	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>

Tab.24 Rozměry u-profilu č.4

#### Naměřené hodnoty 7.série u-profilu otočeného dnem nahoru

7.série	<b>E</b>	<b>Fmax</b>	<b>F<sub>1</sub> při y<sub>1</sub></b>	<b>F<sub>2</sub> při y<sub>2</sub></b>	<b>y při (Fmax)</b>
měření č.	[Mpa]	[N]	[N]	[N]	[mm]
1	205360,1	51,24	19,74	51,03	11,82
2	117878,3	50,86	31,21	49,17	8,76
3	190625,7	52,78	23,46	52,51	11,81
4	<b>185446,2</b>	<b>53,16</b>	<b>24,8</b>	<b>53,05</b>	<b>11,07</b>
5	157117,1	50,18	25,26	49,2	10,17
<b>ap</b>	<b>171285,46</b>	<b>51,64</b>	<b>24,89</b>	<b>50,99</b>	<b>10,73</b>
<b>u</b>	<b>30947,45</b>	<b>1,14</b>	<b>3,71</b>	<b>1,62</b>	<b>1,15</b>

Tab.25 Naměřené hodnoty 7.série



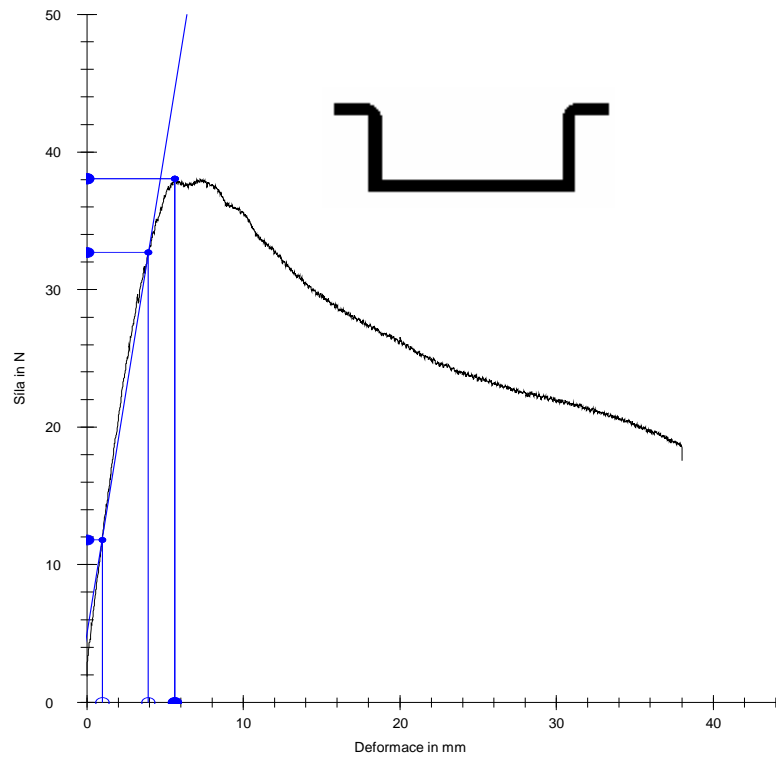
Graf č.7 – Graf pro 7.sérii

Graf č.7 odpovídá hodnotám z tabulky č.25 a to naměřeným hodnotám pro 7.sérii pro měření č.4. Hodnoty jsou zvýrazněny *tučně*.

#### Naměřené hodnoty 8.série u-profilu otočeného dnem dolů

8.série	E	Fmax	F <sub>1</sub> při y <sub>1</sub>	F <sub>2</sub> při y <sub>2</sub>	y při (Fmax)
měření č.	[Mpa]	[N]	[N]	[N]	[mm]
1	545383,32	41,4	13,12	38,05	4,95
2	<b>456591,59</b>	<b>38,05</b>	<b>11,81</b>	<b>32,68</b>	<b>5,61</b>
3	410864,94	33,8	13,2	31,98	4,98
4	463638,21	34,93	12,94	34,13	3,73
5	393051,71	32,22	13,68	31,65	4,32
ap	<b>453905,95</b>	<b>36,08</b>	<b>12,95</b>	<b>33,70</b>	<b>4,72</b>
u	<b>52963,77</b>	<b>3,27</b>	<b>0,62</b>	<b>2,34</b>	<b>0,64</b>

Tab.26 Naměřené hodnoty 8.série

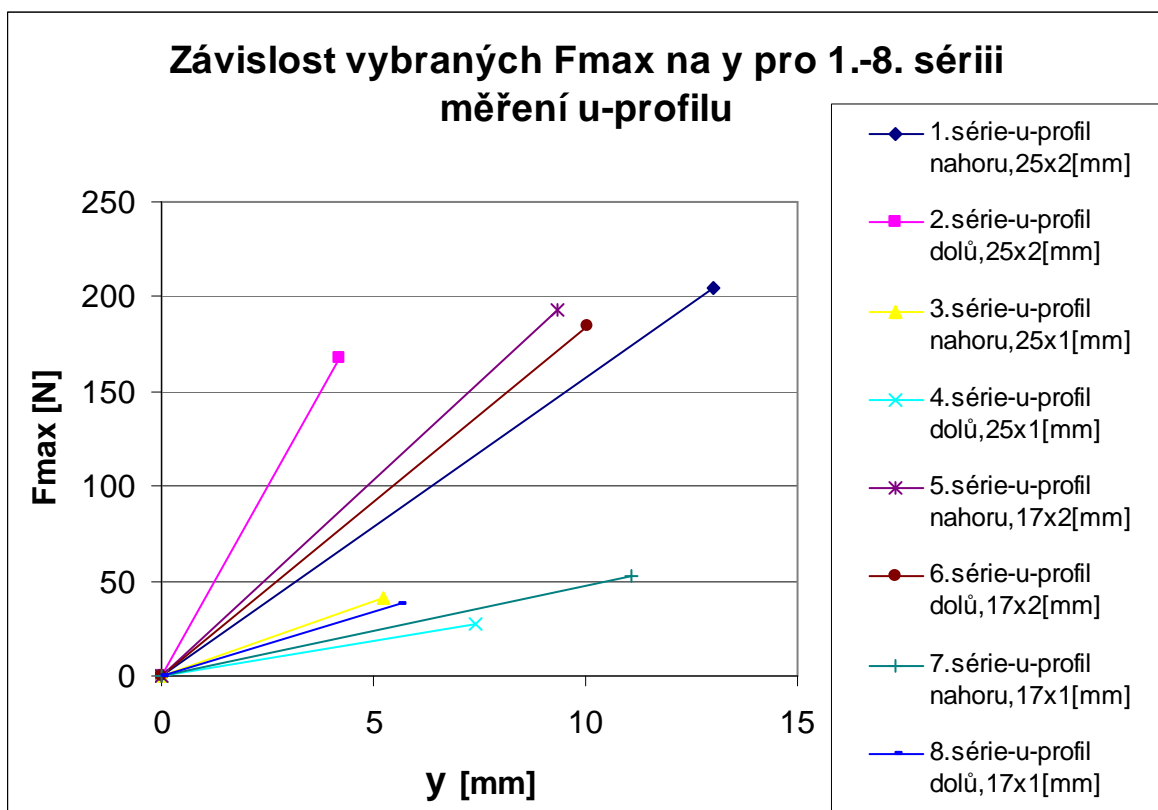


Graf č.8 - Graf pro 8.sérii

Graf č.8 odpovídá hodnotám z tabulky č.26 a to naměřeným hodnotám pro 8.sérii pro měření č.2. Hodnoty jsou zvýrazněny *tučně*.

### 6.5.5 Grafické znázornění $F_{max}$ (maximální síly) na $y$ (průhybu) pro vybrané naměřené hodnoty při ohybu u-profilů 1.-8.série

u-profil	$F_{max}$ [N]	$y$ [mm]	směr zatěžování
1.série	204,51	13,02	nahoru
2.série	167,8	4,2	dolů
3.série	41,64	5,24	nahoru
4.série	27,08	7,41	dolů
5.série	193,18	9,33	nahoru
6.série	184,23	10,03	dolů
7.série	53,16	11,07	nahoru
8.série	38,05	5,61	dolů

Tab.27  $F_{max}$  na  $y$ Graf č.9 Závislost  $F_{max}$  na  $y$

Z grafu č.9 je zřejmé, že profily orientované dnem nahoru (1.,3.,5.,7 série) vydržely větší ohybové zatížení, než profily orientované dnem dolů.(2.,4.,6.,7 série).



Obr.č 39 Zdeformovaný u-profil výšky 25 mm a tloušťky 1 mm po ohybové zkoušce

#### Naměřené moduly pružnosti strojem ZWICK pro jednotlivé série

u-profil	Profil č.1		Profil č.2		Profil č.3		Profil č.4	
	1	2	3	4	5	6	7	8
E [Mpa]	127683,7	56810	340892	192580	168146	187357	185446	456592

Tab.28 Porovnání naměřených modulů pružnosti pro jednotlivé série

Podle tabulky č.28 vyplývá zajímavá skutečnost a to, že u profilů s nižší charakteristickou výškou  $h$  (tj. profil č.3 a 4) byly naměřeny moduly pružnosti  $E$  o vyšší hodnotě u série orientované dnem dolů (tj. 6.a 8 série), ale u profilů s vyšší charakteristickou výškou  $h$  (tj.profil č.1 a 2), byly naopak vyšší u série orientované dnem nahoru (tj.1.a 2.série).



### 6.6 Ohybová zkouška u-profilů s nevyztuženými okraji

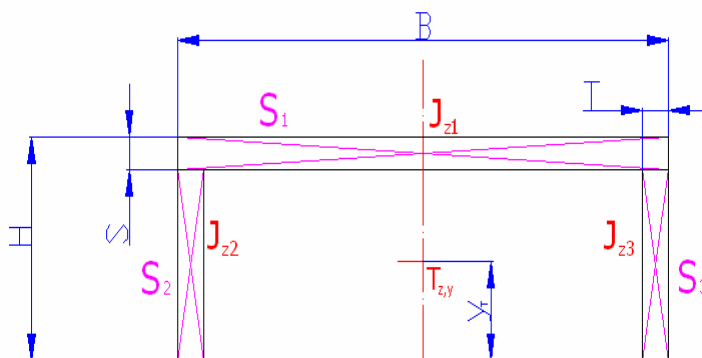
Uvedená ohybová zkouška byla provedena za shodných podmínek jako u profilů s vyztuženými okraji (viz.kap.6.5). Výsledky získané pro profily s nevyztuženými okraji byly převzaty od studenta Romana Michny kombinovaného studia v podobě základních dat, které jsem dále zpracoval a vyhodnotil. Z uvedeného důvodu jsou uvedena měření pouze pro jeden profil o charakteristických rozměrech podle tab.č.29. Profil byl opět zatěžován orientovaný dnem nahoru a dnem dolů.

Charakteristické rozměry		Označení profilu	Orientace profilu	Číslo série profilu
Výška šab. (mm)	Tloušťka mat. (mm)			
25	2	č.I	dnem nahoru	I.
			dnem dolů	II.

Tab.29 Přehled měření a orientace profilů

### 6.6.1 Měření I.a II.série pro profil bez vyztužených okrajů

Profil byl vytvarován z desky tloušťky 2 mm do výšky ( $h = 22,35 \pm 0,01$  mm). V tabulce č.30 jsou uvedeny rozměry tohoto profilu dle (obr.40).



Obr.40 Profil bez vyztužení

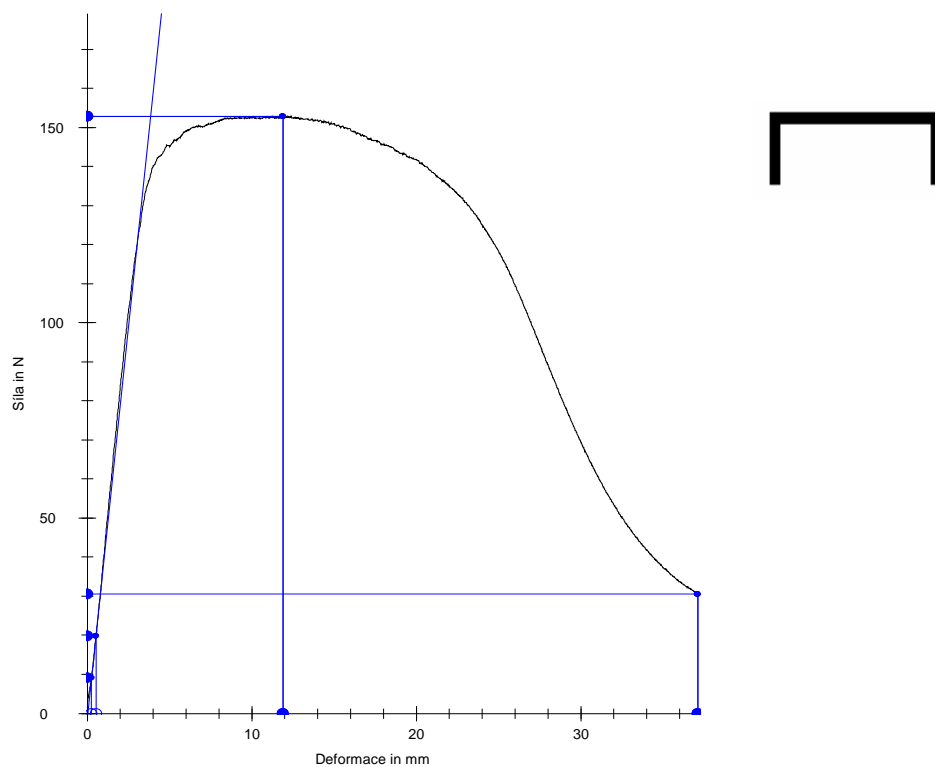
Profil č.I Vysoký - 230x25x2 mm				
	<b>h</b>	<b>b</b>	<b>s</b>	<b>t</b>
měření č.	[ mm ]	[ mm ]	[ mm ]	[ mm ]
1.	22,35	49,45	1,74	1,55
2.	22,37	49,36	1,78	1,54
3.	22,36	49,33	1,79	1,55
4.	22,35	49,37	1,75	1,55
5.	22,36	49,20	1,76	1,55
6.	22,35	49,40	1,78	1,55
7.	22,35	49,21	1,78	1,53
8.	22,35	49,10	1,76	1,55
9.	22,35	49,38	1,74	1,55
10.	22,35	49,35	1,77	1,55
ap	<b>22,35</b>	<b>49,32</b>	<b>1,77</b>	<b>1,55</b>
μ	<b>0,01</b>	<b>0,10</b>	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>

Tab.30 Rozměry profilu bez vyztužení

## Naměřené hodnoty profilu I.série při ohybu se dnem nahoru

I.série	E	Fmax	F <sub>1</sub> při y <sub>1</sub>	F <sub>2</sub> při y <sub>2</sub>	y při (Fmax)
měření č.	[Mpa]	[N]	[N]	[N]	[mm]
<b>1</b>	<b>128795,8</b>	<b>152,87</b>	<b>54,88</b>	<b>150,28</b>	<b>11,92</b>
2	159470,6	180,4	60,83	178,96	9,06
3	91963,7	167,85	62,21	167,63	7,69
4	87362,41	164,25	61,83	163,8	8,45
5	110914,9	168,02	43,06	166,72	9,06
<b>ap</b>	<b>115701,47</b>	<b>166,68</b>	<b>56,56</b>	<b>165,48</b>	<b>9,24</b>
<b>u</b>	<b>26369,26</b>	<b>8,81</b>	<b>7,25</b>	<b>9,18</b>	<b>1,43</b>

Tab.31 Naměřené hodnoty I.série bez vyztužení



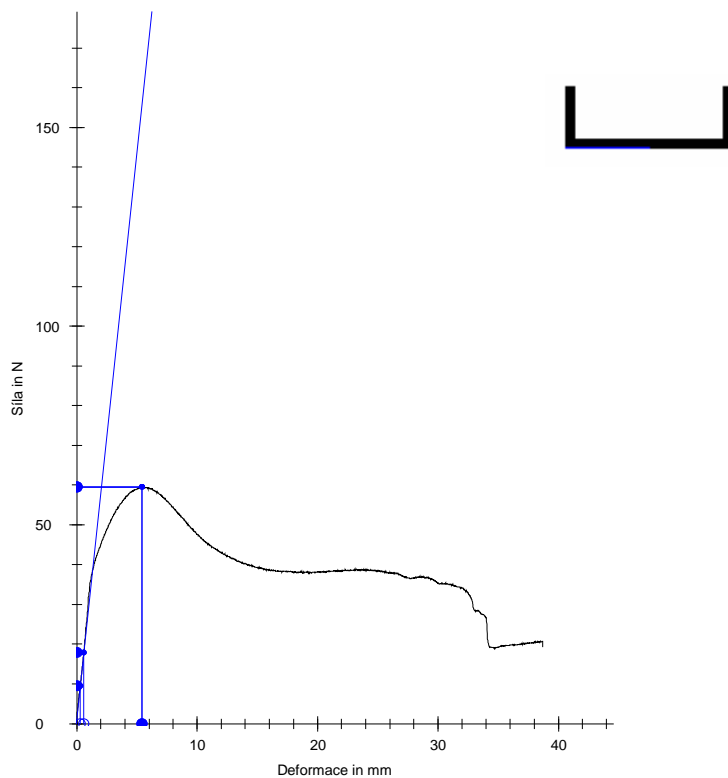
Graf č.10 Graf pro II.sérii

Graf č.10 odpovídá hodnotám z tabulky č.31 a to naměřeným hodnotám pro I.sérii pro měření č.1. Hodnoty jsou zvýrazněny *tučně*.

## Naměřené hodnoty profilu II.série při ohybu se dnem dolů

II.série	E	Fmax	F <sub>1</sub> při y <sub>1</sub>	F <sub>2</sub> při y <sub>2</sub>	y při (Fmax)
měření č.	[Mpa]	[N]	[N]	[N]	[mm]
<b>1</b>	<b>13261,1</b>	<b>59,48</b>	<b>40,27</b>	<b>56,58</b>	<b>5,44</b>
2	14117,65	57,22	38,58	55,78	6,14
3	9642,2	56,91	39,98	51,46	4,86
4	11296,63	60,65	43,16	57,38	5,53
5	15577,97	63,05	41,97	60,94	5,96
<b>ap</b>	<b>12779,11</b>	<b>59,46</b>	<b>40,79</b>	<b>56,43</b>	<b>5,59</b>
<b>u</b>	<b>2092,63</b>	<b>2,27</b>	<b>1,60</b>	<b>3,05</b>	<b>0,45</b>

Tab.32 Naměřené hodnoty II.série bez vyztužení



Graf č.11 Graf pro II.sérii

Graf č.11 odpovídá hodnotám z tabulky č.32 a to naměřeným hodnotám pro II.sérii pro měření č.1. Hodnoty jsou zvýrazněny *tučně*.

## 6.7 Srovnání výsledků a jejich diskuze

### 6.7.1 Výpočet ohybové tuhosti

Následující tabulka nám porovnává velikost ohybové tuhosti mezi u-profilem vyztuženým a mezi u-profilem bez vyztužení. Jsou zde také uvedeny rozměry profilů a naměřené hodnoty na stroji ZWICK tj. ( $F_{max}$  a  $y$  při  $F_{max}$ ) a hodnota  $E.J$  daná vztahem:

$$E.J = \frac{F.L^3}{y.48}$$

#### 1.U-profile se dnem nahoru

		h	t	L	F <sub>max</sub>	y při F <sub>max</sub>	E.Jz
u-profil	dnem nahoře	[mm]	[mm]	[mm]	[N]	[mm]	[N.mm <sup>2</sup> ]
I.série	Bez vyztužení	22,35	2	<b>180</b>	<b>152,87</b>	<b>11,92</b>	<b>1558196,73</b>
1.série	S vyztužením	25	2	<b>180</b>	<b>204,51</b>	<b>13,02</b>	<b>1908445,85</b>

Tab.33 Ohybová tuhost pro vyztužený profil a profil bez vyztužení

#### 2.U-profile se dnem dolů

		h	t	L	F <sub>max</sub>	y při F <sub>max</sub>	E.Jz
u-profil	dnem dole	[mm]	[mm]	[mm]	[N]	[mm]	[N.mm <sup>2</sup> ]
II.série	Bez vyztužení	22,35	2	<b>180</b>	<b>59,48</b>	<b>5,44</b>	<b>1328459,56</b>
2.série	S vyztužením	25	2	<b>180</b>	<b>167,8</b>	<b>4,2</b>	<b>4854214,29</b>

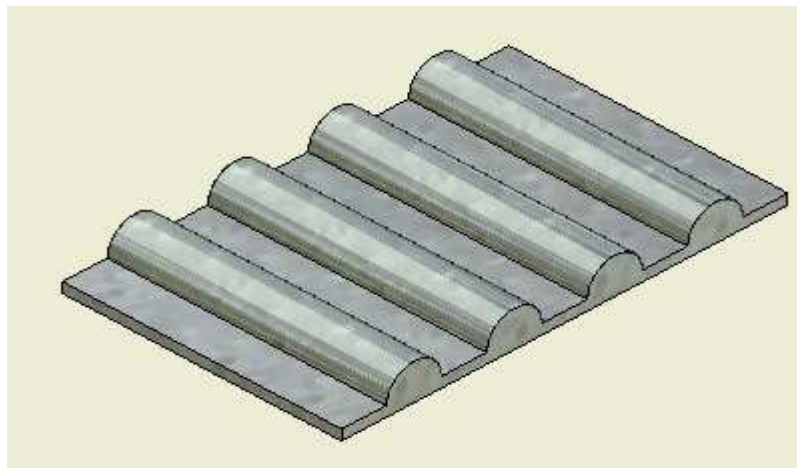
Tab.34 Ohybová tuhost pro vyztužený profil a profil bez vyztužení

Z uvedených výpočtů vyplývá, že vyztužené profily mají větší ohybovou tuhost než profily bez vyztužení.

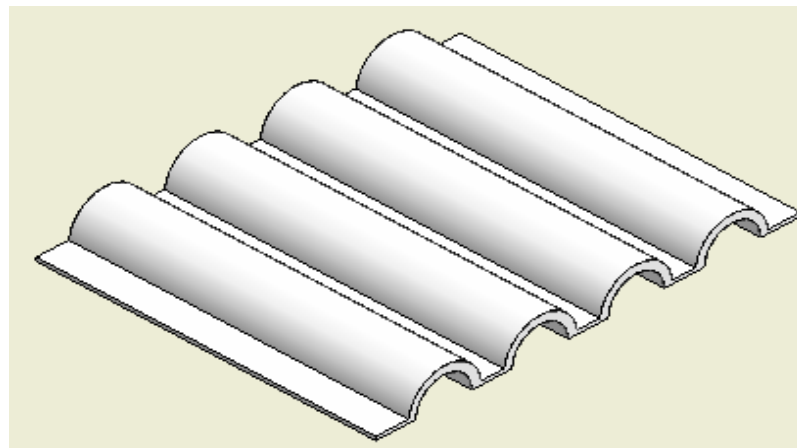
## 7 TENKOSTĚNNÉ PLASTOVÉ PROFILY TVARU PŮLKRUHU

### 7.1 Vytvoření půlkruhového profilu

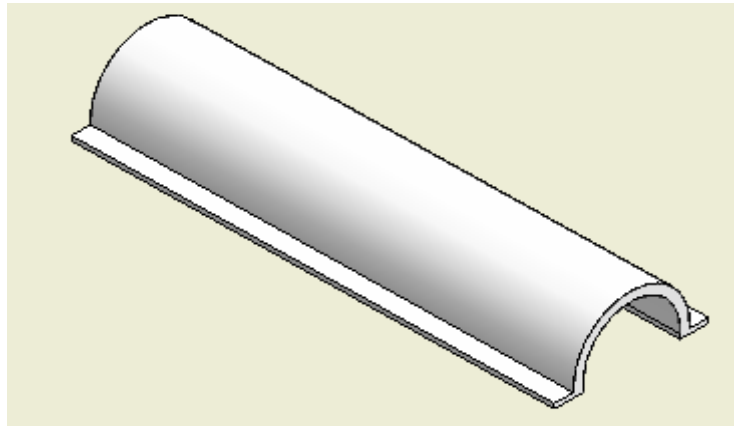
Pro vytvoření půlkruhových profilů jsem postupoval úplně stejným způsobem jako při vytváření u-profilů, avšak dřevěné vícenásobné šablony měli samozřejmě tvar půlkruhu.(viz.obr.41).



Obr.41 Dřevěná šablona pro půlkruhový profil



Obr.42 Půlkruhový profil vytvořený na šabloně



Obr.43 Půlkruhový profil po nařezání na kusy

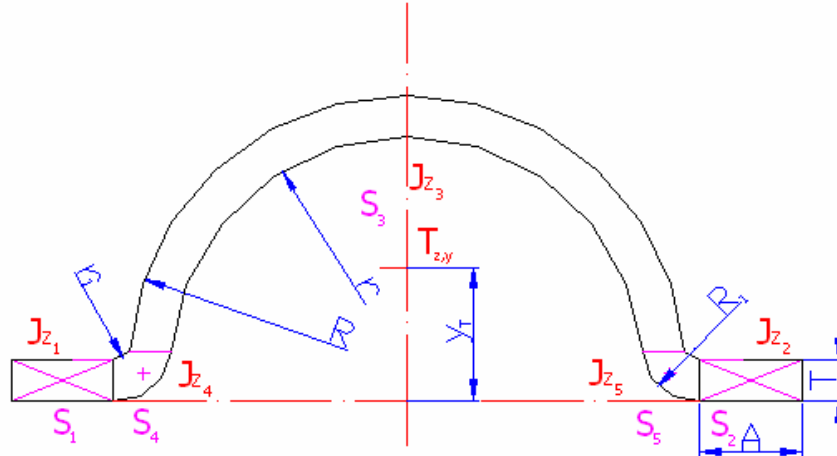
## 7.2 Výpočet ohybové tuhosti

Vzhledem k tomu, že pro půlkruhový profil jsem zvolil shodný způsob třibodové ohybové zkoušky jako u u-profilů, platí zde i shodný způsob zatěžování a jemu odpovídající vztahy.

(viz.kap.6.4).

### 7.3 Posouzení kvadratických momentů reálného půlkruhového profilu a idealizovaného půlkruhového profilu na základě vzorového výpočtu

#### 7.3.1 Reálný půlkruhový profil a jeho rozměry



Obr 44.Reálný půlkruhový profil

Rozměry půlkruhového profilu č.1					
T	A	r	R	r <sub>1</sub>	R <sub>1</sub>
[ mm ]	[ mm ]	[ mm ]	[ mm ]	[ mm ]	[ mm ]
0,90	14,04	26,05	27,03	0,65	1,05

Tab.35 Rozměry reálného profilu

#### Výpočet těžiště v ose y:

- obsahy jednotlivých ploch profilu:

$$S_1 = S_2 = A \cdot T = 14,04 \cdot 0,90 = 12,60 \text{ mm}^2$$

$$S_3 = \frac{\pi \cdot (R^2 - r^2)}{2} = \frac{\pi \cdot (27,03^2 - 26,05^2)}{2} = 81,87 \text{ mm}^2$$

$$S_4 = S_5 = \frac{\pi \cdot (R_1^2 - r_1^2)}{4} = \frac{\pi \cdot (1,05^2 - 0,65^2)}{4} = 0,53 \text{ mm}^2$$

$$S_{CELK} = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_5 = 2 \cdot 12,60 + 81,87 + 2 \cdot 0,53 = 108,15 \text{ mm}^2$$

-souřadnice y těžiště jednotlivých ploch profilu:

$$y_1 = y_2 = \frac{T}{2} = \frac{0,90}{2} = 0,44 \text{ mm}$$



$$y_3 = t + \left( \frac{4}{3\pi} \cdot \frac{R^3 - r^3}{R^2 - r^2} \right) = 0,90 + \left( \frac{4}{3\pi} \cdot \frac{27,03^3 - 26,05^3}{27,03^2 - 26,05^2} \right) = 17,79 \text{ mm}$$

$$y_4 = y_5 = R_1 - \left( \frac{4}{3\pi} \cdot \frac{R_1^3 - r_1^3}{R_1^2 - r_1^2} \right) = 1,05 - \left( \frac{4}{3\pi} \cdot \frac{1,05^3 - 0,65^3}{1,05^2 - 0,65^2} \right) = 0,49 \text{ mm}$$

$$y_T = \frac{S_1 \cdot y_1 + S_2 \cdot y_2 + S_3 \cdot y_3 + S_4 \cdot y_4 + S_5 \cdot y_5}{S_{CELK}} = 13,58 \text{ mm}$$

**Výpočet kvadratických momentů jednotlivých ploch profilu k jejich těžištím:**

$$J_{z_1} = J_{z_2} = \frac{A \cdot T^3}{12} = \frac{14,04 \cdot 0,90^3}{12} = 0,8 \text{ mm}^4$$

$$J_{z_3} = \frac{\pi \cdot (R^4 - r^4)}{8} - \frac{\pi \cdot (R^2 - r^2)}{2} \cdot \left[ \left( \frac{4}{3\pi} \cdot \frac{R^3 - r^3}{R^2 - r^2} \right) \right]^2 = 28839,3 - \frac{\pi \cdot (27,03^2 - 26,05^2)}{2}$$

$$\cdot \left[ \left( \frac{4}{3\pi} \cdot \frac{27,03^3 - 26,05^3}{27,03^2 - 26,05^2} \right) \right]^2 = 2470,4 \text{ mm}^4$$

$$J_{z_4} = J_{z_5} = \frac{\pi \cdot (R_1^4 - r_1^4)}{16} - \frac{\pi \cdot (R_1^2 - r_1^2)}{4} \cdot \left[ \left( \frac{4}{3\pi} \cdot \frac{R_1^3 - r_1^3}{R_1^2 - r_1^2} \right) \right]^2 = 0,2 - \frac{\pi \cdot (1,10^2 - 0,65^2)}{4}$$

$$\cdot \left[ \left( \frac{4}{3\pi} \cdot \frac{1,10^3 - 0,65^3}{1,10^2 - 0,65^2} \right) \right]^2 = 0,07 \text{ mm}^4$$

**Výpočet dílčích kvadratických momentů k těžišti profilu: Steinerova věta**

$$J_{z_1}' = J_{z_2}' = J_{z_1} + A \cdot T \cdot \left[ y_T - \frac{T}{2} \right]^2 = 0,8 + (14,04 \cdot 0,90) \cdot \left[ 13,58 - \frac{0,90}{2} \right]^2 = 2174,5 \text{ mm}^4$$

$$J_{z_3}' = J_{z_3} + \frac{\pi \cdot (R^2 - r^2)}{2} \cdot \left[ R_1 + \left( \frac{4}{3\pi} \cdot \frac{R^3 - r^3}{R^2 - r^2} \right) - y_T \right]^2 = 2470,4 + \frac{\pi \cdot (27,03^2 - 26,05^2)}{2}$$

$$\cdot \left[ 1,10 + \left( \frac{4}{3\pi} \cdot \frac{28,03^3 - 26,05^3}{28,03^2 - 26,05^2} \right) - 13,58 \right]^2 = 4031,4 \text{ mm}^4$$

$$J_{z_4}' = J_{z_5}' = J_{z_4} + \frac{\pi \cdot (R_1^2 - r_1^2)}{4} \cdot \left[ y_T - R_1 + \left( \frac{4}{3\pi} \cdot \frac{R^3 - r^3}{R^2 - r^2} \right) \right]^2 = 0,07 + \frac{\pi(1,10^2 - 0,65^2)}{4}$$

$$\left[ 13,58 - 1,10 + \left( \frac{4}{3\pi} \cdot \frac{1,10^3 - 0,65^3}{1,10^2 - 0,65^2} \right) \right]^2 = 91,5 \text{ mm}^4$$

**Velikost celkového kvadratického momentu reálného půlkruhového profilu:**

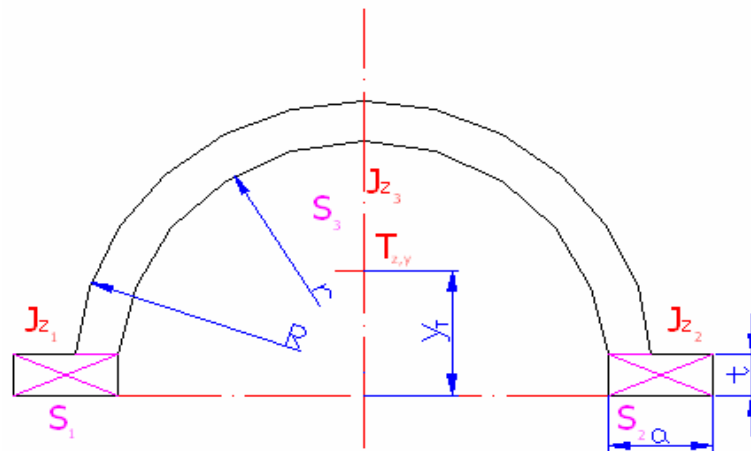
$$J_{z_{CELK}} = J_{z_1}' + J_{z_2}' + J_{z_3}' + J_{z_4}' + J_{z_5}' = 2.2174,5 + 4031,4 + 2.91,5 = 8563,2 \text{ mm}^4$$

**Vyhodnocení vypočtených hodnot reálného půlkruhového profilu**

reálný půlkruh.profil	Vyhodnocení vypočtených hodnot					CELK
	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>5</sub>	Scelk
[mm <sup>2</sup> ]	12,61	12,61	81,87	0,53	0,53	108,15
	y <sub>1</sub>	y <sub>2</sub>	y <sub>3</sub>	y <sub>4</sub>	y <sub>5</sub>	y <sub>T</sub>
[mm]	0,44	0,44	17,79	0,49	0,49	13,58
	Jz <sub>1</sub>	Jz <sub>2</sub>	Jz <sub>3</sub>	Jz <sub>4</sub>	Jz <sub>5</sub>	
[mm <sup>4</sup> ]	0,8	0,8	2470,4	0,07	0,07	
	Jz <sub>1</sub> '	Jz <sub>2</sub> '	Jz <sub>3</sub> '	Jz <sub>4</sub> '	Jz <sub>5</sub> '	Jzcelk
[mm <sup>4</sup> ]	2174,5	2174,5	4031,4	91,5	91,5	8563,2

Tab.36 Vypočtené hodnoty reálného profilu č.1

## 7.3.2 Idealizovaný půlkruhový profil a jeho rozměry



Obr 45. Idealizovaný půlkruhový profil

Rozměry půlkruhového profilu č.1			
t	a	r	R
[ mm ]	[ mm ]	[ mm ]	[ mm ]
0,90	14,69	26,05	27,03

Tab.37 Rozměry idealizovaného profilu

## Výpočet těžiště v ose y:

- obsahy jednotlivých ploch profilu:

$$S_1 = S_2 = a \cdot t = 14,69 \cdot 0,90 = 13,19 \text{ mm}^2$$

$$S_3 = \frac{\pi \cdot (R^2 - r^2)}{2} = \frac{\pi \cdot (27,03^2 - 26,05^2)}{2} = 81,87 \text{ mm}^2$$

$$S_{CELK} = S_1 + S_2 + S_3 = 2 \cdot 13,19 + 81,87 = 108,25 \text{ mm}^2$$

- souřadnice y těžiště jednotlivých ploch profilu:

$$y_1 = y_2 = \frac{t}{2} = \frac{0,90}{2} = 0,44 \text{ mm}$$

$$y_3 = t + \left( \frac{4}{3\pi} \cdot \frac{R^3 - r^3}{R^2 - r^2} \right) = 0,90 + \left( \frac{4}{3\pi} \cdot \frac{27,03^3 - 26,05^3}{27,03^2 - 26,05^2} \right) = 17,79 \text{ mm}$$

$$y_T = \frac{S_1 \cdot y_1 + S_2 \cdot y_2 + S_3 \cdot y_3}{S_{CELK}} = 13,57 \text{ mm}$$

**Výpočet kvadratických momentů jednotlivých ploch profilu k jejich těžištím:**

$$J_{z_1} = J_{z_2} = \frac{a \cdot t^3}{12} = \frac{(14,69) \cdot 0,90^3}{12} = 0,9 \text{ mm}^4$$

$$J_{z_3} = \frac{\pi \cdot (R^4 - r^4)}{8} - \frac{\pi \cdot (R^2 - r^2)}{2} \cdot \left[ \left( \frac{4}{3\pi} \cdot \frac{R^3 - r^3}{R^2 - r^2} \right) \right]^2 = 28839,3 - \frac{\pi \cdot (27,03^2 - 26,05^2)}{2}$$

$$\cdot \left[ \left( \frac{4}{3\pi} \cdot \frac{27,03^3 - 26,05^3}{27,03^2 - 26,05^2} \right) \right]^2 = 2915,2$$

**Výpočet dílčích kvadratických momentů k těžišti profilu: Steinerova věta**

$$J_{z_1}' = J_{z_2}' = J_{z_1} + a \cdot t \cdot \left[ y_T - \frac{t}{2} \right]^2 = 0,9 + 14,69 \cdot 0,90 \cdot \left[ 13,57 - \frac{0,90}{2} \right]^2 =$$

$$= 2270,8 \text{ mm}^4$$

$$J_{z_3}' = J_{z_3} + \frac{\pi \cdot (R^2 - r^2)}{2} \cdot \left[ t + \left( \frac{4}{3\pi} \cdot \frac{R^3 - r^3}{R^2 - r^2} \right) - y_T \right]^2 = 2915,2 + \frac{\pi \cdot (27,03^2 - 26,05^2)}{2}$$

$$\cdot \left[ 0,90 + \left( \frac{4}{3\pi} \cdot \frac{27,03^3 - 26,05^3}{27,03^2 - 26,05^2} \right) - 13,57 \right]^2 = 4378 \text{ mm}^4$$

**Velikost celkového kvadratického momentu idealizovaného půlkruhového profilu:**

$$J_{z_{CELK}} = J_{z_1}' + J_{z_2}' + J_{z_3}' = 2 \cdot 2270,8 + 4378 = 8919,7 \text{ mm}^4$$

## Vyhodnocení vypočtených hodnot idealizovaného půlkruhového profilu

ideální půlkruh profil	Vyhodnocení vypočtených hodnot			CELK
	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_{celk}$
[mm <sup>2</sup> ]	13,19	13,19	81,87	108,25
	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_T$
[mm]	0,44	0,44	17,79	13,57
	$Jz_1$	$Jz_2$	$Jz_3$	
[mm <sup>4</sup> ]	0,9	0,9	2915,2	
	$Jz_1'$	$Jz_2'$	$Jz_3'$	$Jz_{celk}$
[mm <sup>4</sup> ]	2270,8	2270,8	4378	8919,7

Tab.38 Vypočtené hodnoty idealizovaného profilu č.1

## Rozdíl kvadratických momentů k těžišti půlkruhového profilu pro idealizovaný a reálný profil:

Rozdíl kvadratických momentů k těžišti v % obou profilů			
půl.profil č.1	Jz celk	%	Rozdíl v%
reálný profil	8563,2	100%	4,00%
idealizovaný profil	8919,7	x%	

Tab.39 Rozdíl kvadratických momentů

## Rozdíl těžišť obou profilů

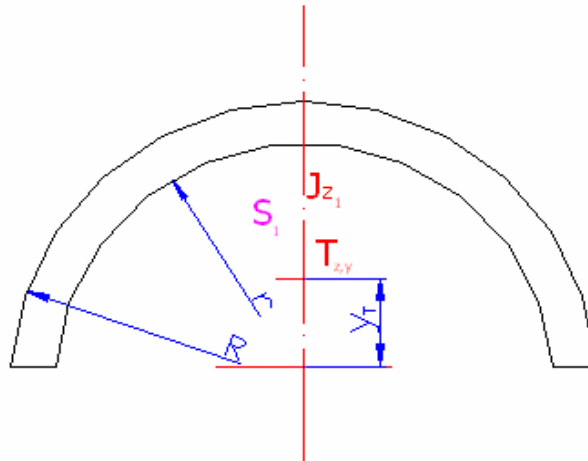
Rozdíl těžišť	
půl.profil č.1	$y_T$ [mm]
reálný profil	13,58
idealizovaný profil	13,57

Tab.40 Rozdíl těžišť

Z uvedených výpočtů vyplývá, že rozdíl mezi idealizovaným a reálným profilem je do 5 %. V našem případě (4,00%). Obdobně je tomu u ostatních profilů.

## 7.4 Posouzení velikosti vypočtených kvadratických momentů reálného profilu bez vyztužení a s vyztužením okrajů

### 1. Půlkruhový profil bez vyztužených okrajů



Obr.46 Půlkruhový profil bez vyztužení

Rozměry půlk.profilů		
	r	R
půlk.profil č.	[ mm ]	[ mm ]
1	26,05	27,03
2	26,06	27,42

Tab.41 Rozměry půlkruhových profilů bez vyztužení

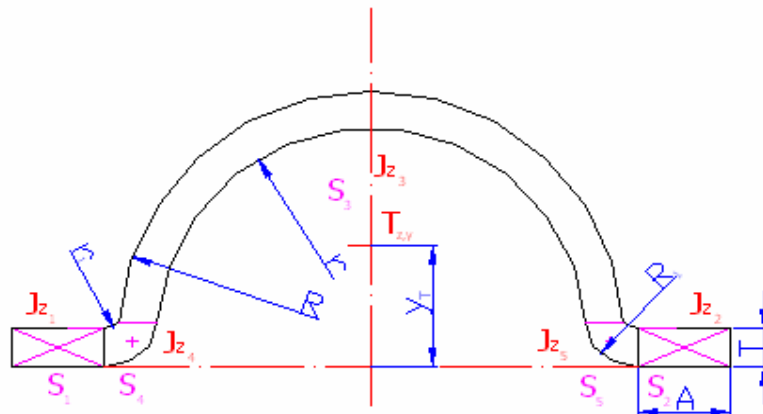
půlk.profil č.	Jz
1	28839,3
2	40663,4

Tab.42 Velikost kvadratických momentů

půlk.profil č.	y <sub>T</sub>
1	16,9
2	17,03

Tab.43 Velikost těžiště

2. Půlkruhový profil s vyztuženými okraji



Obr.47 Vyztužený půlkruhový profil

Rozměry půlkruhových profilů						
	t	a	r	R	r <sub>1</sub>	R <sub>1</sub>
půlkruh.prof	[ mm ]	[ mm ]	[ mm ]	[ mm ]	[ mm ]	[ mm ]
<b>č.1</b>	0,90	14,04	26,05	27,03	0,65	1,05
<b>č.2</b>	1,91	14,02	26,06	27,42	1,80	2,50

Tab.44 Rozměry půlkruhových profilů s vyztužením

půlk.profil č	y <sub>T</sub>
1	13,58
2	12,85

Tab.45 Velikost těžiště

půlk.profil č	J <sub>z</sub>
1	8563,2
2	21022,6

Tab.46 Velikost kvadratických momentů

**Rozdíl kvadratických momentů mezi vyztuženými a nevyztuženými půlkruhovými profily**

	bez vyztužení	s vyztužením	Rozdíl v %
půlk.profil č	<b>Jz</b>	<b>Jz</b>	<b>%</b>
1	5465,7	8563,2	36,18
2	7709,9	21022,6	63,33

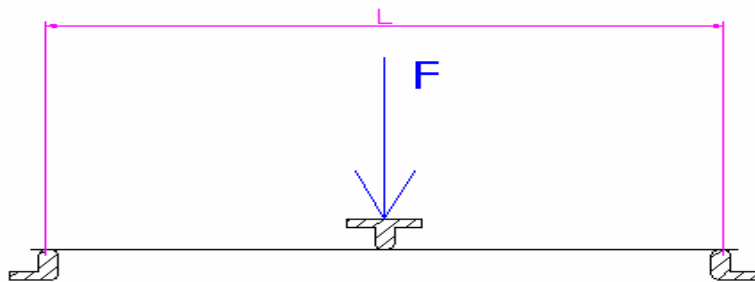
Tab.47 Rozdíl mezi kvadratickými momenty půlkruhových profilů

Z uvedených výpočtů je zřejmé, že rozdíl mezi kvadratickými momenty vyztuženého profilu a profilu bez vyztužení se pohybuje v rozmezí cca 37-64%.



### 7.5 Ohybová zkouška na stroji ZWICK

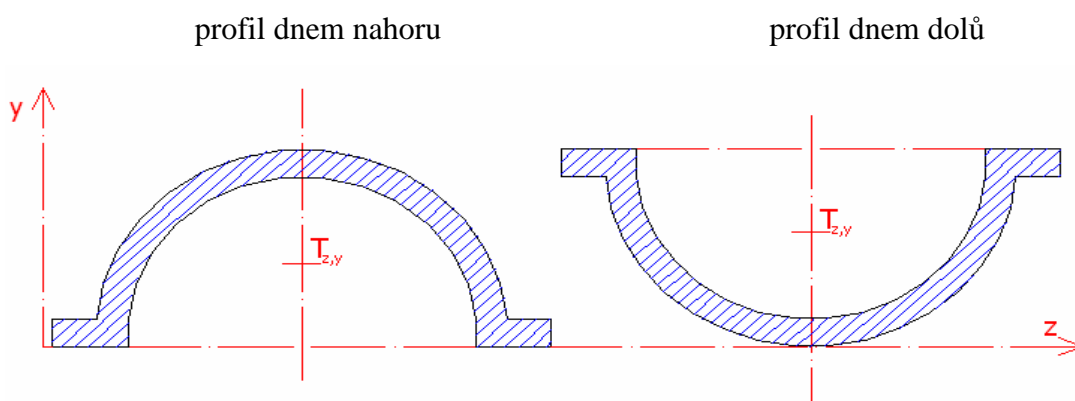
Praktickou ohybovou zkoušku jsem prováděl na trhacím stroji ZWICK 1456. Šlo opět o tříbodovou zkoušku ohybem, kdy jsem profil umístil na podpěry o stejné vzdálenosti jako u u-profilu  $L = 180$  mm. Jednotlivé profily jsem zatěžoval oboustranně. Potřebné hodnoty nám vygeneroval program TestExpert, který je příslušenstvím tohoto trhacího stroje. Pro experimentální provedení byly zvoleny 2 základní půlkruhové profily dané charakteristickými rozměry dřevěných šablon a to o poloměru 26 mm, který byly vyrobeny z desek o charakteristické tloušťce  $t = 1$  mm a  $t = 2$  mm.



Obr.48 Schéma 3-bodové ohybové zkoušky

#### Schéma zatěžování profilů

Jednotlivé profily jsem opět zatěžovat jako otočené dnem nahoru a otočené dnem dolů podle (obr.49).



Obr.49 Schéma otočení profilů

Následující tabulka uvádí přehled, jak byly zatěžované profily označeny a seřazeny do sérií.

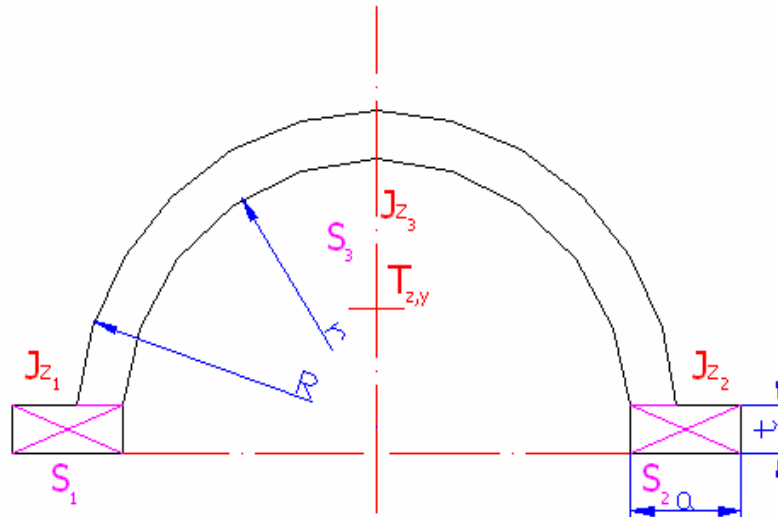
Každá série měření byla provedena vždy na pěti vzorcích.

Charakteristické rozměry		Označení	Orientace	Číslo série
Výška šab. (mm)	Tloušťka mat.(mm)	profilu	profilu	profilu
26	2	č.1	dnem nahoru	1.
			dnem dolů	2.
26	1	č.2	dnem nahoru	3.
			dnem dolů	4.

Tab.48 Přehled měření a orientace profilů

### 7.5.1 Měření 1. a 2. série půlkruhového profilu otočeného nahoru a dolů

Půlkruhový profil byl vytvarován z desky tloušťky 1 mm o velkém poloměru ( $R = 27,02 \pm 0,05$  mm). V tabulce č.49 jsou uvedeny rozměry daného profilu dle (obr.50).



Obr.50 Půlkruhový profil

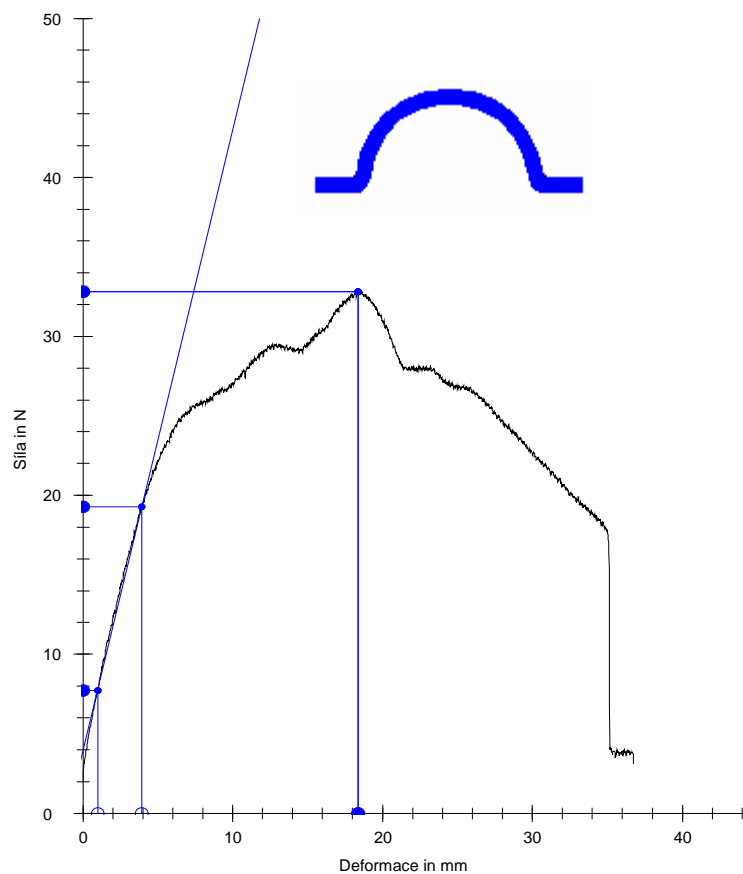
Rozměry profilu č.1				
Profil č.1	t	a	r	R
Měření č.	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1	1	14,75	26,02	27
2	0,99	14,65	26	27,03
3	1	14,65	26,1	27
4	1	14,65	26,12	27,01
5	1	14,77	26,12	27
6	0,98	14,78	26,06	27,04
7	0,98	14,65	26	27,04
8	1	14,65	26	27
9	1	14,7	26,05	27,03
10	1,02	14,65	26,05	27,2
<b>ap</b>	<b>0,898</b>	<b>14,69</b>	<b>26,052</b>	<b>27,035</b>
<b>μ</b>	0,011331	0,052726	0,045563	0,057315

Tab. 49 Rozměry půlkruhového profilu č.1

## Naměřené hodnoty 1.série půlkruhového profilu otočeného nahoru

1.série	E	Fmax	F <sub>1</sub> při y <sub>1</sub>	F <sub>2</sub> při y <sub>2</sub>	y při (Fmax)
měření č.	[Mpa]	[N]	[N]	[N]	[mm]
1	153921,3	28,52	6	17,18	10,29
2	148677,4	26,43	5,94	16,73	11,13
3	146464,8	27,28	5,51	16,14	16,56
4	<b>158871,3</b>	<b>32,8</b>	<b>7,73</b>	<b>19,26</b>	<b>18,36</b>
5	151137,6	31,74	7,41	18,38	18,21
ap	<b>151814,46</b>	<b>29,35</b>	<b>6,52</b>	<b>17,54</b>	<b>14,91</b>
u	<b>4316,38</b>	<b>2,49</b>	<b>0,88</b>	<b>1,13</b>	<b>3,50</b>

Tab.50 Naměřené hodnoty 1.série



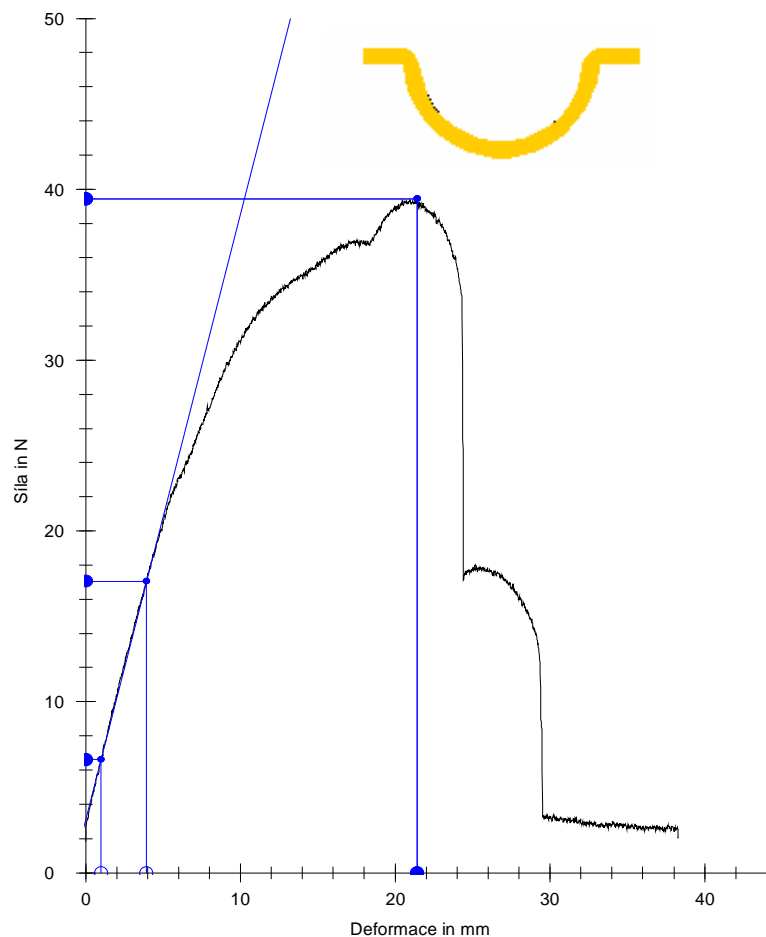
Graf č.11 Graf pro 1.sérii

Graf č.11 odpovídá hodnotám z tabulky č.50 a to naměřeným hodnotám pro 1.sérii pro měření č.4. Hodnoty jsou zvýrazněny *tučně*.

## Naměřené hodnoty 2.série půlkruhového profilu otočeného dolů

2.série	E	Fmax	F <sub>1</sub> při y <sub>1</sub>	F <sub>2</sub> při y <sub>2</sub>	y při (Fmax)
měření č.	[Mpa]	[N]	[N]	[N]	[mm]
1	163463,3	37,77	7,68	19,55	19,2
2	168357,8	36,54	7,94	20,16	14,33
3	173074,7	38,59	8,11	20,68	16,78
4	159582	36,64	7	18,58	19,83
5	<b>143645,4</b>	<b>39,45</b>	<b>6,63</b>	<b>17,06</b>	<b>21,42</b>
ap	<b>161624,65</b>	<b>37,80</b>	<b>7,47</b>	<b>19,21</b>	<b>18,31</b>
u	<b>10072,20</b>	<b>1,12</b>	<b>0,57</b>	<b>1,28</b>	<b>2,49</b>

Tab.51 Naměřené hodnoty 2.série



Graf č.12 – Graf pro 2.sérii

Graf č.12 odpovídá hodnotám z tabulky č.51 a to naměřeným hodnotám pro 2.sérii pro měření č.5. Hodnoty jsou zvýrazněny *tučně*.

### 7.5.2 Měření 3. a 4. série půlkruhového profilu otočeného nahoru a dolů

Půlkruhový profil byl vytvarován z desky tloušťky 2 mm o velkém poloměru ( $R = 27,47 \pm 0,03$  mm). V tabulce č.52 jsou uvedeny rozměry daného profilu dle (obr.50).

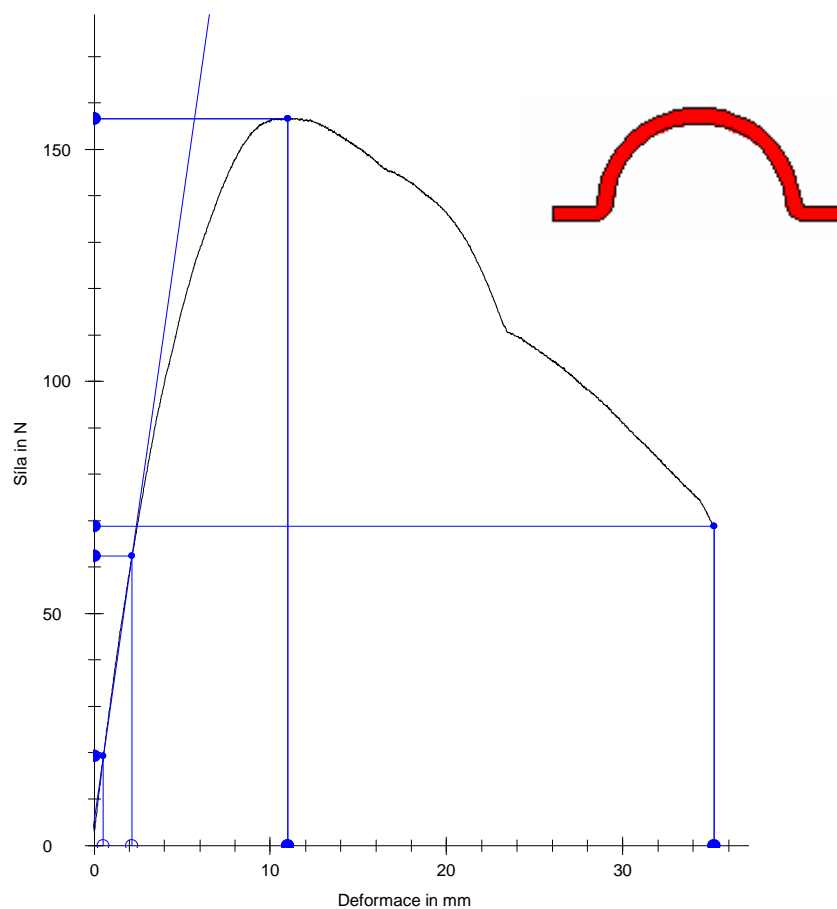
Rozměry profilu č.2				
Profil č.2	t	a	r	R
Měření č.	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1	1,9	15,8	26	27,5
2	1,89	15,9	26	27,45
3	1,9	15,85	26,05	27,5
4	1,95	15,8	26,1	27,44
5	1,9	15,8	26,1	27,4
6	1,9	15,8	26,11	27,43
7	1,97	15,8	26,1	27,5
8	1,9	15,81	26,12	27,5
9	1,89	15,8	26,06	27,49
10	1,91	15,8	26	27,5
<b>ap</b>	<b>1,911</b>	<b>15,816</b>	<b>26,064</b>	<b>27,471</b>
$\mu$	0,025475	0,031686	0,046519	0,035623

Tab.52 Rozměry půlkruhového profilu č.2

### Naměřené hodnoty 3.série půlkruhového profilu otočeného nahoru

3.série	E	Fmax	F <sub>1</sub> při y <sub>1</sub>	F <sub>2</sub> při y <sub>2</sub>	y při (Fmax)
měření č.	[Mpa]	[N]	[N]	[N]	[mm]
1	139339	127,3	15,68	50,36	16,17
2	157551,9	143,96	17,24	56,45	13,09
3	<b>173100,6</b>	<b>156,67</b>	<b>19,31</b>	<b>62,39</b>	<b>11</b>
4	180761	150,47	13,25	58,24	14,62
5	129501,1	142,62	14,06	46,29	14,01
<b>ap</b>	<b>156050,72</b>	<b>144,20</b>	<b>15,91</b>	<b>54,75</b>	<b>13,78</b>
<b>u</b>	<b>19430,46</b>	<b>9,83</b>	<b>2,19</b>	<b>5,73</b>	<b>1,71</b>

Tab.53 Naměřené hodnoty 3.série



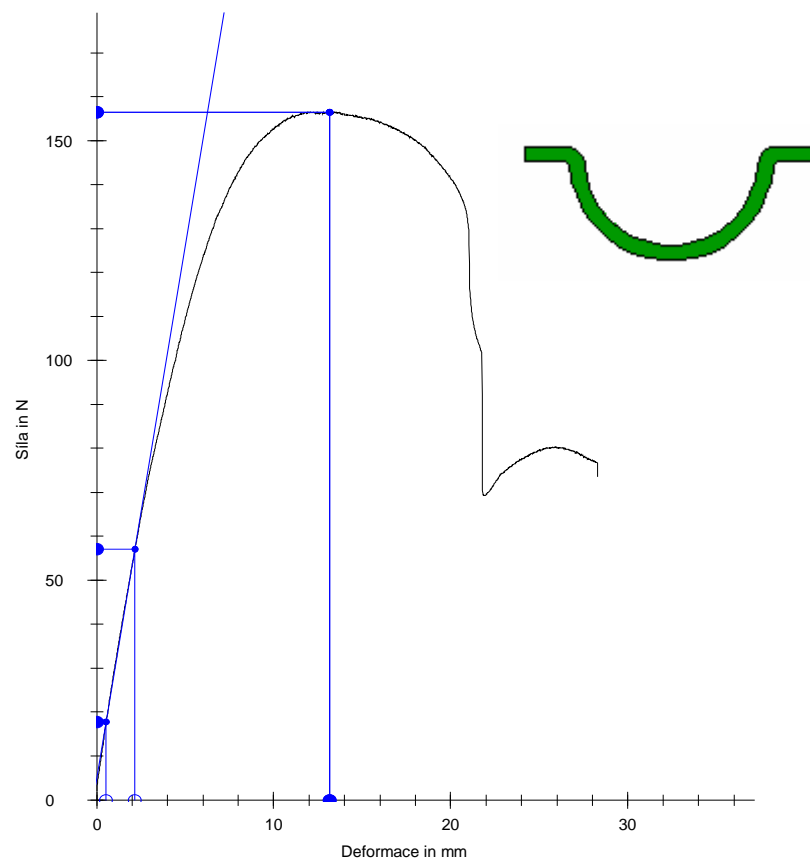
Graf č.13 - Graf pro 3.sérii

Graf č.13 odpovídá hodnotám z tabulky č.53 a to naměřeným hodnotám pro 3.sérii pro měření č.3. Hodnoty jsou zvýrazněny *tučně*.

#### Naměřené hodnoty 4.série půlkruhového profilu otočeného dolů

4.série	E	Fmax	F <sub>1</sub> při y <sub>1</sub>	F <sub>2</sub> při y <sub>2</sub>	y při (Fmax)
měření č.	[Mpa]	[N]	[N]	[N]	[mm]
1	171585,3	170,9	18,1	60,81	11,71
2	163839,3	165,48	17,68	58,46	12,26
3	<b>157791,3</b>	<b>156,54</b>	<b>17,73</b>	<b>57</b>	<b>13,17</b>
4	153508,5	152,35	17,61	55,82	11,98
5	190256	153,18	11,22	19,11	10,83
ap	<b>167396,09</b>	<b>159,69</b>	<b>16,47</b>	<b>50,24</b>	<b>11,99</b>
u	<b>12945,22</b>	<b>7,29</b>	<b>2,63</b>	<b>15,65</b>	<b>0,76</b>

Tab.54 Naměřené hodnoty 4.série



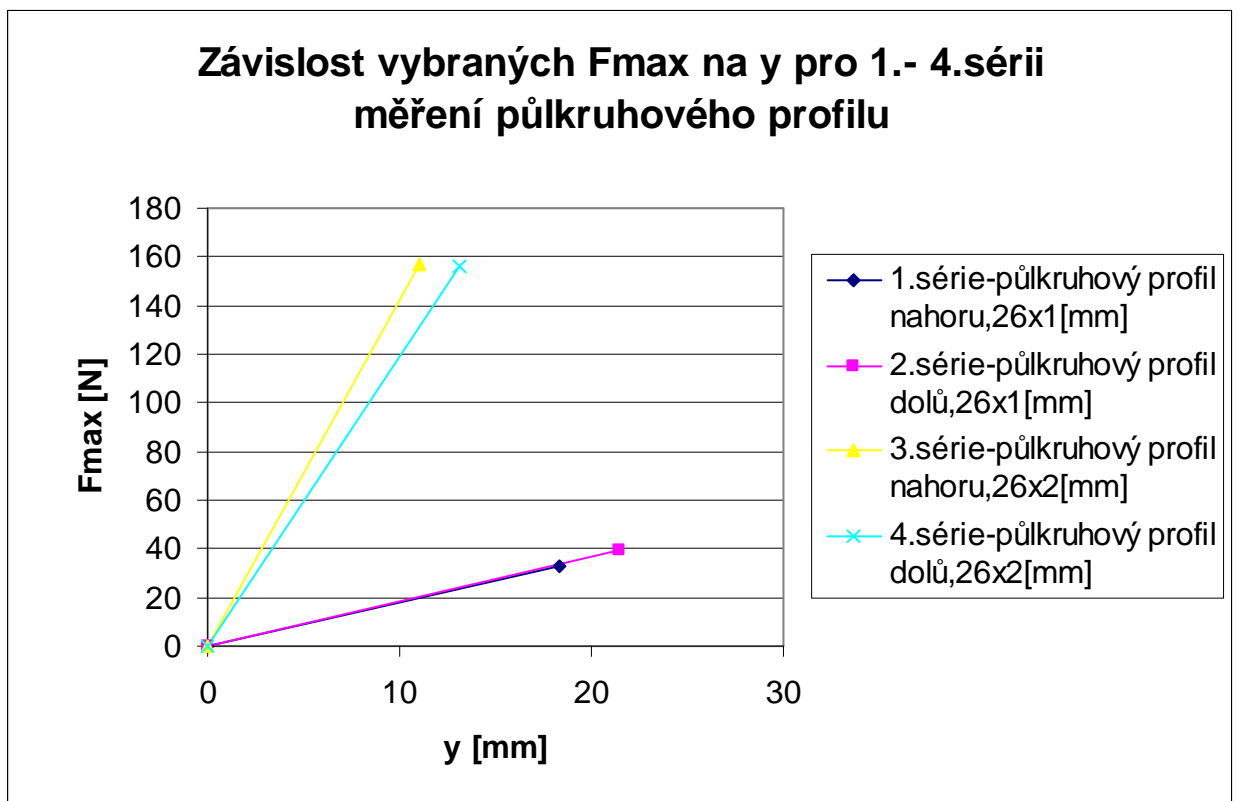
Graf č.14 - Graf pro 4.sérii

Graf č.14 odpovídá hodnotám z tabulky č.54 a to naměřeným hodnotám pro 4.sérii pro měření č.3. Hodnoty jsou zvýrazněny *tučně*.



### 7.5.3 Grafické znázornění $F_{max}$ (maximální síly) na $y$ (průhybu) pro vybrané naměřené hodnoty při ohybu půlkruhových profilů 1.-4.série

půl.profil	$F_{max}$ [N]	$y$ [mm]	směr zatěžování
1.série	32,8	18,36	nahoru
2.série	39,45	21,42	dolů
3.série	156,67	11	nahoru
4.série	156,54	13,17	dolů

Tab.55  $F_{max}$  na  $y$ Graf č.15 Závislost  $F_{max}$  na  $y$ 

Z tabulky č.55 je zřejmé, že u profilů s větší tloušťkou stěny (série č.3 a 4) bylo dosaženo větší zatěžující síly než u profilů s menší tloušťkou (série č.1 a 2). Zajímavostí je, že profily s větší tloušťkou stěny vykazovaly vyšší hodnoty meze pevnosti u profilů orientovaných dnem nahoru (série č.3), kdežto u ostatních případů to bylo naopak.



Obr. 51 Foto ohybu profilu se dnem dolů na stroji ZWICK a jeho deformace



Obr.52 Foto ohybu profilu se dnem dolů při jeho zborcení



Obr.53 Deformace profilu po ohybové zkoušce se dnem nahoru

### Naměřené moduly pružnosti strojem ZWICK pro jednotlivé série

půl.-profil	Profil č.1		Profil č.2	
série	1	2	3	4
E [Mpa]	158871,3	143645,4	173100,57	157791,27

Tab.č.56 Porovnání naměřených modulů pružnosti pro jednotlivé série

Z tabulky č.56 je zřejmé, že profily s větší tloušťkou stěny mají také větší modul pružnosti (profil č.2).

Profily se dnem nahoru (1.a 3.série) vykazují větší moduly pružnosti než profily se dnem dolů (2.a 4.série).

### 7.6 Ohybová zkouška půlkruhových profilů s nevyztuženými okraji

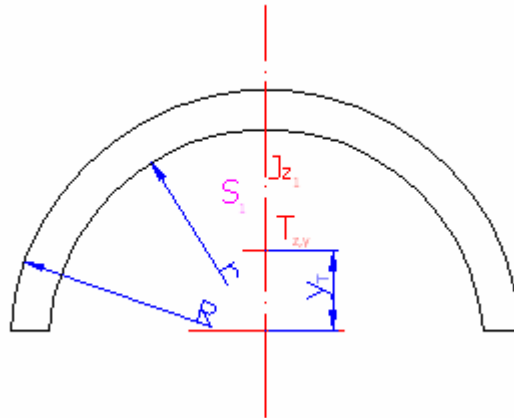
Uvedená ohybová zkouška byla provedena za shodných podmínek jako u profilů s vyztuženými okraji (viz.kap.6.5). Výsledky získané pro profily s nevyztuženými okraji byly převzaty od studenta Romana Michny kombinovaného studia v podobě základních dat, které jsem dále zpracoval a vyhodnotil. Z uvedeného důvodu jsou uvedena měření pouze pro jeden profil o charakteristických rozměrech podle tab.č.57. Profil byl opět zatěžován orientovaný dnem nahoru a dnem dolů.

Charakteristické rozměry		Označení profilu	Orientace profilu	Číslo série profilu
Výška šab.(mm)	Tloušťka mat.(mm)			
26	2	č.I	dnem nahoru	I.
			dnem dolů	II.

Tab.57 Přehled měření a orientace profilů

### 7.6.1 Měření I.a II. série pro půlkruhový profil bez vyztužených okrajů

Profil byl vytvarován z desky tloušťky 2 mm o poloměru ( $R = 27,5 \pm 0,03$  mm). V tabulce č.58 jsou uvedeny rozměry tohoto profilu dle (obr.54).



Obr.54 Profil bez vyztužení

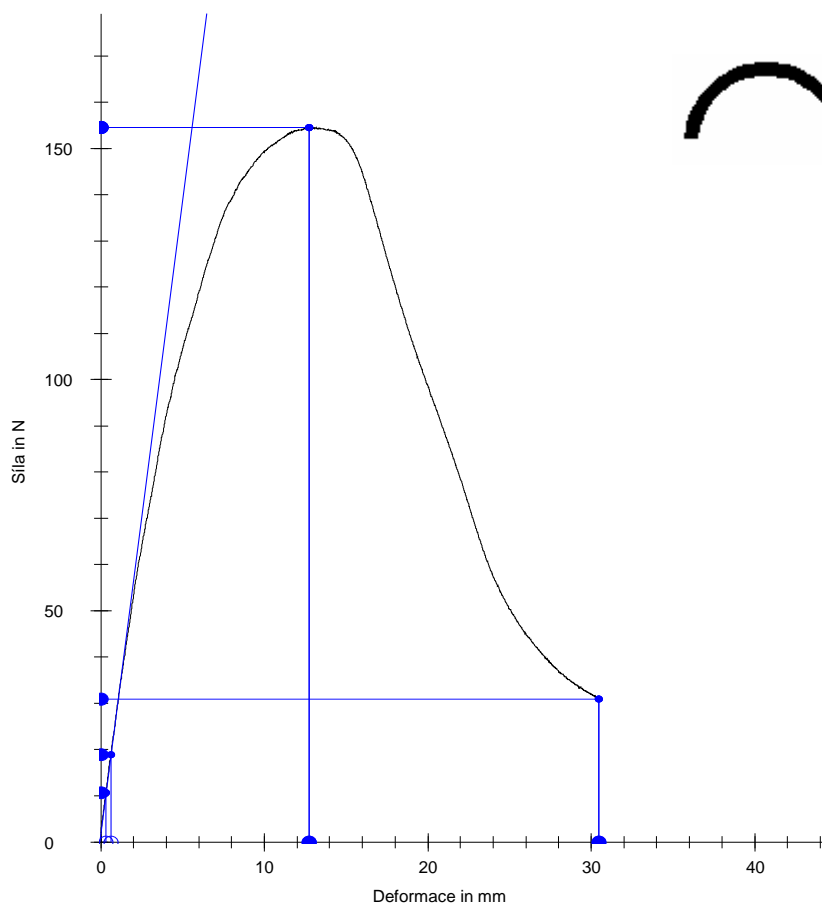
Půlk.prof	Rozměry	
	r	R
Měření č.	[mm]	[mm]
1	26	27,5
2	26	27,45
3	26,05	27,5
4	26,1	27,44
5	26,1	27,4
6	26,11	27,43
7	26,1	27,5
8	26,12	27,5
9	26,06	27,49
10	26	27,5
<b>ap</b>	<b>26,064</b>	<b>27,471</b>
<b>μ</b>	0,046519	0,035623

Tab.58 Rozměry profilu bez vyztužení

## Naměřené hodnoty profilu I.série při ohybu se dnem nahoře

I.série	E	Fmax	F <sub>1</sub> při y <sub>1</sub>	F <sub>2</sub> při y <sub>2</sub>	y při (Fmax)
měření č.	[Mpa]	[N]	[N]	[N]	[mm]
<b>1</b>	<b>76659,92</b>	<b>154,48</b>	<b>41,93</b>	<b>136,39</b>	<b>12,72</b>
2	83572,69	165,76	45,91	144,91	12,94
3	71347,2	136,55	47,15	133,87	10,93
4	75105,06	142,31	44,52	136,2	9,57
5	70816,25	146,76	46,23	142,56	10,93
<b>ap</b>	<b>75500,22</b>	<b>149,17</b>	<b>45,15</b>	<b>138,79</b>	<b>11,42</b>
<b>u</b>	<b>4601,15</b>	<b>10,15</b>	<b>1,82</b>	<b>4,20</b>	<b>1,26</b>

Tab.59 Naměřené hodnoty I.série bez vyztužení



Graf č.16 Graf pro 1.sérii

Graf č.16 odpovídá hodnotám z tabulky č.59 a to naměřeným hodnotám pro 1.sérii pro měření č.1. Hodnoty jsou zvýrazněny *tučně*.



## 7.7 Srovnání výsledků a jejich diskuze

### 7.7.1 Výpočet ohybové tuhosti

Následující tabulka nám porovnává velikost ohybové tuhosti mezi půlkruhovým profilem vyztuženým a mezi půlkruhovým profilem bez vyztužení. Jsou zde také uvedeny rozměry profilů a také naměřené hodnoty na stroji ZWICK tj.(Fmax a y při Fmax) a hodnota E.J daná vztahem:

$$E.J = \frac{F.L^3}{y.48}$$

#### 1.Půlkruhové profily se dnem nahoru

půlk.profil	dnem nahoře	R [mm]	t [mm]	L [mm]	Fmax [N]	y při Fmax [mm]	E.Jz [N.mm <sup>2</sup> ]
I.série	Bez vyztužení	27	2	180	154,48	12,72	1475575,472
1.série	S vyztužením	27	2	180	156,67	11	1730491,364

Tab.61 Ohybová tuhost pro vyztužený profil a profil bez vyztužení

#### 2.Půlkruhové profily se dnem dolů

půlk.profil	dnem dole	R [mm]	t [mm]	L [mm]	Fmax [N]	y při Fmax [mm]	E.Jz [N.mm <sup>2</sup> ]
II.série	Bez vyztužení	27	2	180	54,92	10,3	647842,7184
2.série	S vyztužením	27	2	180	156,54	13,17	1444161,731

Tab.62 Ohybová tuhost pro vyztužený profil a profil bez vyztužení

Z uvedených výpočtů vyplývá, že vyztužené profily mají větší ohybovou tuhost než profily bez vyztužení.

## ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývala vlivem vyztužení tenkostěnných plastových profilů při ohybu.

V teoretické části jsem uvedl základní pojmy a vztahy, které byly důležité pro řešení této bakalářské práce.

Na základě naměřených hodnot, které mně vygeneroval program TestExpert, jsem posuzoval rozdíl ohybové tuhosti mezi profily vyztuženými a profily nevyztuženými. Na základě provedených experimentálních měření a získaných teoretických poznatků jsem došel k následujícím závěrům.

Idealizovaný u-profil i profil půlkruhový se liší od profilu reálného pro všechny použité rozměry v mezích do 5 % ( viz str.43 a 77).

Rozdíl mezi kvadratickým momentem vyztuženého a nevyztuženého profilu se při teoretickém výpočtu významně liší, a to u u-profilu v rozmezích cca 61 – 73% ( viz str.46) a u půlkruhového profilu v rozmezí cca 36 – 64% (viz str.80). Tyto skutečnosti se pak potvrdily i experimentálně.

U u-profilů s nižší charakteristickou výškou byly naměřeny moduly pružnosti vyšší u sérií s orientací dnem dolů a u u-profilu s vyšší charakteristickou výškou u sérií s orientací dnem nahoru ( viz str.64).

Podobně u půlkruhových profilů bylo v případě větší tloušťky stěny dosaženo vyšších hodnot meze pevnosti u profilů orientovaných dnem nahoru (viz str.89).

Plně se potvrdily teoretické poznatky, že profily s vyztuženými okraji jak u u-profilů, tak i u půlkruhových profilů vykazují vyšší ohybovou tuhost než profily nevyztužené ( viz str. 69 a str.95).

Závěrem lze konstatovat, že cíl bakalářské práce byl splněn a současně bych rád zdůraznil, že téma bakalářské práce bylo pro mě zajímavé a poučné. Díky této bakalářské práci jsem si zopakoval základní teoretické znalosti v oblasti mechaniky, fyziky a matematiky. Velkým přínosem pro mě byla i část praktická, při jejíž realizaci jsem se naučil obsluhovat podtlakový pneumatický stroj Formtech a také trhací stroj Zwick.

Nabytých zkušeností bych rád využil i v budoucnu, ať už při studiu či praxi.



**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] Mañas, M., Staněk, M., Mañas, D.: Výrobní stroje a zařízení II, UTB ve Zlíně, fakulta technologická Zlín, 2007, ISBN 978-80-7318-596-1
- [2] Petruželka, J., Březina, R., Úvod do tváření I, VŠB-TU Ostrava, fakulta strojní Ostrava, 2001
- [3] Petruželka, J., Březina, R., Úvod do tváření II, VŠB-TU Ostrava, fakulta strojní Ostrava, 2001
- [4] Volek, F., Základy pružnosti a pevnosti, UTB ve Zlíně, fakulta technologická Zlín, 2002
- [5] Šuba, O., Mechanické chování těles, UTB ve Zlíně, fakulta technologická Zlín, 2006 ISBN 80-7318-484-2
- [6] Šuba, O., Dimenzování navrhování výrobků z polymerů, UTB ve Zlíně, fakulta technologická Zlín, 2007 ISBN 978-80-7318-431-5
- [7] Technická Univerzita Liberec, fakulta strojní, Katedra strojírenské technologie, plasty a jejich zpracovatelské vlastnosti – dostupný z WWW:  
[www.ksp.vslib.cz](http://www.ksp.vslib.cz)
- [8] Technická Univerzita Liberec, fakulta strojní, Katedra strojírenské technologie, oddělení tváření kovů a plastů dostupný z WWW:  
[http://www.ksp.vslib.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce\\_plasty/08.htm](http://www.ksp.vslib.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/08.htm)

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

$r$	malý poloměr elementu [mm]
$R$	velký poloměr elementu [mm]
$\rho$	poloměr neutrální osy [mm]
$y$	zvolená vzdálenost elementu [mm]
$d\alpha$	úhel elementu [°]
$d\alpha\rho$	délka vlákna na neutrální ose
$d\alpha(\rho+y)$	délka vlákna ve vzdálenosti $y$ od neutrální osy
$\varepsilon$	poměrná deformace [-]
$\sigma$	napětí [Mpa]
$\sigma_1$	napětí v krajním vlákne [Mpa]
$E$	modul pružnosti v tahu [Mpa]
$a_0$	průřez prutu [mm <sup>2</sup> ]
$J$	kvadratický moment průřezu plochy [mm <sup>4</sup> ]
$F$	síla [N]
$l_0$	původní délka [mm]
$l$	délka po prodloužení [mm]
$S_0$	původní průřez [mm <sup>2</sup> ]
$S$	průřez po prodloužení [mm <sup>2</sup> ]
$dl$	prodloužení [mm]
$Z$	poměrné zúžení [-]
$A$	Tažnost [%]
$J_z$	kvadratický moment průřezu k ose $z$ [mm <sup>4</sup> ]
$J_y$	kvadratický moment průřezu k ose $y$ [mm <sup>4</sup> ]
$Z_T$	těžiště v ose $z$ [mm]

---

$y_T$	těžiště v ose y [mm]
$J_{z'}$	kvadratický moment průřezu k mimotěžišťové ose z [mm <sup>4</sup> ]
$J_{y'}$	kvadratický moment průřezu k mimotěžišťové ose y [mm <sup>4</sup> ]
$D_{z'y'}$	deviační moment k posunutým osám [mm <sup>4</sup> ]
$J_p$	polární kvadratický moment [mm <sup>4</sup> ]
$D_{zy}$	deviační moment [mm <sup>4</sup> ]
$J_p$	polární kvadratický moment [mm <sup>4</sup> ]
$D_{zy}$	deviační moment [mm <sup>4</sup> ]

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obr.1	Tvarovací lis.....	11
Obr.2	Tvarování fólií – cyklické.....	12
Obr.3	Tvarování fólií – kontinuální.....	12
Obr.4	Dvojitý podtlakový tvarovací stroj na desky.....	13
Obr.5	Rotační tvarovací stroj.....	14
Obr.6	Negativní pneumatické tvarování.....	16
Obr.7	Pozitivní pneumatické tvarování.....	17
Obr.8	3-bodová zkouška ohybu.....	18
Obr.9	Deformace krajních vláken.....	18
Obr.10	Napětí při ohybu.....	19
Obr.11	Obecný tvar závislosti funkce.....	20
Obr.12	Namáhání tělesa tahem.....	21
Obr.13	Závislost modulu pružnosti na teplotě skelného přechodu.....	22
Obr.14	Lineární moment průřezu plochy.....	23
Obr.15	Kvadratický moment průřezu obdélníka.....	24
Obr.16	Kvadratický moment průřezu kruhu.....	25
Obr.17	Kvadratický moment průřezu plochy k mimotěžišťové ose.....	26
Obr.18	Deviační moment tělesa.....	27
Obr.19	Tenkostěnný půlkruhový profil a u-profil bez vyztužených okrajů.....	29
Obr.20	Tenkostěnný půlkruhový profil a u-profil s vyztuženými okraji.....	29
Obr.21	Nesymetrický vyztužený profil jednostrannými žebry.....	30
Obr.22	Symetricky vyztužený tenkostěnný profil.....	30
Obr.23	Dětský plastový klíč vyztužený žebry.....	30
Obr.24	Příklady aplikací termoplastů.....	33

Obr.25	Dřevěná šablona pro nízký u-profil.....	36
Obr.26	Dřevěná šablona pro vysoký u-profil.....	37
Obr.27	U-profil vytvořený na šabloně.....	37
Obr.28	U-profil vytvořený na šabloně po nařezání na kusy.....	37
Obr.29	Reálný u-profil.....	38
Obr.30	Idealizovaný u-profil.....	41
Obr.31	U-profil bez vyztužených okrajů.....	44
Obr.32	U-profil s vyztuženými okraji.....	45
Obr.33	Schéma zatěžování nosníku.....	47
Obr.34	Úplné uvolnění nosníku.....	47
Obr.35	Schéma průhybu nosníku při zatížení silou F .....	48
Obr.36	Schéma 3-bodové ohybové zkoušky .....	49
Obr.37	Schéma otočení profilů .....	49
Obr.38	Profil č.1.....	51
Obr.39	Zdeformovaný u-profil výšky 25 mm a tloušťky 1 mm po ohybové zkoušce .....	64
Obr.40	Profil bez vyztužení.....	66
Obr.41	Dřevěná šablona pro půlkruhový profil.....	70
Obr.42	Půlkruhový profil vytvořený na šabloně.....	70
Obr.43	Půlkruhový profil po nařezání na kusy.....	71
Obr.44	Reálný půlkruhový profil.....	72
Obr.45	Idealizovaný půlkruhový profil.....	75
Obr.46	Půlkruhový profil bez vyztužení .....	78
Obr.47	Vyztužený půlkruhový profil .....	79
Obr.48	Schéma 3-bodové ohybové zkoušky .....	81

---

Obr.49	Schéma otočení profilů .....	81
Obr.50	Půlkruhový profil .....	83
Obr.51	Foto ohybu profilu se dnem dole na stroji ZWICK a jeho deformace .....	90
Obr.52	Foto ohybu profilu se dnem dole při jeho zborcení .....	90
Obr.53	Deformace profilu po ohybové zkoušce se dnem nahoře .....	90
Obr.54	Profil bez vyztužení.....	92

**SEZNAM TABULEK**

Tab.1	Rozměry reálného u-profilu č.1.....	38
Tab.2	Vypočtené hodnoty reálného u-profilu č.1.....	40
Tab.3	Rozměry idealizovaného u-profilu č.1.....	41
Tab.4	Vypočtené hodnoty idealizovaného profilu č.1.....	43
Tab.5	Rozdíl kvadratických momentů.....	43
Tab.6	Rozdíl těžišť.....	43
Tab.7	Rozměry u-profilů bez vyztužení.....	44
Tab.8	Velikost kvadratických momentů.....	44
Tab.9	Velikost těžiště.....	44
Tab.10	Rozměry u-profilů s vyztužením.....	45
Tab.11	Velikost kvadratických momentů .....	45
Tab.12	Velikost těžišť .....	45
Tab.13	Rozdíl mezi kvadratickými momenty u-profilů .....	46
Tab.14	Přehled měření a orientace profilů .....	50
Tab.15	Rozměry u-profilu č.1.....	51
Tab.16	Naměřené hodnoty 1.série .....	52
Tab.17	Naměřené hodnoty 2.série.....	53
Tab.18	Rozměry u-profilu č.2.....	54
Tab.19	Naměřené hodnoty 3.série .....	54
Tab.20	Naměřené hodnoty 4.série .....	55
Tab.21	Rozměry u-profilů č.3.....	57
Tab.22	Naměřené hodnoty 5.série .....	57
Tab.23	Naměřené hodnoty 6.série .....	58
Tab.24	Rozměry u-profilu č.4.....	60

Tab.25	Naměřené hodnoty 7.série .....	60
Tab.26	Naměřené hodnoty 8.série .....	61
Tab.27	Fmax na y .....	63
Tab.28	Porovnání naměřených modulů pružnosti pro jednotlivé série .....	64
Tab.29	Přehled měření a orientace profilů .....	65
Tab.30	Rozměry profilu bez vyztužení .....	66
Tab.31	Naměřené hodnoty I.série bez vyztužení .....	67
Tab.32	Naměřené hodnoty II.série bez vyztužení .....	68
Tab.33	Ohybová tuhost pro vyztužený profil a profil bez vyztužení .....	69
Tab.34	Ohybová tuhost pro vyztužený profil a profil bez vyztužení .....	69
Tab.35	Rozměry reálného profilu.....	72
Tab.36	Vypočtené hodnoty reálného profilu č.1.....	74
Tab.37	Rozměry idealizovaného profilu.....	75
Tab.38	Vypočtené hodnoty idealizovaného profilu č.1.....	77
Tab.39	Rozdíl kvadratických momentů.....	77
Tab.40	Rozdíl těžišť.....	77
Tab.41	Rozměry půlkruhových profilů bez vyztužení.....	78
Tab.42	Velikost kvadratických momentů.....	78
Tab.43	Velikost těžiště.....	78
Tab.44	Rozměry půlkruhových profilů s vyztužením.....	79
Tab.45	Velikost těžiště.....	79
Tab.46	Velikost kvadratických momentů.....	79
Tab.47	Rozdíl mezi kvadratickými momenty půlkruhových profilů.....	80
Tab.48	Přehled měření a orientace profilů.....	82
Tab.49	Rozměry půlkruhového profilu č.1.....	83



---

Tab.50	Naměřené hodnoty 1.série.....	84
Tab.51	Naměřené hodnoty 2.série.....	85
Tab.52	Rozměry půlkruhového profilu č.2.....	86
Tab.53	Naměřené hodnoty 3.série.....	86
Tab.54	Naměřené hodnoty 4.série.....	87
Tab.55	Fmax na y.....	89
Tab.56	Porovnání naměřených modulů pružnosti pro jednotlivé série.....	91
Tab.57	Přehled měření a orientace profilů.....	91
Tab.58	Rozměry profilu bez vyztužení.....	92
Tab.59	Naměřené hodnoty I.série bez vyztužení.....	93
Tab.60	Naměřené hodnoty II.série bez vyztužení.....	94
Tab.61	Ohybová tuhost pro vyztužený profil a profil bez vyztužení.....	95
Tab.62	Ohybová tuhost pro vyztužený profil a profil bez vyztužení.....	95

