

# OHYB TENKOSTĚNNÝCH POLYMERNÍCH PRVKŮ

Bc. František Zetík

---

Diplomová práce  
2009/2010



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická  
Ústav výrobního inženýrství  
akademický rok: 2009/2010

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. František ZETÍK**  
Studijní program: **N 3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**

Téma práce: **Ohyb tenkostěnných polymerních prvků**

Zásady pro vypracování:

- 1. Vypracování literární studie na dané téma**
- 2. Výroba zkušebních profilů na vakuové podtlakové tvarovačce**
- 3. Provedení experimentálních zkoušek v ohybu**
- 4. Vyhodnocení výsledků a stanovení doporučení z hlediska praktických aplikací**

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

**Dle doporučení vedoucího diplomové práce**

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Milan Žaludek, Ph.D.**  
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **19. února 2010**

Termín odevzdání diplomové práce: **19. května 2010**

Ve Zlíně dne 19. ledna 2010



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



doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.  
*vedoucí katedry*

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby <sup>1/</sup>;
- beru na vědomí, že diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 <sup>2/</sup>;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3/</sup> odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3/</sup> odst. 2 a 3 mohu užit své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 12.5 2010



.....

<sup>11</sup> zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevyjádřeně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být už nejmenší pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlášení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výtisky, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

<sup>21</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

<sup>16</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odmírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihledne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce se zabývá mechanickými vlastnostmi tenkostěnných plastových profilů při ohybu, které se navzájem lišily tvarem a tloušťkou stěny. Pomocí podtlakového tvarování byly vytvořeny čtyři typy těchto profilů. K jejich zhotovení byl použit materiál o tloušťce jeden a dva milimetry. Po vytvarování všech profilů se uskutečnila tříbodová ohybová zkouška. Potom následovalo vyhodnocení naměřených hodnot profilů. U profilů byly porovnávány ohybová tuhost, tvarový modul pružnosti atd.

Závěrem práce uvádím shrnutí výsledků a jejich diskuzi.

**Klíčová slova:** Podtlakové tvarování, tří-bodová ohybová zkouška, ohybová tuhost, tvarový modul pružnosti, ohyb tenkostěnných plastových profilů.

## **ABSTRACT**

This work deals with the mechanical properties of thin-walled plastic profiles while being bent. The profiles were different as to the shape and the thickness of walls. Four types of plastic profiles were made by using of vacuum forming technology. Material used for making profiles was one or two millimeters thick.

After all the profiles were made the three-point bend test took place. Then the analysis of results of the test followed: flexural rigidity, Young's modulus of shape and others were compared.

Finally the summary of results and their discussion are mentioned.

**Keywords:** Vacuum forming, three-point bend test, flexural rigidity, Young's modulus of shape, the bend of thin-walled plastic profiles.

Děkuji Ing. Milanu Žaludkovi, Ph.D., vedoucímu mé diplomové práce, za odborné vedení, poskytování cenných rad, které mě vedly a pomohly k řešení dané problematiky. Zároveň také děkuji Ing. Vladimíru Šumberovi a dalším pracovníkům UTB ve Zlíně.

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

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

Prohlašuji, že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně 12.5. 2010

.....

podpis

# OBSAH

ÚVOD.....	8
<b>I TEORETICKÁ ČÁST .....</b>	<b>9</b>
<b>1 POLYMERNÍ MATERIÁLY (PLASTY) A JEJICH ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ.....</b>	<b>10</b>
1.1 PŘÍPRAVA PLASTŮ .....	10
1.2 ROZDĚLENÍ PLASTŮ PODLE TEPLOTNÍHO CHOVÁNÍ .....	11
1.2.1 Reaktoplasty .....	11
1.2.2 Termoplasty.....	11
1.2.3 Elastomery ( kaučuky, pryže).....	11
1.3 ROZDĚLENÍ PLASTŮ PODLE NADMOLEKULÁRNÍ STRUKTURY .....	11
1.4 ZÁKLADNÍ TYPY POLYMERŮ A JEJICH MECHANICKÉ VLASTNOSTI.....	13
<b>2 TVAROVÁNÍ (FORMOVÁNÍ) .....</b>	<b>18</b>
2.1 TVAROVÁNÍ ZA TEPLA .....	18
2.1.1 Mechanické tvarování .....	19
2.1.2 Pneumatické tvarování .....	21
2.1.2.1 Negativní pneumatické tvarování .....	23
2.1.2.2 Pozitivní pneumatické tvarování .....	24
2.1.2.3 Tvarovací formy a stroje .....	25
<b>3 MECHANICKÉ VLASTNOSTI POLYMERŮ .....</b>	<b>27</b>
3.1 MODUL PRUŽNOSTI A KRÁTKODOBÉ MECHANICKÉ CHOVÁNÍ.....	27
3.2 MODUL PRUŽNOSTI A DLOUHODOBÉ MECHANICKÉ CHOVÁNÍ.....	33
<b>4 GEOMETRICKÉ CHARAKTERISTIKY PRŮŘEZU.....</b>	<b>35</b>
4.1 LINEÁRNÍ MOMENT PRŮŘEZU PLOCHY .....	35
4.2 KVADRATICKÝ MOMENT PRŮŘEZU .....	36
4.2.1 Obdélník .....	36
4.2.2 Kruh.....	37
4.3 KVADRATICKÝ MOMENT PRŮŘEZU K MIMOTĚŽIŠŤOVÉ OSE .....	38
4.4 POLÁRNÍ KVADRATICKÝ MOMENT .....	38
4.5 DEVIČNÍ MOMENT .....	39
<b>5 NAVRHOVÁNÍ TVARU VÝROBKŮ Z HLEDISKA TUHOSTI A PEVNOSTI.....</b>	<b>40</b>
5.1 TENKOSTĚNNÉ PLASTOVÉ PROFILY .....	40
5.2 OHYBOVÁ TUHOST A OHYBOVÁ ÚNOSNOST VYZTUŽENÝCH STĚN .....	44
<b>6 TENKÉ DESKY A SKOŘEPINY .....</b>	<b>46</b>



6.1	ROVINNÁ NAPJATOST .....	46
6.2	ROVNICE ELASTICITY PRO DVOUOSOOU NAPJATOST.....	47
6.3	OHYBOVÁ A MEMBRÁNOVÁ NAPJATOST A TUHOST TENKOSTĚNNÝCH VÝROBKŮ S HOMOGENNÍ STĚNOU .....	50
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>58</b>
<b>7</b>	<b>VYTVOŘENÍ TENKOSTĚNNÝCH PLASTOVÝCH PROFILŮ .....</b>	<b>59</b>
7.1	TVAROVACÍ STROJ A DŘEVĚNÉ ŠABLONY (FORMY).....	61
<b>8</b>	<b>3-BODOVÁ OHYBOVÁ ZKOUŠKA.....</b>	<b>62</b>
8.1	ZÁKLADNÍ VZTAHY 3-BODOVÉ OHYBOVÉ ZKOUŠKY .....	62
8.2	SCHÉMA PROVEDENÍ OHYBOVÝCH ZKOUŠEK .....	63
8.2.1	Ohyb profilu 1 .....	64
8.2.1.1	Profil 1 (2 mm) .....	65
8.2.1.2	Profil 1 (1 mm) .....	67
8.2.2	Ohyb profilu 2 .....	69
8.2.2.1	Profil 2 (2mm) .....	70
8.2.2.2	Profil 2 (1 mm) .....	72
8.2.3	Ohyb profilu 3 .....	74
8.2.3.1	Profil 3 (2mm) .....	75
8.2.3.2	Profil 3 (1mm) .....	77
8.2.4	Ohyb profilu 4 .....	79
8.2.4.1	Profil 4 (2 mm) .....	80
8.2.4.2	Profil 4 (1mm) .....	82
8.3	TRHACÍ STROJ ZWICK A PROGRAM TEST EXPERT .....	84
<b>9</b>	<b>POUŽITÉ VZTAHY A ZNAČENÍ VE VÝSLEDČÍCH U PROFILŮ.....</b>	<b>85</b>
<b>10</b>	<b>PROFILY Z TLOUŠŤKY 2 MM.....</b>	<b>87</b>
10.1	SROVNÁNÍ TVAROVÝCH MODULŮ PRUŽNOSTI PROFILŮ ( 2 MM) .....	87
10.2	SROVNÁNÍ TVAROVÝCH MODULŮ PROFILŮ S ORIENTACÍ DNEM NAHORU (2 MM)88	
10.2.1	Vliv geometrie průřezu profilů na zvýšení ohybové tuhosti a únosnosti profilů orientovaných dnem nahoru (2mm) .....	89
10.2.2	Vliv poměru výšky profilu „h“ a vzdálenosti krajního vlákna „e <sub>max</sub> “ na ohybovou tuhost „E <sub>PR</sub> .J <sub>Z</sub> “ .....	93
10.3	SROVNÁNÍ TVAROVÝCH MODULŮ PROFILŮ S ORIENTACÍ DNEM DOLŮ (2 MM) .....	95
10.3.1	Vliv geometrie průřezu profilů na zvýšení ohybové tuhosti a únosnosti profilů orientovaných dnem dolů (2 mm).....	96
10.3.2	Vliv poměru výšky profilu „h“ a vzdálenosti krajního vlákna profilu „e <sub>max</sub> “ na ohybovou tuhost „E <sub>PR</sub> .J <sub>Z</sub> “ .....	100
<b>11</b>	<b>SHRNUTÍ A VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ PROFILŮ TLOUŠŤKY 2 MM .....</b>	<b>102</b>

11.1	SROVNÁNÍ OHYBOVÉ TUHOSTI MEZI PROFILY ORIENTO VANÝMI DNEM NAHORU A DNEM DOLŮ (2 MM) .....	102
11.2	SROVNÁNÍ OHYBOVÉ ÚNOSNOSTI MEZI PROFILY ORIENTO VANÝMI DNEM NAHORU A DNEM DOLŮ (2 MM) .....	104
11.3	SROVNÁNÍ TEORETICKÉ OHYBOVÉ TUHOSTI A ÚNOSNOSTI MEZI PROFILY ORIENTO VANÝMI DNEM NAHORU A DNEM DOLŮ (2 MM) .....	106
11.3.1	Teoretická ohybová tuhost profilů (2 mm).....	106
11.3.2	Teoretická ohybová únosnost profilů (2 mm) .....	107
<b>12</b>	<b>PROFILY Z TLOUŠŤKY 1 MM.....</b>	<b>108</b>
12.1	SROVNÁNÍ TVAROVÝCH MODULŮ PRUŽNOSTI PROFILŮ ( 1 MM) .....	108
12.2	SROVNÁNÍ TVAROVÝCH MODULŮ PROFILŮ S ORIENTACÍ DNEM NAHORU (1 MM).....	109
12.2.1	Vliv geometrie průřezu profilů na poměrné zvýšení ohybové tuhosti a únosnosti profilů orientovaných dnem nahoru (1mm).....	110
12.2.2	Vliv poměru výšky profilu „h“ a vzdálenosti krajního vlákna profilu „ $e_{max}$ “ na ohybovou tuhost „ $E_{PR} \cdot J_z$ “ .....	114
12.3	SROVNÁNÍ TVAROVÝCH MODULŮ PROFILŮ S ORIENTACÍ DNEM DOLŮ (1MM).....	116
12.3.1	Vliv geometrie průřezu profilů na poměrné zvýšení ohybové tuhosti a únosnosti profilů orientovaných dnem dolů (1mm).....	117
12.3.2	Vliv poměru výšky profilu „h“ a vzdálenosti krajního vlákna profilu „ $e_{max}$ “ na ohybovou tuhost $E_{PR} \cdot J_z$ .....	121
<b>13</b>	<b>SHRNUTÍ A VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ PROFILŮ TLOUŠŤKY 1 MM .....</b>	<b>123</b>
13.1	SROVNÁNÍ OHYBOVÉ TUHOSTI MEZI PROFILY ORIENTO VANÝMI DNEM NAHORU A DNEM DOLŮ (1 MM) .....	123
13.2	SROVNÁNÍ OHYBOVÉ ÚNOSNOSTI MEZI PROFILY ORIENTO VANÝMI DNEM NAHORU A DNEM DOLŮ (1 MM) .....	125
13.3	SROVNÁNÍ TEORETICKÉ OHYBOVÉ TUHOSTI A ÚNOSNOSTI PROFILŮ ORIENTO VANÝCH DNEM NAHORU A DNEM DOLŮ (1 MM).....	127
13.3.1	Teoretická ohybová tuhost profilů (1mm).....	127
13.3.2	Teoretická ohybová únosnost profilů (1 mm) .....	128
<b>14</b>	<b>SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ PROFILŮ TLOUŠŤEK 1 MM A 2 MM.....</b>	<b>129</b>
14.1	SROVNÁNÍ OHYBOVÉ TUHOSTI PROFILŮ ORIENTO VANÝCH DNEM NAHORU .....	129
14.2	SROVNÁNÍ OHYBOVÉ TUHOSTI PROFILŮ ORIENTO VANÝCH DNEM DOLŮ .....	130
14.3	SROVNÁNÍ OHYBOVÉ ÚNOSNOSTI PROFILŮ ORIENTO VANÝCH DNEM NAHORU .....	131
14.4	SROVNÁNÍ OHYBOVÉ ÚNOSNOSTI PROFILŮ ORIENTO VANÝCH DNEM DOLŮ.....	132
14.5	SROVNÁNÍ TEORETICKÝCH OHYBOVÝCH TUHOSTÍ PROFILŮ TLOUŠŤKY 2 MM A 1 MM .....	133
14.6	SROVNÁNÍ TEORETICKÝCH OHYBOVÝCH ÚNOSNOSTÍ PROFILŮ TLOUŠŤKY 2 MM A 1 MM .....	134
<b>15</b>	<b>GRAFICKÉ SROVNÁNÍ TEORETICKÉ A PRAKTICKÉ OHYBOVÉ</b>	

<b>TUHOSTI A OHYBOVÉ ÚNOSNOSTI.....</b>	<b>135</b>
15.1 TEORETICKÁ A PRAKTICKÁ OHYBOVÁ TUHOST .....	135
15.2 TEORETICKÁ A PRAKTICKÁ OHYBOVÁ ÚNOSNOST.....	136
<b>16 TAHOVÁ ZKOUŠKA PRO ZJISTĚNÍ MODULU PRUŽNOSTI</b>	
<b>MATERIÁLU .....</b>	<b>137</b>
16.1 MATERIÁL PS (1 MM).....	138
16.2 MATERIÁL PS (2 MM).....	139
16.3 HODNOTA MODULU PRUŽNOSTI „E“ .....	141
<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>142</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>146</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>148</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>151</b>
<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>156</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>159</b>

## ÚVOD

Úvodem bychom mohli říci, že plastové materiály patří v současné době mezi nejpoužívanější materiály. Patří rozhodně mezi materiály budoucnosti. Plasty jsou ve srovnání s tradičními materiály, jako jsou kovy, mnohem méně tuhé a pevné, mají velký sklon k tečení, jejich mechanické vlastnosti jsou výrazně závislé na teplotě. Z čehož vyplývá, že mají vysokou teplotní roztažnost. 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, stavební průmysl (např. palubovky, televize, trubky) atd.

Plastové výrobky se vyrábějí nejčastěji technologií vstřikování, kdy se vstřikuje polymer ve formě taveniny do dutiny vstřikovací formy. Je tedy zapotřebí vstřikovacího stroje, vstřikovací formy, která musí být pro daný výrobek vhodně a s co nejmenšími náklady navrhnutá konstruktérem vstřikovací formy. Dutina vstřikovací formy musí být navržena tak, aby finální rozměry a tvar výrobku odpovídaly požadavkům. Je tedy důležité dobře znát vlastnosti zpracovávaného materiálu při tuhnutí, tedy znát hodnotu smrštění materiálu po zatuhnutí. 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. Zde je tedy nutné vědět, jakým způsobem a v jakém prostředí se bude výrobek při jeho aplikaci vyskytovat (namáhání výrobku, působení okolního prostředí, apod.). Je proto nutné vzájemné komunikace mezi konstruktérem vstřikovací formy a konstruktérem vyráběného výrobku. Také je nutná znalost vlastností a chování vstřikovaného materiálu při zpracování. Plasty však můžeme zpracovávat i dalšími technologiemi např. tvarováním. K tvarování jsou určeny nejčastěji desky a fólie z plastu. Polotovary (deska, fólie) je ohřátý na požadovanou teplotu a vhodným způsobem vytvářen. I zde je důležité před výrobou znát vlastnosti zpracovávaného materiálu a také znát použití výrobku. Plastové výrobky jsou nejčastěji navrhovány jako tenkostěnné z důvodů co nejnižší hmotnosti a úspory materiálu. Pro jejich vyšší pevnost se tenkostěnné plastové výrobky vyztužují pomocí různých žebor (žebrováním) po celé ploše profilu nebo různým vyztužováním částí profilu výrobku. U plastů se deformace zvyšují s rostoucí dobou zatížení a s rostoucí teplotou a časem (relaxace, creep).

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

# 1 POLYMERNÍ MATERIÁLY (PLASTY) A JEJICH ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ

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 *polyolefiny, 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.[4]

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.

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

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

*Mezi nevýhody* určitě patří nízké mechanické vlastnosti, creep (tečení) a také ekologická zatížitelnost. [4]

## 1.1 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.[4]

## 1.2 Rozdělení plastů podle teplotního chování

### 1.2.1 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, atd. [4]

### 1.2.2 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. [4]

### 1.2.3 Elastomery (kaučuky, pryže)

Jedná se o materiály, které při zahřívání můžeme opět tvářet, ale pouze omezenou dobu. S přibývajícím časem se totiž při zahřívání začne vytvářet chemická reakce a dochází k prostorovému zesíťování struktury neboli k vulkanizaci. Elastomer je vysoce elastický polymer, který můžeme značně deformovat aniž by se porušil, přičemž tato deformace je převážně vratná. [4]

## 1.3 Rozdělení plastů podle nadmolekulární struktury

Je to rozdělení podle stupně uspořádanosti, kdy nadmolekulární struktura je nadřazena makromolekulám. Dělí se:

**1. Amorfní** – kde makromolekuly zaujímají nahodilou pozici (nejsou pravidelně uspořádány). Jejich mechanické vlastnosti jsou charakteristické zejména pevností, křehkostí, tvrdos-

tí, modulem pružnosti. Vzhledem k nízkému indexu lomu jsou průhledné (1,4 až 1,6). Můžeme tedy říci, že jsou dle propustnosti světla buď čiré (92 % propustnosti světla), transparentní a nebo průhledné (60 % propustnosti světla). Součinitel teplotní roztažnosti amorfních plastů je menší než u semikrystalických plastů. Jejich použitelnost je do teploty  $T_g$  tj. do teploty zesklennění.

**Pod teplotou  $T_g$**  je amorfní plast ve stavu sklovitém. Plast je zde tvrdý a křehký a platí zde Hookeův zákon úměrnosti napětí a deformace. Mechanickým napětím dojde jen k malým a okamžitě vratným deformacím (ideálně elastická deformace), což platí i pro semikrystalické plasty.

**Při teplotách nad  $T_g$**  nebo tedy mezi  $T_g$  a  $T_f$  je amorfní plast ve tvaru kaučukovitém. Při mechanickém zatížení se řetězce snadno rozvinují, avšak ne okamžitě, potřebují trochu času. Po uvolnění napětí se vracejí do původního stavu. Tato zpožděná deformace se nazývá viskoelastická deformace a je typická pro plasty. Dalším zvyšováním teploty se u amorfních plastů přibližujeme k teplotě viskózního toku  $T_f$ .

**Nad teplotou  $T_f$**  je amorfní plast ve stavu plastickém. Amorfní plasty jsou v tomto stavu měkké a tvárné. Proto jsou amorfní plasty vhodné pro tvarování. Deformace jsou velké, nevratné a závislé na čase. Se zvyšující se teplotou přechází do formy taveniny.

Patří sem polymery: PS, PC, PMMA, PVC, ABS atd.

**2. Semikrystalické (krystalické)**- tyto plasty naopak od amorfních plastů vykazují určitý stupeň uspořádanosti. Označuje se jako stupeň krystalinity a pohybuje se v rozmezí od 40-90 %. Nemůžeme nikdy dosáhnout 100 % proto se krystalické plasty označují jako semikrystalické. Jsou mléčně zakalené, houževnaté, index lomu je větší a modul pružnosti a pevnost se zvyšuje se stupněm krystalinity. Použití těchto plastů je do teploty tání tj.  $T_m$ .

**Při teplotách nad  $T_g$** , což je v kaučukovité oblasti, jsou semikrystalické polymery pevné a houževnaté. Dalším zvyšováním teploty docházíme k teplotě tání  $T_m$ .

**Při teplotách nad  $T_m$**  přecházejí semikrystalické plasty prudce do formy taveniny. Čím je polymer více krystalický, tím prudší je jeho přechod. Proto nejsou vhodné pro tvarování.

Patří sem polymery: PE, PP, PA, POM, PET atd. [4]



## 1.4 Základní typy polymerů a jejich mechanické vlastnosti

V současné době máme na výběr z velkého množství plastů, mezi které patří jak plasty pro základní použití, tak také plasty pro speciální konstrukční použití, které se vyznačují požadovanými vlastnostmi pro danou aplikaci. Mezi tyto vlastnosti mohou patřit zvýšená pevnost a tuhost za zvýšených teplot nebo také zvýšená odolnost vůči agresivním látkám (chemické látky), snižovat křehkost při nižších teplotách, zvyšovat odolnost proti povětrnostním vlivům, odolnost proti hoření, ale také tepelnou a elektrickou vodivost popř. tvarovou stálost za tepla. V praxi proto materiály rozlišujeme na základní a speciální typy (např. polymery se stabilizátory proti ultrafialovému záření, polymery s retardéry hoření, atd.).

Plněné plasty jsou nazývány částicovými kompozity tzn., že částice určitého plniva, které bývají často např. skleněná vlákna jsou rozptýleny v daném plastovém materiálu (polymerní matrici). Mezi základní plniva patří např. skleněná vlákna, mletá minerální plniva, skleněné mikrokuličky, grafit, atd. V dané matrici bývají obsaženy v různých koncentracích.[1]

**Polyolefiny** – patří mezi semikrystalické termoplasty s poměrně nižší pevností a tuhostí avšak s vyšší houževnatostí. Jejich velké výhody jsou v tom, že nejsou navlhavé, odolávají kyselinám, solným roztokům, luhům, ale také různým rozpouštědlům. **Patří sem:** PE, PP, PA, atd.)

### **Polyethylén (PE)**

Patří mezi semikrystalické termoplasty. Jeho vlastnosti jsou značně závislé na hodnotě strukturních parametrů. Se zvyšující se hustotou od  $0,915 \text{ g/cm}^3$  pro PE-LD (rozvětvený polyethylén) k  $0,97 \text{ g/cm}^3$  pro PE-HD (lineární polyethylén) je příčinou vyššího obsahu krystalického podílu, což vede k zhoršení zpracovatelnosti.

Z mechanických vlastností se zlepšuje tuhost, pevnost a tvrdost, ale zase nám klesá houževnatost, vzrůstá teplota tání a také vzrůstá tvarová stálost za tepla. Také se nám zlepšuje odolnost proti různým chemickým látkám a propustnost pro různé plyny a páry. Ze vzhledové stránky se nám zvyšuje zakalení a tím nám klesá průhlednost materiálu. Můžeme říci, že pro vysokou hustotu je typická lineární makromolekula a pro nízkou hustotu zase rozvětvená makromolekula.[1]

**Jednotné přednosti PE :** nízká hustota ve srovnání s ostatními plasty, vysoká houževnatost za doprovodu vysoké tažnosti a také odolností proti rázům, velmi dobré elektrické a dielektrické vlastnosti (kabelářský průmysl), malá nasákavost, vysoká odolnost proti korozi.

**PE-LD** – je měkčí, ohebnější, má lepší rázovou a vrubovou houževnatost při nízkých teplotách, má nižší teplotu tání (105-110 °C), nižší tvarovou stálost za tepla (Vicat B 40°C), nižší pevnost (8-10 MPa), nižší modul pružnosti v ohybu (100-200 MPa), svařuje se.

**PE-HD** – je tvrdší a tužší, nepatrně křehčí, vyšší teplota tání (130-135°C), vyšší tvarová stálost za tepla (Vicat B 70-75°C), vyšší pevnost (20-30 MPa), vyšší modul pružnosti (700-1000 MPa v ohybu), také se svařuje. [1]

### **Polypropylén (PP)**

Patří mezi klasické a velmi často používané polymery zejména díky výhodné kombinace jeho ceny a také užitečných vlastností. Je semikrystalický termoplast. Mezi nejvýznamnějšího používání PP patří zejména vlákna, obalová technika, díly automobilů, domácích spotřebičů a různých druhů spotřebního zboží. V současné době má velký význam PP také pro výrobu PP trubek pro rozvod vody s výrazným ekologickým a ekonomickým dopadem.

Polypropylén má také široké možnosti jeho modifikace, jak jinými polymery, tak také použitím různých plniv (částicové a vláknité plniva). Lze tímto způsobem vyvažovat vzájemný poměr mezi pevností a houževnatostí. Kompozity nebo také směsi obsahující PP dosahují takových vlastností, že se mohou používat jako náhrada za kovové materiály popř. za konstrukční plasty s vyšší cenou. Mezi velmi časté modifikace patří zejména částicové plnivo eleastomeru nebo také krátké skleněné vlákna.

Mezi nejčastější částicové plniva patří např. vápenec, mastek, slída. Tyto materiály se do PP matrice přidávají ve formě prášku. Jeho zrnitost nepřesahuje většinou hodnotu 10 µm. Čím větší je podíl plniva v matrici, tím větší je modul pružnosti E, avšak tažnost ve většině případů klesá. Tak např. přidáním cca 20 objemových % prášku do PP můžeme dosáhnout až 2 násobné velikosti modulu pružnosti oproti neplněné hodnotě modulu pružnosti PP.

Houževnatost kompozitu oproti polymerní matrici je však obvykle nižší, protože plnivo snižuje podíl polymerní složky, která má ty vlastnosti, že dokáže pohlcovat mechanickou energii, což má za následek snížení houževnatosti a zvýšení křehkosti materiálu. Experi-

mentální zkoušky nám však ukázaly, že malé množství mikromletého vápence (asi tak do 10 %), může zvýšit, jak pevnost v tahu, tak současně zvýšit houževnatost. [1]

Je nutné ale vědět, že příliš vysoká koncentrace plniva, což je asi 20% a více, zavede do materiálu tolik defektů, že jejich účinek bude tak vysoký až bude převažovat nad mechanismy brzdící začátek lomu a houževnatost nám klesne.

Můžeme tedy říci, že kombinování termoplastů s vlákny, vede ke zvýšení tuhosti a pevnosti, tvarové stálosti a odolnosti proti vyšším teplotám. Mezi nejčastěji se vyskytujícími vlákny v termoplastické matrici patří zejména vlákna: krátké skleněné vlákna, uhlíkové, aramidové, popř. jejich vzájemné kombinace. Kromě samotné pevnosti a tuhosti používaných vláken, má také na vlastnosti daného kompozitu samozřejmě vliv jejich objemové zastoupení v matrici, a také závisí na jejich orientaci a na soudržnosti mezi matricí a danými vlákny.

Ihned po obalové technice je automobilový průmysl největším spotřebitelem PP. Jeho velkou výhodou je, že nekoroduje a že šetří hmotnost. Používá se např. pro zadní kryty světlometů, rozvody chladící kapaliny, díly z topení, atd. [1]

### **Polyamidy (PA)**

Patří mezi semikrystalické termoplasty. Jejich krystalický podíl se pohybuje v rozmezí 20-40 %. Jsou tuhé a pevné, avšak s výraznou mezí kluzu a vysokou houževnatostí. Mají vysoké hodnoty tečení, trvalá odolnost proti teplu činí zhruba kolem 80 °C. Jeho odolnost proti UV záření a odolnost proti povětrnostním podmínkám je nižší. Navlhavost je pro různé typy různá. Typy, které jsou navlhavé, ztrácejí po vysušení houževnatost a tažnost a stoupá nám pevnost a tuhost. Tyto typy termoplastů neodolávají kyselinám, louhům, glykolům a horké vodě. Jednotlivé druhy polyamidů se označují číslicemi jako počet uhlíkových atomů ve výchozích monomerech.

### **Polyvinylchlorid (PVC)**

Patří mezi amorfní termoplasty, které mají vyšší tuhost a pevnost a nízkou tažnost a houževnatost a to zejména za nižších teplot (pod -5°C). Odolnost vůči teplu je nízká a to asi 60 °C trvale. Odolnost PVC vůči povětrnosti a korozi je za napětí lepší než u polyolefinů.

Vyznačuje se velmi dobrou odolností proti kyselinám, louhům, alkoholům, olejům a tukům, částečně také rozpouštědlům a chlorovaným uhlovodíkům. I když houževnaté typy

mají nižší pevnost a tuhost, jsou odolnější proti UV záření a také proti povětrnosti. U měkčených typů zase s rostoucím podílem změkčovadla klesá tvrdost a pevnost avšak stoupá odolnost tlumení vůči vibracím a rázům.

PVC je nejpoužívanější plast ze všech typů, což je dáno především jeho schopnosti vyskytovat se v mnoha podobách, v jeho kvalitě fyzikálních a chemických vlastností a jeho schopnosti vyhovět odlišným požadavkům. Vyskytuje se např. v automobilovém průmyslu, obalové technice, trubky pro stavebnictví, oděvní průmysl, atd. Přidáváním různých přísad nabízí stále další možnosti jeho využívání.

Bez změkčovadel je PVC tvrdý plast, popř. do 5 % změkčovadel, což jsou právě např. odpadní trubky ve stavebnictví. Protože je nekrytalický polymer umožňuje vyrobít výrobky krásné průhlednosti. PVC má malý sklon k tečení, což má význam zejména pro aplikace jako jsou např. tlakové rozvody (životnost až 50 let). Mezi další výborné vlastnosti PVC patří také jeho odolnost proti stárnutí způsobené slunečním zářením (okenní rámy).

Je to materiál s malou propustností vodní páry, ale také kyslíku a oxidu uhličitého. Je také dobrým elektrickým izolantem. [1]

### **Polystyrén (PS)**

Patří mezi amorfní termoplasty. Tento druh polymeru je tvrdý a tuhý, ale také pevný, ale s nízkou tažností a houževnatostí. Hodnota tečení je poměrně nízká. Odolnost vůči vyšším teplotám se pohybuje kolem 60 až 80 °C. Odolnost vůči UV záření, povětrnostním podmínkám a korozi za napětí je nízká. Jako houževnatý PS označujeme kopolymer styren - butadién. Čím větší je podíl butadiénu, tím je menší tvrdost, tuhost a také pevnost, ale zvyšuje se tažnost a rázová houževnatost.

### **Polykarbonát (PC)**

Je amorfní termoplast, který se vyznačuje střední tuhostí a vyšší pevností. Jeho mechanické vlastnosti se s teplotou mění jen málo. Rázová a vrubová houževnatost je vysoká, avšak tečení je malé. Trvale odolává teplotám zhruba do 100 °C. Odolnost proti korozi a odolnost proti povětrnostním podmínkám za napětí je nižší. Jeho navlhavost je prakticky zanedbatelná. Tento druh polymeru odolává slabým kyselinám, benzínu a olejům, avšak neodolává louchům, aromatickým a chlorovaným uhlovodíkům a rozpouštědlům.

### Kopolymer styrén-akrylonitril (SAN)

Je amorfní termoplast. Tento druh polymeru má na rozdíl od PS vyšší jak tuhost, tak i pevnost a také rázovou a vrubovou houževnatost. Také má vysokou mez únavy. Teplotní a chemická odolnost, odolnost proti povětrnostním podmínkám a korozi za napětí je dokonce výrazně vyšší než u polystyrénu. [1]

### Kopolymer akrylonitril-butadién-styrén (ABS)

Patří mezi amorfní termoplasty. Jeho pevnost, tuhost a tažnost je téměř srovnatelná s houževnatým polystyrénem. Jeho rázová a vrubová houževnatost je i za nízkých teplot podstatně vyšší. Odolnost proti povětrnostním podmínkám je však nízká, ale odolnost proti korozi za napětí je podstatně vyšší než u polystyrénu. Co se týká chemické odolnosti, je srovnatelná s odolností SAN.

Největší význam z reaktoplastů mají polyesterové (UP) a epoxidové (EP) pryskyřice, které tvoří matrice vláknitých kompozitů a laminátů. Epoxidové pryskyřice mají po vytvrzení za vyšších teplot dobrou chemickou odolnost, jsou tužší a pevnější než polyesterové pryskyřice. Rovněž mají zvýšenou odolnost proti některým rozpouštědlům.[1]



Příklady aplikací termoplastů

Obr. 1. Příklady aplikace plastů z praxe

## 2 TVAROVÁNÍ (FORMOVÁNÍ)

Výrobní postup, u kterého polotovar (deska, fólie, trubka, apod.), mění tvar bez většího přemísťování částic hmoty, přičemž se může uplatňovat vliv teploty nebo také tlaku, ale nemusí. Patří sem např. (ohýbání trubek, tvarování desek, výroba dutých těles, spojování a spékání plastů, apod.). Vždy se jedná o výrobky jednoduchých tvarů. [5]

### 2.1 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). Tvarováním za tepla můžeme zpracovávat desky ze všech termoplastů, ale nejčastěji se jedná o styrenové plasty (hPS, ABS, PVC a jejich kopolymerů, PMMA, PC, PET, PE, PP).

K tvarování se nejčastěji používají desky z jednoho druhu plastu (jednovrstvé), ale je možno také tvarovat desky vícevrstvé. Vícevrstvé desky však kladou na tvarovací technologii větší nároky. Podle velikosti síly se tvarování dělí na *mechanické* a *pneumatické* a to se dělí na *podtlakové* a *přetlakové*. Podle tvaru výrobku se dělí na negativní, (což je tvarování do dutiny a pozitivní, (což je tvarování na tvárník) a také na kombinované.

Podle způsobu přetvarování se rozděluje na tvarování s mechanickým a nebo pneumatickým přetvarováním.

Při tvarování se musí plast rovnoměrně zahřát na takovou teplotu, při níž vykazuje dobrou tvarovatelnost. Plastová deska se ohřívá při tloušťce do 3 mm z jedné strany, při tloušťce nad 3 mm se ohřívá z obou stran (kvůli špatné tepelné vodivosti termoplastů). Je velmi důležité rovnoměrné prohřátí desky ve všech tvarovaných místech.

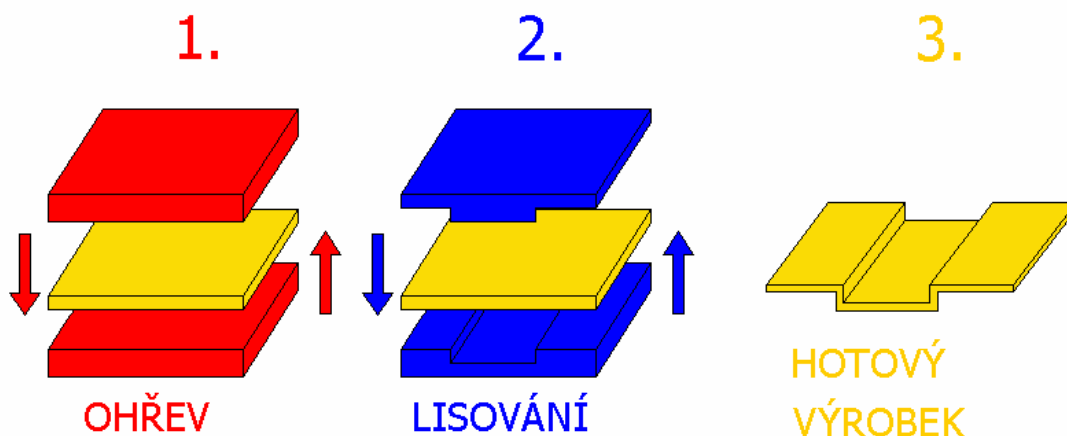
Maximální tažnost hmoty je samozřejmě dána typem plastu. Pro amorfní termoplasty se tato teplota nachází pod teplotou viskózního toku  $T_f$ , tj. hmota se nachází v kaučukovitě elastickém stavu. U krystalických plastů se tato teplota nachází těsně nad teplotou tání  $T_m$ . Amorfní plasty se ohřívají kratší dobu než semikrystalické. [5]

Je-li teplota tvarování nižší než je optimální teplota pro tvarování daného plastu je nutné při tvarování působit na tvarovaný materiál větší silou. Je to dáno tím, že pevnost materiálu je větší a tedy jsou v něm poměrně velká vnitřní pnutí. Po překročení optima plast rychle ztrácí soudržnost a při tvarování se trhá, tvarování tedy probíhá v chladné formě. Musí proběhnout v co nejkratší době, aby teplota plastového materiálu byla při tvarování konstantní. Volí se proto nejvyšší rychlost tvarování, jakou daný plast umožní. Výsledný tvar tedy musí proběhnout v jednom tvarovacím cyklu. Vnitřní pnutí, které je zejména způsobené orientací makromolekul by při opětovném zahřátí způsobilo deformaci předtvarovaného dílu, který má snahu vrátit se do původního tvaru desky (tvarová paměť). [5]

### 2.1.1 Mechanické tvarování

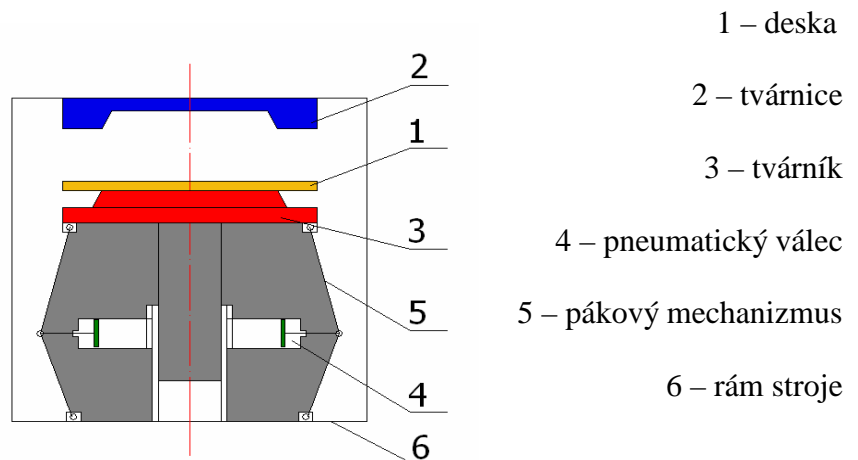
Lze využít různých konstrukcí lisů (lisovacích strojů). Mechanické tvarování však umožňuje vyrábět výrobky omezené hloubky, protože při tomto způsobu zpracování dochází k nepříznivému zeslabování stěn. U tohoto způsobu tvarování se změny tvaru polotovaru dosahuje jednotlivými částmi dvoudílné formy. Tento způsob tvarování umožňuje pracovat s vyššími tvarovacími tlaky. [5]

#### Schéma mechanického tvarování



Obr. 2. Mechanické tvarování

### a) Mechanické tvarování desek

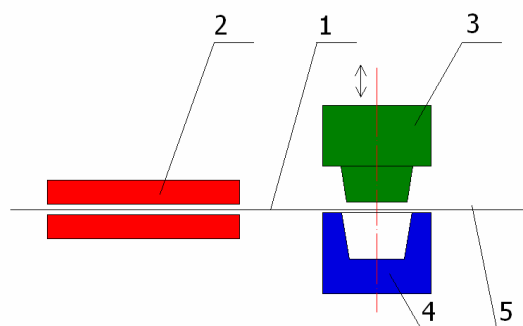


Obr. 3. Tvarovací lis

### b) Mechanické tvarování fólií

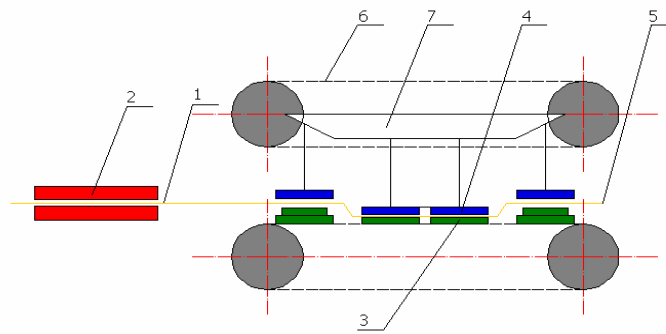
Vzhledem k malým tloušťkám je možno ohřev zařadit přímo do tvarovacího procesu. Stroje pro mechanické tvarování fólií mohou pracovat cyklicky a nebo kontinuálně. K ohřevu dochází konvekcí (cirkulujícím horkým vzduchem), kondukcí (kontaktem fólie s ohřívanou plochou), pomocí zářičů popř. kondukcce a sálání. 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 vystřižnut a zůstává na tvárníku, ze kterého je stažen vyhazovačem. Vyhazovač je ovládán mechanicky nebo pneumaticky. Nevýhodou je složitá konstrukce, nutnost výroby velkého množství forem. [5]



Obr. 4. Tvarování fólií – cyklické





Obr. 5. Tvarování fólií - kontinuální

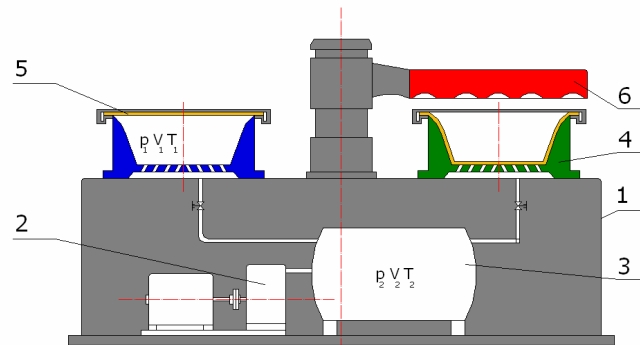
1 – fólie, 2 – ohřívací tunel, 3 – tvárník, 4 – tvárnice, 5 – zbytek fólie, 6 – nosný řetěz ,  
7 – šablona

### 2.1.2 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. V dnešní době se tvarováním zpracovávají desky s tloušťkou až 10 mm a fólie od tloušťky 0,3 mm. U výrobků, které jsou vyráběny tepelným tvarováním je charakteristický vysoký poměr délky ku tloušťce stěny výrobku. Tvarování má oproti vstřikováním velkou výhodu v tom, že není potřeba tak složitých tvarovacího stroje a tvarovací formy, což má samozřejmě velký finanční význam. Nevýhodou tvarování oproti vstřikováním je větší cena desek oproti granulátu, která může být až dvojnásobná a také dosti velký technologický odpad. Někdy podíl odpadu může činit až cca 50 % zpracovávaného materiálu, což je značně nevýhodné. Platí zde určitá omezení na výrobu, např. není možné tímto způsobem vyrábět výrobky s kompaktními žebry, nebo také výrobky v jejichž stěně se má umístit různé kovové vložky (zalisování je obtížné). [5]

### a) Pneumatické tvarování desek



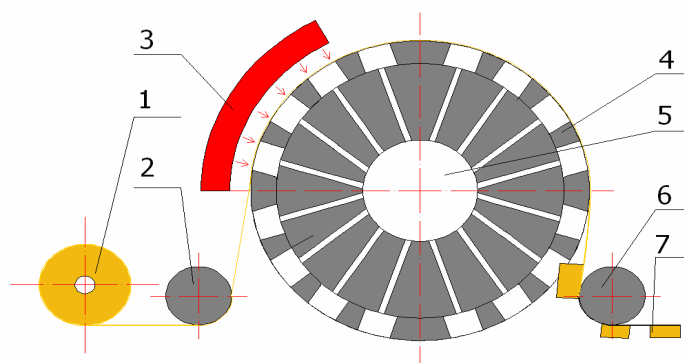
Obr. 6. Dvojitý podtlakový tvarovací stroj na desky

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

Deska 5 je upnuta nad tvárnicí 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. [5]

### b) Pneumatické tvarování fólií

Kontinuálně pracující podtlakové rotační zařízení na výrobu kelímků ukazuje následující obrázek (Obr.7). Fólie je odvíjena z balíku 1 přes váleček 2 a je zaváděna pod topný panel 3. Tvárnice 4 jsou spojeny odsávacími kanálky s podtlakovou komorou 5. Vnější přetlakem dojde k vytvarování a ochlazení. [5]



Obr. 7. Rotační tvarovací stroj

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

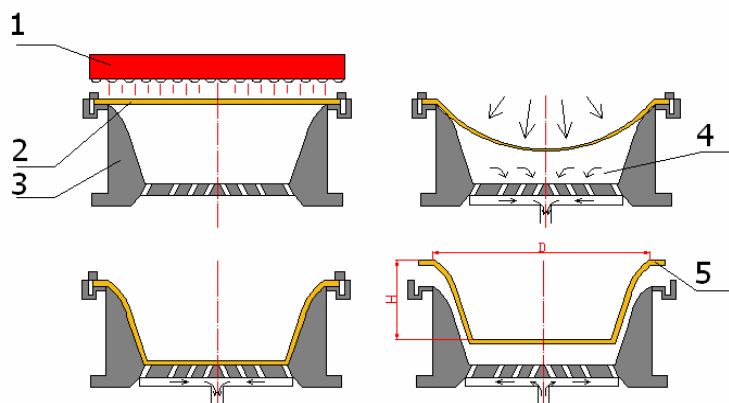
U pneumatického tvarování můžeme formovat plast do mnoha různých tvarů. Na ručních strojích lze zpracovávat materiál tloušťky od 1 do 12 mm a rozměrech i v metrech (3 x 1,5 m). Každý materiál má odlišný způsob zpracování a má také jiné vlastnosti při zpracování. Můžeme zpracovávat velké množství materiálů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

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.

Máme různé technologie pneumatického tvarování, například: negativní pneumatické tvarování, pozitivní pneumatické tvarování atd. [5]

### 2.1.2.1 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. [5]



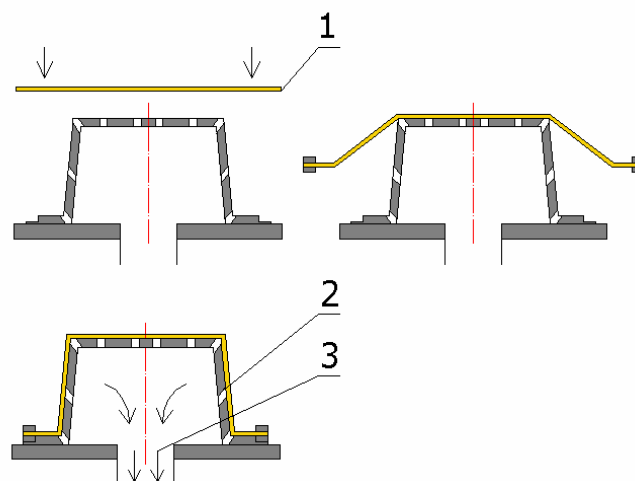
Obr. 8. Negativní pneumatické tvarování

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

V první fázi se při negativním tvarování deska upevní do rámu stroje a pomocí ohřívacího panelu se zahřeje na teplotu vhodnou pro tvarování. V druhé a třetí fázi nám deska přejde do pružného stavu, vzduch se z dutiny vakuově odsaje a podtlak nám stlačí desku do požadovaného tvaru dutiny formy. V poslední fázi, až je deska dostatečně ochlazená, se vyjme z dutiny formy a to ručně nebo stlačeným vzduchem (viz. Obr.8 ). [5]

### 2.1.2.2 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  $H/D = 1$ . [5]



Obr. 9. Pozitivní pneumatické tvarování

1 – plastová deska, 2 – forma, 3 – stlačený vzduch

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. Deska se ztenčuje jen v bočních stěnách výtažku a to rovnoměrně, ve dně se neztenčuje protože se dotýká formy. Výrobek má tak po vytváření nejtlustší dno. Nevýhodou tohoto způsobu tvarování je zejména to, že při malých úhlech skosení bočních stěn budoucího výrobku může způsobit to, že se výrobek po ochlazení bude velmi špatně vyhazovat z formy. Může to vést až k poškození výrobku (prasknutí, promáčknutí hran).[5]

### 2.1.2.3 Tvarovací formy a stroje

Tvarovací stroje jsou většinou jednoduché a jedná se o stolové konstrukce. Pohyb může být ovládán hydraulicky, pneumaticky a nebo mechanicky. Rám pro uchycení tvarované desky bývá obalen pryží a upínání desky se realizuje mechanicky a nebo pneumaticky. K ohřívání desky určené pro tvarování se nejčastěji používají sálavé zdroje tepla, infrazářiče a nebo různé pece. Tvarovací stroje bývají velmi často součástí různě uspořádaných linek, které materiál před tvarováním, ale také po vytvarování ještě různě upravují pomocí různých zařízení.

Mezi výhody tvarování termoplastických desek patří to, že se používají jednodílné formy, kde funkci druhého dílu formy přebírá stlačený vzduch. Tvarovací síly jsou menší, a proto formy mohou být z málo pevných materiálů. Je však důležité, aby materiál formy snesl po krátkou dobu rozmezí teplot mezi 20 a 200 °C. Formy musí být opatřeny odsávacími otvory pro přísun stlačeného vzduchu. Otvory musí být rozmístěny rovnoměrně po ploše formy, aby nedošlo k uzavření vzduchu v některém místě dutiny. Otvorů musí být dostatečný počet a také musí mít optimální průměr, který je závislý na druhu plastu, ale také na tloušťce plastové desky. Formy s příliš velkým průměrem otvorů, pak zanechávají na výrobku viditelné otisky, což je nežádoucí.

Průměr otvoru kanálku by neměl být větší než je polovina tloušťky tvarované desky. U polyolefinů, které se vyznačují dobrou tvarovatelností bývá průměr těchto kanálků mezi 0,4 - 0,5 mm a to i pro tlustší desky. U desek z PVC mohou mít průměr větší. Vzdálenost mezi otvory bývá na rovných plochách 75 – 150 mm, na hranách jen 20 mm. Vždy je výhodnější volit větší počet menších kanálků, než menší počet větších kanálků. Je důležité, aby tvarovací síla působila na výtažek po celou dobu jeho chlazení, jinak by došlo k deformaci výrobku. [5]

#### **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 – velkosériová výroba, vyšší cena, dobrý povrch a značná trvanlivost. Vyrábějí se odléváním a dodatečným obrobením funkčních ploch.
3. Ocelové formy – hromadná výroba, jsou nejtrvanlivější, ale používají se málo.

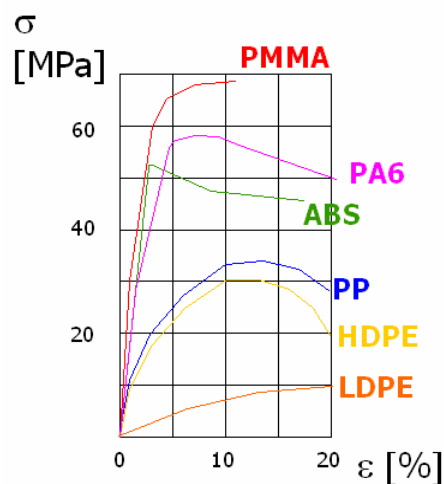
4. Sádrové formy – hodí se jen pro zhotovení několika kusů, protože sádra vlivem teplotním změn velmi často po kratší době praská.
5. Formy z tvrzené tkaniny – mohou se použít na výrobu až 20000 kusů. Je u nich však obtížné dosáhnout leštěním hladkého povrchu, podobně jako u dřevěných forem, proto je lepší tvrzené dřevo.
6. Formy odlévané z epoxidových pryskyřic – kvalitní povrch i dobrá rozměrová stabilita. Špatná tepelná vodivost formy se vynahrazuje přidáním litinového a nebo hliníkového prášku popř. se do formy mohou zalít měděné trubky kterými pak protéká chladicí kapalina. [5]



*Obr. 10. Ukázky různých tvarovacích strojů*

### 3 MECHANICKÉ VLASTNOSTI POLYMERŮ

Vedle pevnosti je základní technickou charakteristikou každého konstrukčního materiálu jeho tuhost. V širším smyslu chápeme tuhost jako poměr působícího mechanického zatížení k deformaci výrobku, kterou toto zatížení vyvolá.<sup>1</sup> Čím vyšší je tento poměr, tím je výrobek více tuhý a naopak. V užším smyslu se tedy tuhost materiálu definuje jako směrnice tečny na počátku závislosti napětí na deformaci a to při jednoosé tahové popř. ohybové zkoušce. Tato hodnota se běžně v praxi označuje jako Youngův modul pružnosti s označením **E**.



Obr. 11. Porovnání modulů pružnosti některých termoplastů

#### 3.1 Modul pružnosti a krátkodobé mechanické chování

Modul pružnosti patří k nejčastěji používaným parametrům, které popisují mechanické chování těles. Zjišťuje se na základě statických testů (pomocí trhací zkoušky), jako poměr mezi mechanickým napětím a relativní zkrácení (prodloužení). Modul pružnosti je dán jako poměr působícího namáhání  $\sigma$  k poměrné deformaci  $\varepsilon$ , která toto namáhání vyvolává tj.

$E = \sigma / \varepsilon$ . Modul pružnosti vychází z Hookeova zákona. [1]

**Platí tedy:**

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad \text{pak} \quad \sigma = E \cdot \varepsilon \quad \text{nebo} \quad \varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (1)$$

kde: E – modul pružnosti [MPa]

$\sigma$  - napětí od zatížení [Mpa],

$\varepsilon$  - poměrné prodloužení [%]

Obr. 12. Obecný tvar závislosti funkce  $\sigma(\epsilon)$ 

**Při krátkodobém namáhání vzorku (trhací zkouškou) se tedy může zjistit:**

1. Mez kluzu  $\sigma_e$
2. Mez pevnosti  $\sigma_p$
3. Tažnost A
4. Modul pružnosti v tahu E
5. Celkové chování materiálu při deformaci

Z těchto hodnot pak také můžeme odvodit:

- dovolené namáhání v tahu
- dovolené namáhání ve smyku

### Mez kluzu a pevnosti

*Mez kluzu v tahu  $\sigma_e$*  - homogenní, houževnaté, semikrystalické plasty

*Mez pevnosti v tahu  $\sigma_p$*  - plněné, křehké, amorfnní plasty a reaktoplasty

*Mez pevnosti v tlaku  $\sigma_d$*  - pro houževnaté materiálu se vlastně rovná pevnosti v tahu, pro křehké materiály je asi zhruba o 30% až 60 % vyšší než pevnost v tahu

Je jasné, že hodnoty  $\sigma_e$  a  $\sigma_p$  se s zvyšující se teplotu snižují a při dlouhodobém zatížení.

Je také důležité vědět, že orientací struktury materiálu (např. vyztužení skleněnými vlákny) ve směru podélném, způsobuje zvýšení pevnosti v tomto směru, avšak snížení ve směru příčném. [4]



Při vstřikování tvarově složitějších výrobků se v dutině formy stýkají 2 čela proudu taveniny, které po jejich spojení vytvářejí tzv. *studený spoj*. Toto také vzniká např. při obtékání nějakého jádra ve formě. Studené spoje mají negativní vliv na pevnost daného výrobku. Proto se při výrobě snažíme omezit počet studených spojů, což znamená vhodné umístění ústí vtoku do dutiny formy, aby se studený spoj vytvořil na takovém místě, které není vystaveno velkým namáháním. Jednotlivé typy polymerů jsou na studené spoje jinak citlivé.

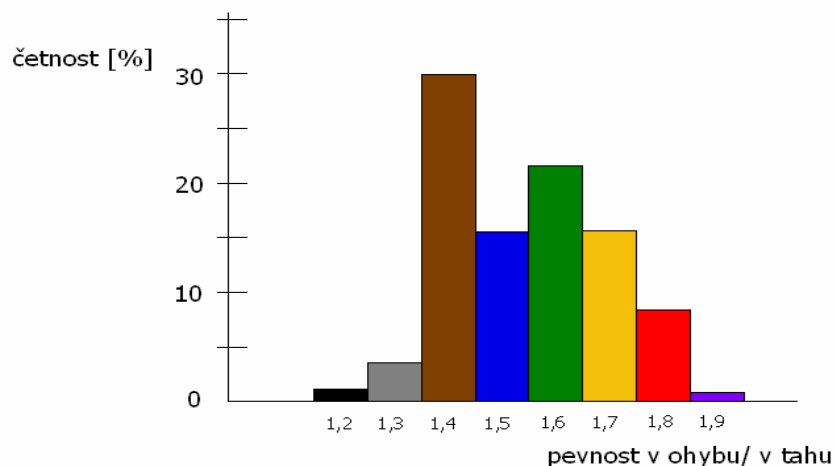
Můžeme je proto rozdělit na dvě skupiny:

**Křehké plasty (PS, PMMA)** – zde je pevnost studeného spoje i za optimálního provedení technologických podmínek při výrobě pouze zlomek základní pevnosti.

**Houževnaté plasty (PC, ABS, POM)** – zde je snížení pevnosti v místě studeného spoje pouze nepatrné.

Krátkodobé hodnoty tuhosti a pevnosti se v praxi u téhož plastu zjišťují testy v tahu a ohybu. Zejména hodnoty pevnosti v tahu a ohybu jsou pro každou aplikaci termoplastů důležitými a základními daty, z kterých se vychází. Na obrázku (Obr.13) můžeme vidět, že hodnoty meze pevnosti v tahu a ohybu jsou často značně odlišné.

Hodnota meze pevnosti v ohybu je v průměru více jak 1,5krát větší než hodnota meze pevnosti v tahu. [1]



Obr. 13. Diagram četnosti

Je to dáno zejména tedy tím, že standardní vyhodnocování meze pevnosti z ohybové zkoušky se řídí dle technické teorie ohybu neboli tedy dle lineárního rozložení deformace a napětí v celém průřezu vzorku. [1]

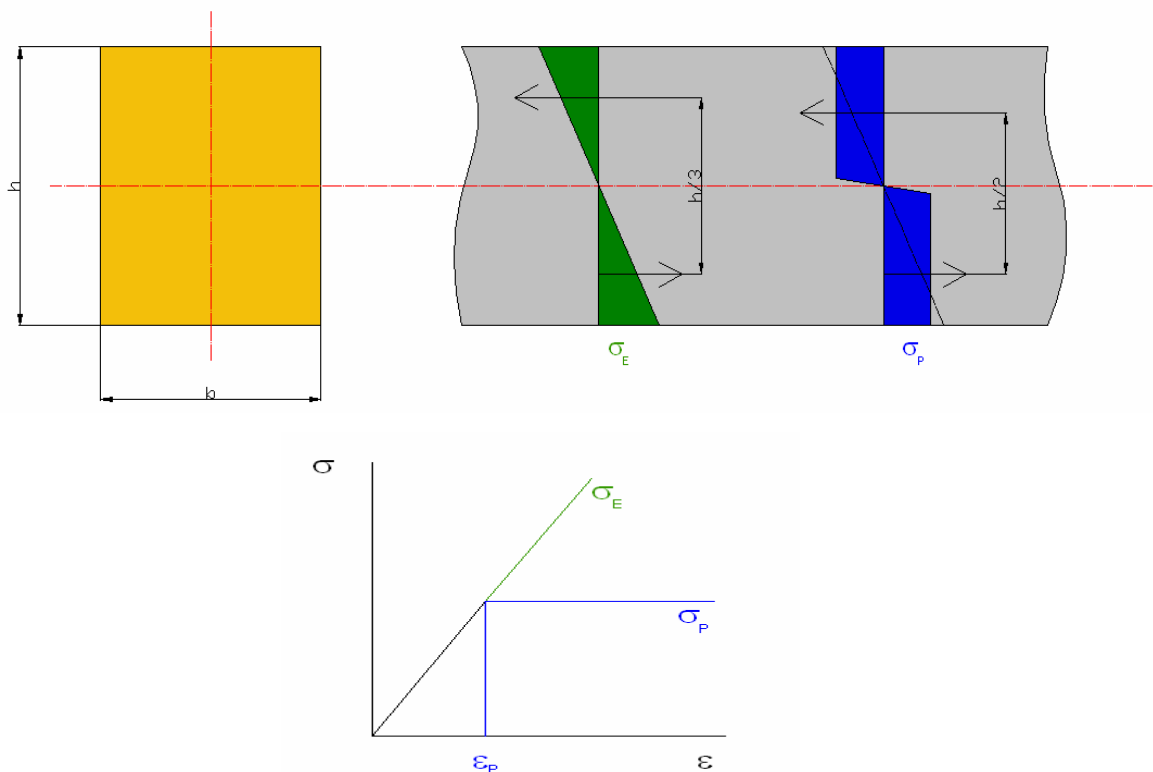
Kde platí:

$$M = \sigma_E \cdot \frac{b \cdot h}{2} \cdot \frac{h}{3} \Rightarrow \sigma_E = \frac{6 \cdot M}{bh^2} \quad (2)$$

Budeme-li idealizovat chování houževnatého termoplastu diagramem na obrázku (Obr.14), bude se po dosažení meze pevnosti a dalším zvyšováním zatížení tvořit v centrálním řezu a jeho okolí plastické zóny. V ideálním případě budou zasahovat celý průřez. [1]

Pak bude platit:

$$M = \sigma_P \cdot \frac{b \cdot h}{2} \cdot \frac{h}{2} \Rightarrow \sigma_P = \frac{4 \cdot M}{bh^2} \quad (3)$$



Obr. 14. Pružně plastický stav

Experimentálně zjištěná hodnota mezního ohybového momentu  $M$  z ohybové zkoušky udává při vyhodnocení ohybové zkoušky hodnotu meze pevnosti 1,5krát vyšší než je skutečná hodnota meze pevnosti  $\sigma_P$ . Z tohoto tedy vyplývá, že rozdíly mezi pevnostmi v tahu a ohybu jsou zejména zapříčiněni nesprávným vyhodnocením ohybových zkoušek vykazující plastické chování během ohybového testu. [1]

Běžně předpokládáme, že u nevyztužených plastů nedochází během technologického procesu k výraznější orientaci materiálové struktury, takže můžeme tyto materiály považovat za prakticky izotropní, tedy materiály vykazující stejné vlastnosti ve všech směrech.

Pro určení lineárně elastických deformací nějakého izotropního 3D tělesa pak postačují 2 elastické konstanty a to obvykle modul pružnosti  $E$  a také Poissonův poměr kontrakce  $\nu$ . Obě tyto hodnoty závisí na druhu materiálu a lze je dohledat v materiálových tabulkách.

Plasty popř. jejich elastické konstanty jsou výrazně závislé na teplotě. Se zvyšující se teplotou klesá modul pružnosti, avšak hodnota kontrakce se zvyšuje. Současně se zvyšuje také koeficient teplotní roztažnosti. Pokud tedy vystavíme materiál z plastu zvýšené teplotě, tak hodnota deformace vlivem teplotní dilatace má pro izotropní materiál všeobecný vztah: [1]

$$\varepsilon^T = \alpha \cdot \Delta T \quad (4)$$

kde:  $\varepsilon^T$  - poměrné prodloužení vlivem teploty [%]

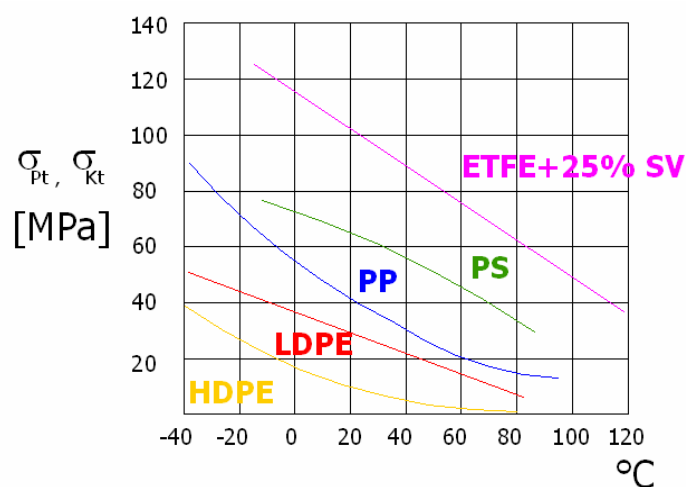
$\alpha$  - koeficient teplotní roztažnosti materiálu [ $^{\circ}\text{K}^{-1}$ ]

$\Delta T$  - rozdíl teplot ( $T_o - T_m$ ) [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$T_o$  - teplota okolí ( $20^{\circ}$ ),

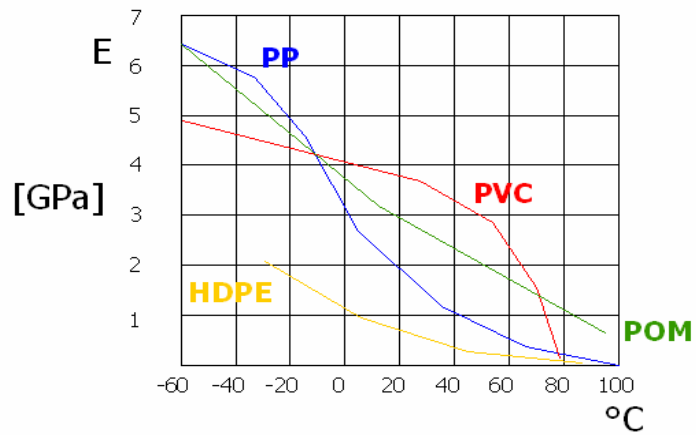
$T_m$  - teplota montážní (zvýšená teplota)

Na obrázku (Obr.15) vidíme, jak velký má teplota vliv na vlastnosti plastů. Jsou zde zobrazeny křivky vybraných plastů a pokles jejich meze pevnosti (meze kluzu) v závislosti na zvyšující se teplotě.

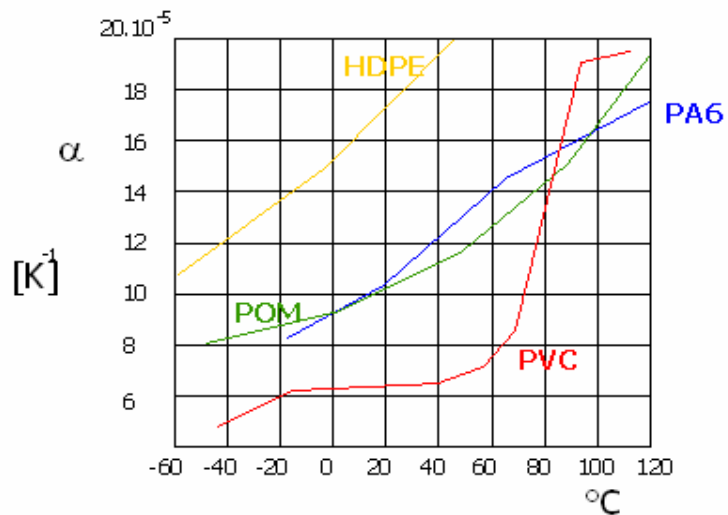


Obr. 15. Závislost meze pevnosti na teplotě

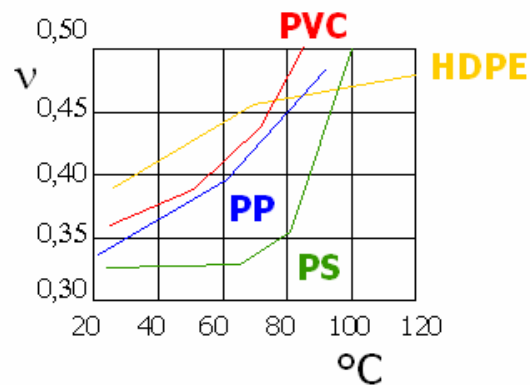
V níže uvedených grafech můžeme vidět jednotlivé závislosti konstant na zvyšující se teplotě pro vybrané termoplasty.



Obr. 16. Závislost modulů pružnosti na teplotě



Obr. 17. Závislost koeficientu teplotní roztažnosti na teplotě



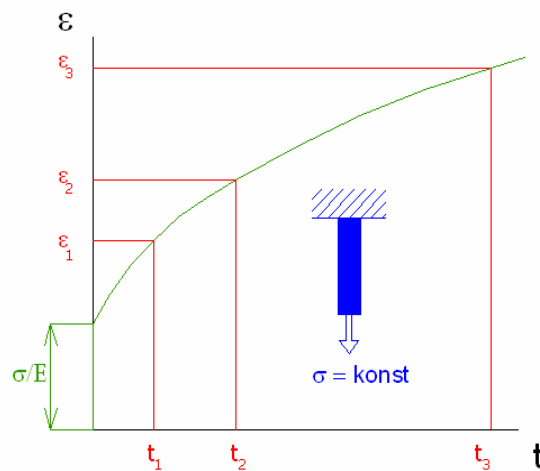
Obr. 18. Závislost kontrakce na teplotě

### 3.2 Modul pružnosti a dlouhodobé mechanické chování

V důsledku velkého viskoelastického chování termoplastů i za běžných teplot nemůžeme pro správný odhad chování konstrukcí při dlouhodobém zatěžování vycházet z krátkodobých materiálových dat.

Stav napětí a deformace nejsou závislé jenom na okamžitém zatížení, ale také na historii zatěžování od počátku využití. V nejjednodušším případě je vzorek nějakého termoplastického materiálu zatížen v čase  $t = 0$  jednoosým tahovým napětím zvolené konstantní velikosti. Ihned po zatížení vzorku vykáže materiál vzorku pružnou deformaci známého vztahu  $\varepsilon = \sigma / E$ . Avšak s postupujícím časem poměrná deformace vlivem viskoelastického chování vzrůstá. Na základě těchto skutečností můžeme tedy sestavit závislosti napětí na deformaci pro čas  $t$ , kde jde o tzv. *modul tečení* resp. *creepový modul*. (viz. Obr.19). [1]

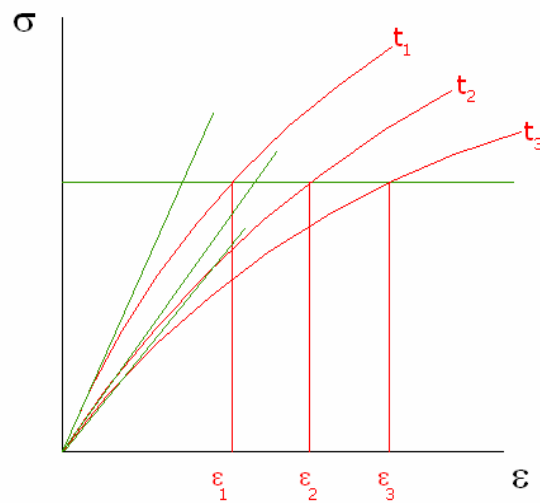
Platí: 
$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{E_t(t)} \quad (5)$$



Obr. 19. Creepový modul

Druhý případ, který sledujeme představuje tzv. relaxaci napětí. Opět je vzorek materiálu v čase  $t = 0$  protažen o zvolenou hodnotu deformace, která se však s postupujícím časem nemění. Zde sledujeme úbytek napětí v závislosti na čase a je to tzv. *relaxační modul*. [1]

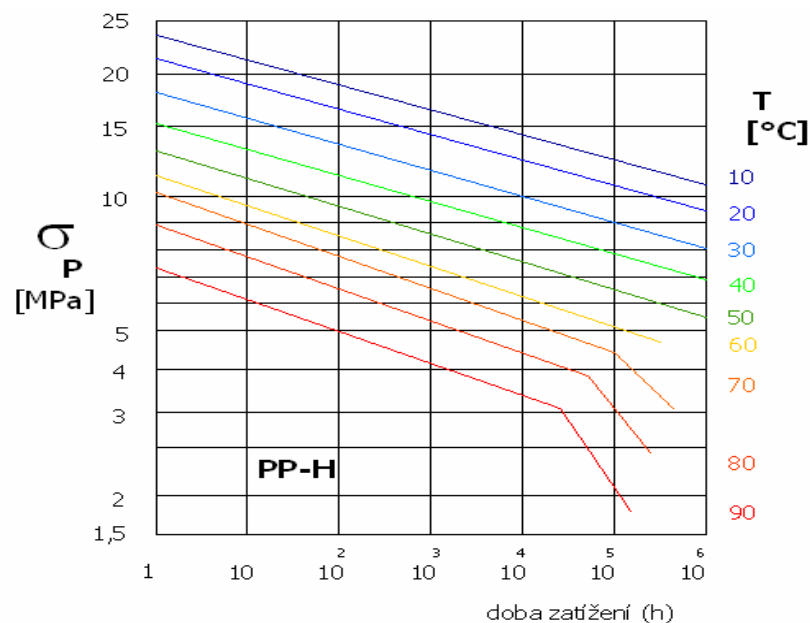
Platí: 
$$\varepsilon = \frac{\sigma(t)}{E_R(t)} \quad (6)$$



Obr. 20. Relaxační modul

Výsledky zkoušek, jak creeepu, tak relaxace nám ukazují, že hodnoty modulů v relaxaci a v tečení se pro shodné časy, teploty a úrovně namáhání u většiny polymerů nějak výrazně neliší. Pokud se nepočítá přesněji, můžeme tedy pro inženýrské účely pracovat s modulem tečení jako s časově, teplotně a napětově závislým kvazimodulem pružnosti.

Základní materiálovou charakteristikou pro návrh výrobku z plastu a posouzení jeho únosnosti v dané konstrukci je hodnota časově a teplotně závislé meze pevnosti. Na obrázku (Obr.21) vidíme hodnoty časových pevností na základě dlouhodobých testů (tzv. křivky životnosti).[1]



Obr. 21. Hodnoty časových pevností (trubka z PP-H)

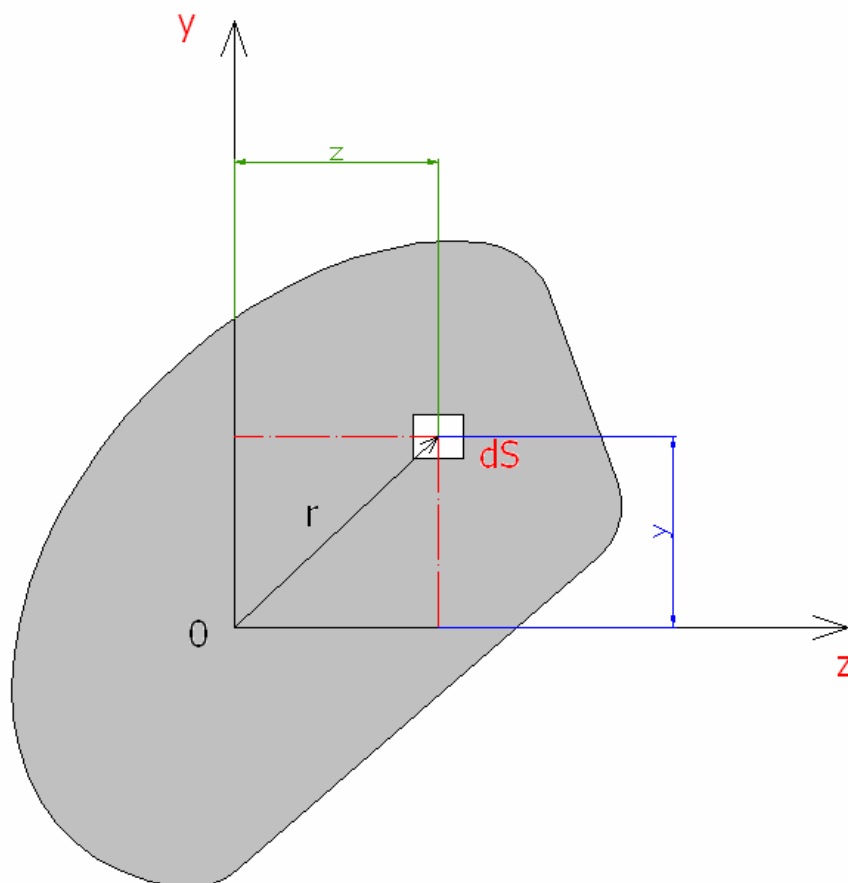
## 4 GEOMETRICKÉ CHARAKTERISTIKY PRŮŘEZU

### 4.1 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  $dS$ . [6]

$$\text{Platí} \quad U_z = \int_S y dS \quad (7)$$

$$\text{Stejně tak} \quad U_y = \int_S z dS \quad (8)$$



Obr. 22. Lineární moment průřezu plochy

## 4.2 Kvadratický moment průřezu

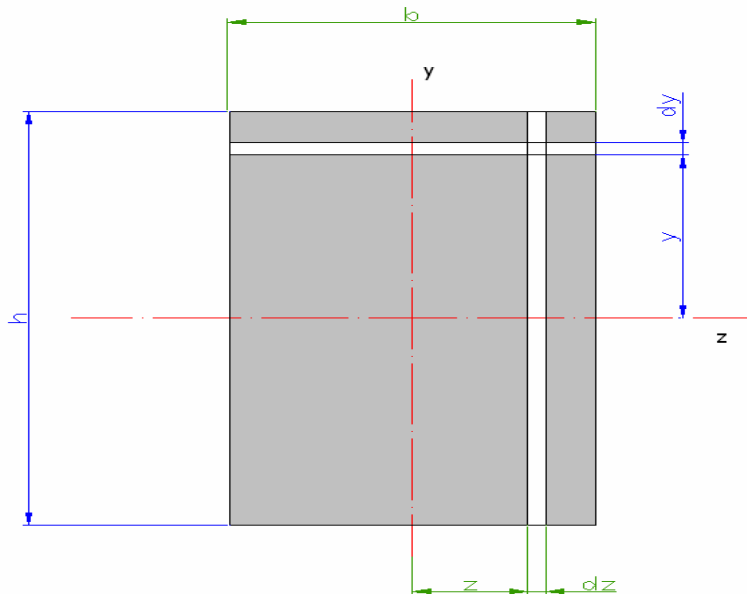
Kvadratický moment celého průřezu prutu o obsahu  $S$  k ose  $z$  popřípadě k ose  $y$ , která leží v rovině průřezu se určí součtem kvadratických momentů jeho elementárních částí. [6]

- k ose  $z$ : 
$$J_z = \int_S y^2 dS \quad (9)$$

- k ose  $y$ : 
$$J_y = \int_S z^2 dS \quad (10)$$

Kvadratické momenty základních tvarů průřezů

### 4.2.1 Obdélník



Obr. 23. Kvadratický moment průřezu obdélníka

-k ose  $z$ :

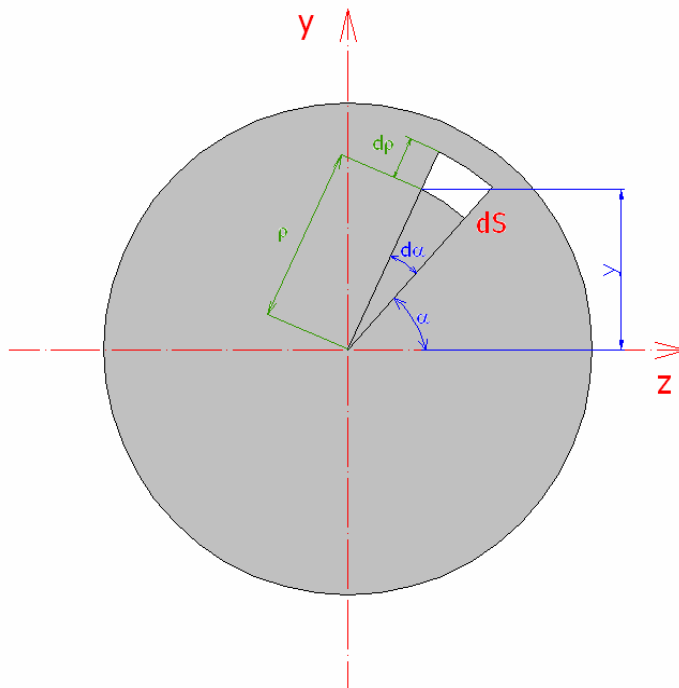
$$J_z = \int_S y^2 dS = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} y^2 \cdot b dy = b \cdot \left[ \frac{y^3}{3} \right]_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} = \frac{1}{3} \cdot b \cdot \left( \frac{h^3}{8} + \frac{h^3}{8} \right) = \frac{1}{12} b h^3 \quad (11)$$

- k ose  $y$ :

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



## 4.2.2 Kruh



Obr. 24. 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:

$$J_z = \int_S y^2 dS = \int_0^{2\pi} \int_0^r \rho^2 \cdot \sin^2 \alpha \cdot \rho \cdot d\rho \cdot d\alpha = \frac{r^4}{4} \int_0^{2\pi} \sin^2 \alpha \cdot d\alpha = \frac{\pi \cdot r^4}{4} = \frac{\pi \cdot d^4}{64} \quad (13)$$

- ose y:

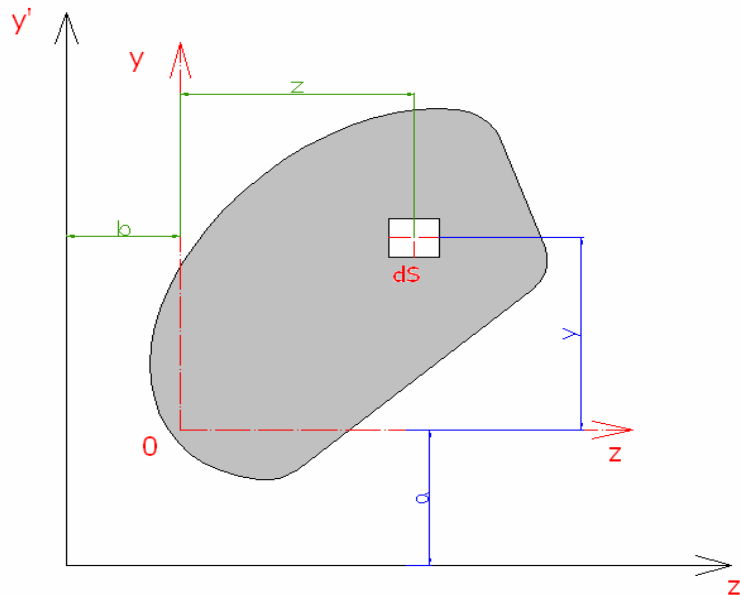
$$J_z = J_y \Rightarrow J_{z,y} = \frac{\pi \cdot d^4}{64} \quad (14)$$

Určení těžiště plochy:

$$\text{- osa z} \quad z_T = \frac{\sum z_i \cdot S_i}{S} \quad (15)$$

$$\text{- osa y} \quad y_T = \frac{\sum y_i \cdot S_i}{S} \quad (16)$$

### 4.3 Kvadratický moment průřezu k mimotěžišťové ose



Obr. 25. Kvadratický moment průřezu plochy k mimotěžišťové ose

Vyjádření pomocí tzv. Steinerových vět

$$\text{- k ose } z' : \quad J_{z'} = a^2 \cdot S + J_z \quad (17)$$

$$\text{- k ose } y' : \quad J_{y'} = b^2 \cdot S + J_y \quad (18)$$

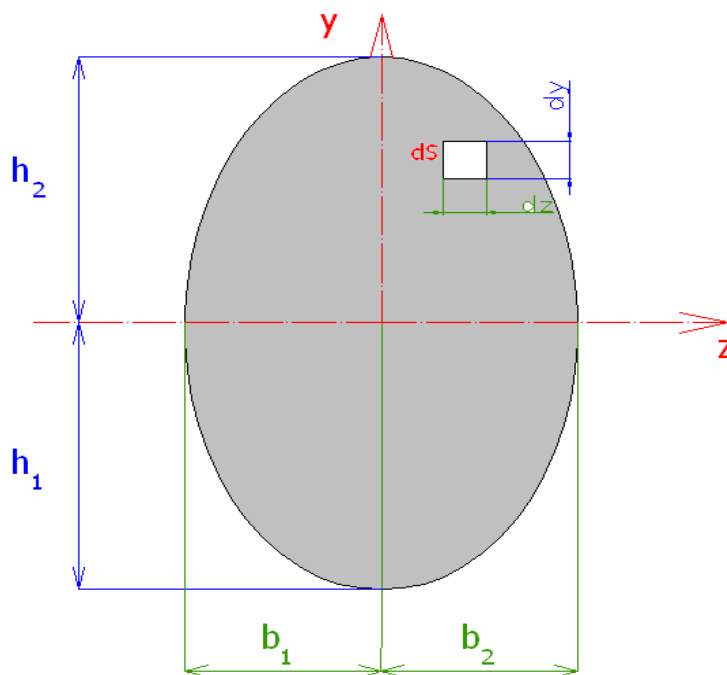
$$\text{- deviační moment k posunutým osám : } D_{z'y'} = a \cdot b \cdot S + D_{zy} \quad (19)$$

### 4.4 Polární kvadratický moment

Polární moment průřezu k počátku pravoúhlého souřadnicového systému se rovná součtu osových momentů k osám souřadnicového systému. [6]

$$J_p = \int_S r^2 dS = \int_S (y^2 + z^2) dS = \int_S y^2 dS + \int_S z^2 dS \Rightarrow J_p = J_z + J_y \quad (20)$$

## 4.5 Deviační moment



Obr. 26. Deviační moment tělesa

Vztah pro deviační moment

$$D_{zy} = \int_S z \cdot y \cdot dS = \int_{-h_1}^{h_2} \int_{-b_1}^{b_2} z \cdot y \cdot dz \cdot dy = \frac{1}{2} \int_{-h_1}^{h_2} y (b_2^2 - b_1^2) dy = \frac{1}{4} (b_2^2 - b_1^2) (h_2^2 - h_1^2) \quad (21)$$

Pokud je těleso alespoň podle jedné osy symetrické a pokud tato osa prochází těžištěm, pak je deviační moment roven nule. [6]

## 5 NAVRHOVÁNÍ TVARU VÝROBKŮ Z HLEDISKA TUHOSTI A PEVNOSTI

### 5.1 Tenkostěnné plastové 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. Jedná se tedy většinou o ohybové namáhání, protože tento druh namáhání je nejčastějším u výrobků. [1]

*Měníme-li v rámci (Kirchhoffovy teorie čistého ohybu) tloušťku tenkostěnného prvku při daných okrajových podmínkách, tj. uložení a zatížení, závisí hodnoty ohybových napětí nepřímo na kvadrátu poměru změny tloušťek tj.:*<sup>1</sup>

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \left( \frac{s_1}{s_2} \right)^2 \quad (22)$$

Z tohoto vztahu vyplývá, že pokud zvýšíme tloušťku stěny např. o 50 %, neboli tedy 1,5krát, sníží se ohybová napětí zhruba 2,25krát. Snížení napětí má pochopitelně vliv na deformaci. Ohybové deformace tedy při zvýšení tloušťky o 50 % poklesnou výrazněji a to zhruba 3,375krát. Mění se s třetí mocninou poměru změny tloušťek. Platí tedy: [1]

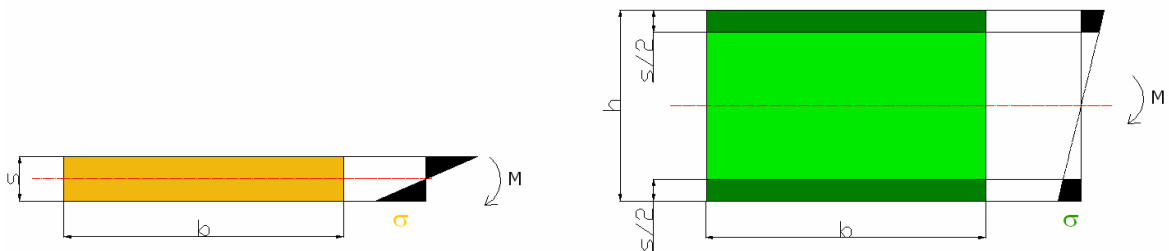
$$\frac{y_2}{y_1} = \left( \frac{s_1}{s_2} \right)^3 \quad (23)$$

Tenkostěnných profilů se vyrábí celá řada v různých provedeních a to v závislosti na jejich použití. Ohybová tuhost tenkostěnných profilů a ohybová únosnost je u nevyztužené hladké stěny velmi malá. Z hlediska geometrické stránky je to způsobeno tím, že hmota profilu je soustředěna poblíž střednice tj. tedy poblíž neutrální plochy nebo tedy plochy nulových ohybových napětí. *Ramena vnitřních sil v průřezech stěny jsou tedy malá, takže materiál stěny je při přenosu ohybových momentů málo využit.*

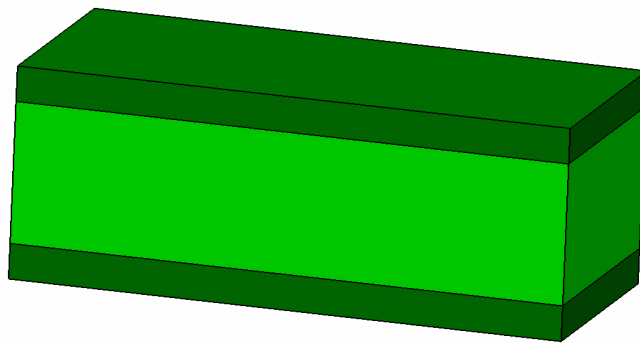
Pokud bychom chtěli zvýšit tuhost a pevnost profilu tím, že bychom zvětšovali tloušťku celého profilu, bylo by to velmi nevhodné a také málo účinné. Proto chceme zvýšit pevnost a tuhost daného profilu tak, abychom ušetřili materiálu a zároveň tedy zvýšili tu-

host i pevnost do požadovaných hodnot. Pro zvýšení pevnosti a tuhosti je tedy důležité, aby podstatná část průřezu profilu se nacházela ve větší vzdálenosti od neutrální plochy průřezu profilu. Poloha neutrální plochy je dána polohou těžiště průřezu (za předpokladu lineárně elastického chování).

Následující obrázek nám znázorňuje rozdíl mezi málo využitým (nalevo) a dobře využitým (napravo) materiálem dutého plošného profilu (sendviče). [1]



Obr. 27. Jednoduchá stěna vs. sendvičová stěna



Obr. 28. 3D pohled na sendvičovou stěnu

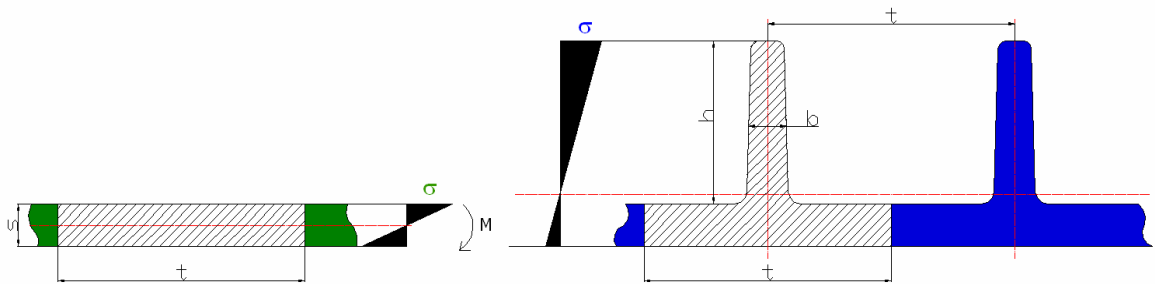
Vliv pěnového jádra sendvičového profilu zanedbáváme. Využití materiálu je v obou případech tedy stejné. Zvýšení tuhosti je však zřejmé už z výše uvedeného obrázku. Jasně vidíme rozdíl velikosti napětí při působení na tyto profily stejným ohybovým momentem. [1]. Pokud budeme chtít porovnat ohybovou tuhost mezi jednoduchou a sendvičovou stěnou profilu, bude platit pro:

$$s = 10 \text{ mm} , b = 30 \text{ mm} , h = 30 \text{ mm} \Rightarrow h/s = 3$$

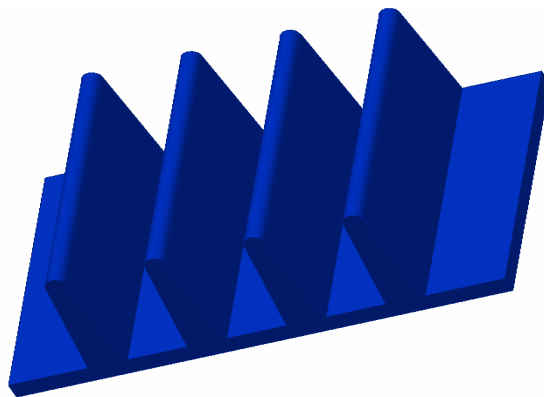
#### Poměrná ohybová tuhost

$$k_t = \frac{J}{J_o} = \frac{47500}{2500} = 19 \Rightarrow \text{Ohybová tuhost se nám tedy zvýšila 19krát!}$$

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.<sup>1</sup>

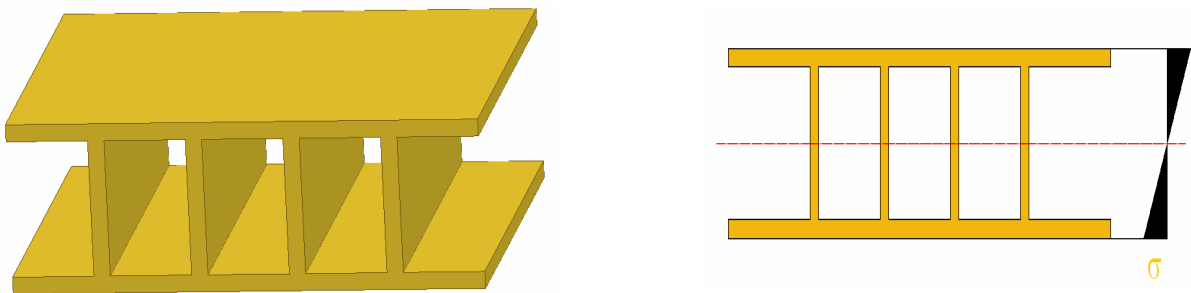


Obr. 29. Jednostranné vyztužení žebry



Obr. 30. 3D pohled na žebrovanou desku

Symetrické plošné výztuže (duté profily), které jsou zobrazené na obrázku (Obr.31) vykazují vysoké poměry ohybové tuhosti ku objemu materiálu profilu. Stejně jako sendvičové prvky.

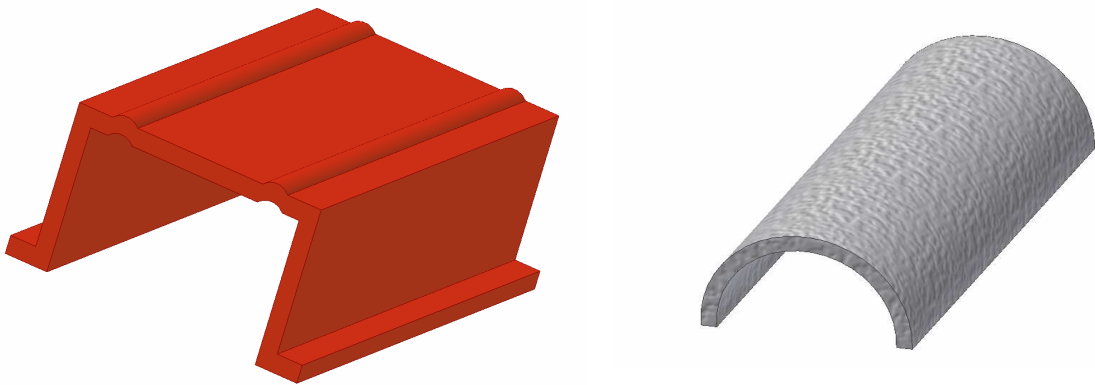


Obr. 31. 3D pohled na symetrickou plošnou výztuž

U profilů jenž mají vyztužení provedeno jednosměrně, dochází k tzv. *konstrukční ortotropii*. Jedná se tedy o to, že ve směru výztuže vzrůstá tedy ohybová tuhost avšak ve směru příčném zůstává prakticky na úrovni nevyztužené stěny, patří sem např. výše uvedená deska na obrázku (Obr.31 ).

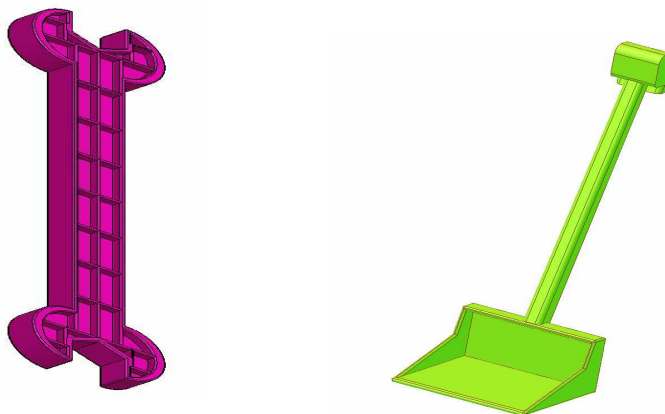
Mezi další tenkostěnné profily jenž se používají patří např. duté konstrukce typu *twinsheet*, jenž jsou zhotoveny tvarováním dílu se spojovacími výstupky a následným svařením. Při návrhu se hledá optimální počet výstupků z hlediska max. tuhosti a pevnosti, ale také se klade důraz na objem materiálu.

Pro tvarované otevřené skořepiny jenž jsou znázorněny na obrázku (Obr.32), vidíme příklad vyztužení pomocí patek a půlkruhových výstupků na červeném profilu. I v tomto případě dochází k tzv. konstrukční ortotropii. Vedle něho půlkruhový profil (šedý) bez vyztužení. [1]



Obr. 32. Otevřené profily

Tenkostěnné plastové profily však velmi často také poslouží ve výrobě hraček. Tyto výrobky jsou navrhované tak, aby byla zaručena bezpečnost tzn. zaoblení u všech hran, aby nedošlo např. k poškrábání a jiným úrazům. Také bývají pro větší odolnost vyztužené.

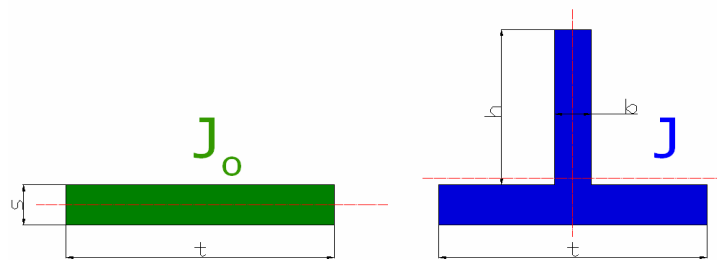


Obr. 33. Plastové tenkostěnné hračky

## 5.2 Ohybová tuhost a ohybová únosnost vyztužených stěn

Ohybová tuhost nějakého tělesa např. prutu je dána známým součinem  $EJ$ . Znamená to, že odolnost daného tělesa může být ovlivňována, jak po stránce materiálové (modul pružnosti daného materiálu), tak po stránce geometrické (kvadratický moment plochy průřezu).

Tak např. u stěn vyztuženými několika žebry s konstantní roztečí můžeme poměrné zvýšení tuhosti zjednodušeně odhadovat poměrem kvadratického momentu myšleného T-profilu s kvadratickým momentem nevyztužené stěny o šířce rovné rozteči žeber. [1]



Obr. 34. Hladká stěna a T-profil

$$\text{Poměrné zvýšení ohybové tuhosti : } k_t = \frac{J}{J_o}, \text{ kde } J_o = \frac{t \cdot s^3}{12} \quad (24)$$

Co se týče ohybové únosnosti žebrované stěny, je to trochu složitější. Je to dáno tím, že pevnost materiálu resp. únosnost výrobku se nevztahují jako tuhost k oblasti malým namáháním, takže obecně nelze předpokládat lineárně elastické chování.<sup>1</sup>

Pokud se však předpokládá prakticky lineárně elastické chování do určité výpočtové mezní hodnoty napětí, lze pak zjednodušeně předpokládat poměrné zvýšení ohybové únosnosti žebrované stěny stejně jako srovnání velikosti jmenovitých ohybových napětí dle technické teorie lineárně elastického ohybu. [1]

$$\text{Poměrné zvýšení ohybové únosnosti : } k_p = \frac{W}{W_o}, \text{ kde } W_o = \frac{t \cdot s^2}{6} \quad (25)$$

Mezní hodnota napětí pro výpočet se tedy odvozuje z meze pevnosti u křehkých materiálu a u houževnatých materiálů z meze kluzu. Pokud budeme chtít předběžně posoudit vliv námi navržených žeber, existují pro tyto účely v praxi technické diagramy. Může se totiž stát, že námi navržené žebro bude mít malý poměr  $h/s$  a vyšší poměr  $t/b$ , což se projeví opačným efektem a ohybová únosnost  $k_p$  naopak ještě klesne pod 1. Je to dáno zejména tím, že na koncích žeber jednostranně vyztužených desek vznikají relativně vysoké hodno-



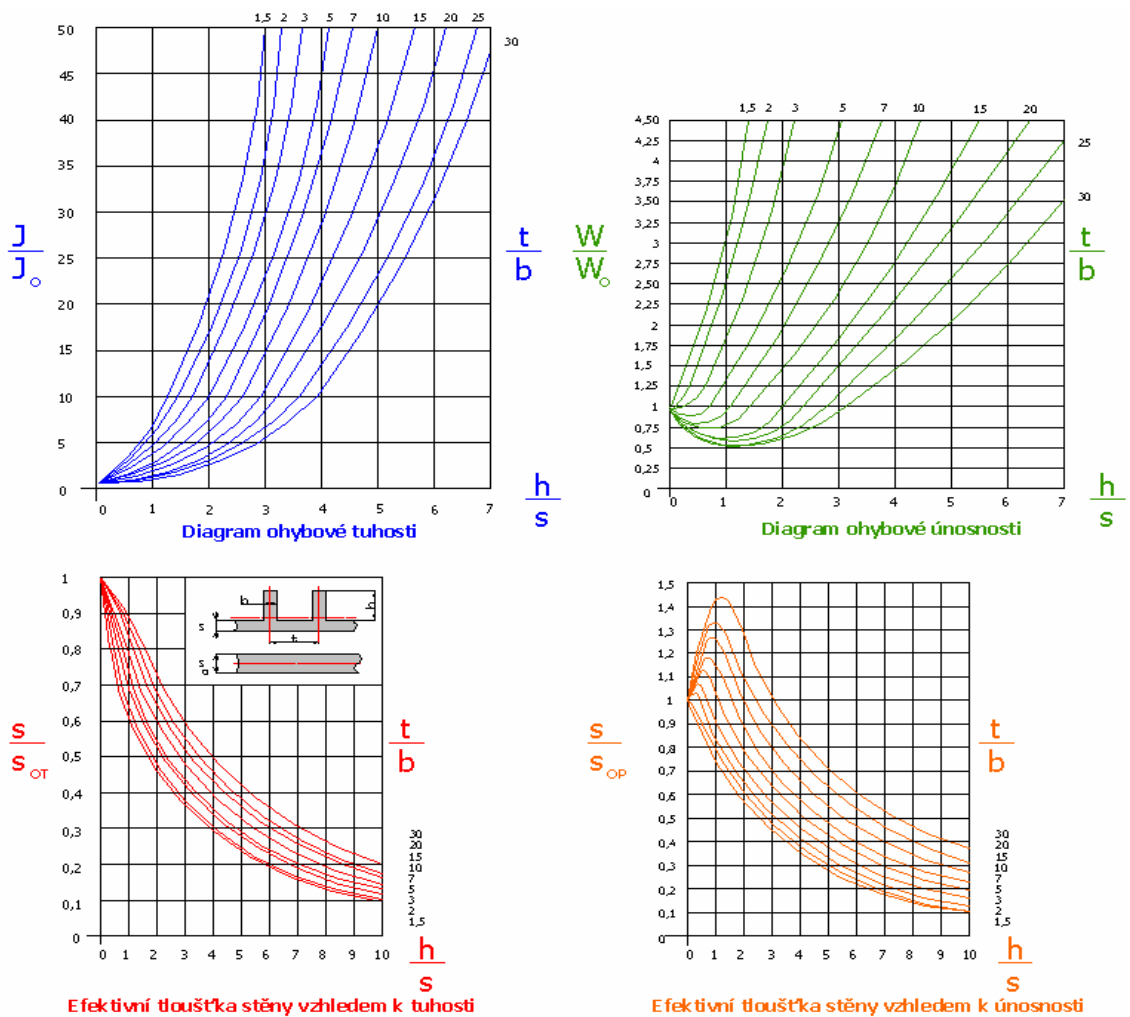
ty ohybových napětí. Tyto napětí pak mohou být vyšší než napětí vznikající na nevyztužené desce. V praxi se v tomto případě pak zavádí pojem *ekvivalentní tloušťky vyztužené stěny*, která má význam tloušťky myšlené hladké stěny s kvadratickým momentem resp. napětím shodným s kvadratickým momentem resp. napětím vyztužené desky. [1]

Ekvivalentní tloušťku stěny vzhledem k tuhosti vyztužené stěny můžeme tedy vyjádřit:

$$\frac{y_o}{y} = k_t = \left( \frac{s_{ot}}{s_o} \right)^3 \Rightarrow s_{ot} = \sqrt[3]{k_t \cdot s_o} \quad [\text{mm}] \quad (26)$$

Ekvivalentní tloušťku stěny vzhledem k únosnosti vyztužené stěny můžeme tedy vyjádřit:

$$\frac{\sigma_o}{\sigma} = k_p = \left( \frac{s_{op}}{s_o} \right)^2 \Rightarrow s_{op} = \sqrt{k_p \cdot s_o} \quad [\text{mm}] \quad (27)$$



Obr. 35. Diagramy ohybové tuhosti a únosnosti

## 6 TENKÉ DESKY A SKOŘEPINY

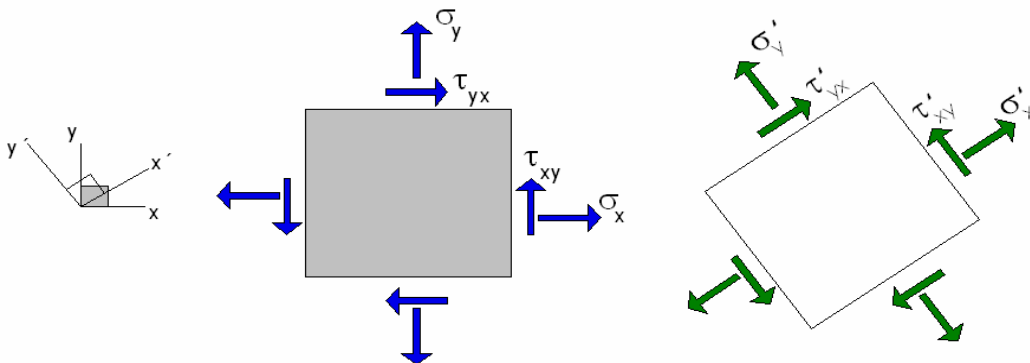
### 6.1 Rovinná napjatost

O rovinném stavu napjatosti hovoříme v případech tenkých stěn a tenkostěnných těles deskového a skořepinového typu. Rovinnou napjatost nazýváme také napjatostí dvouosou. Vnitřní síly v průřezech stěn totiž leží pouze v rovině střednice, ve směru kolmém jsou tak složky napjatosti nulové.<sup>2</sup>

Pak na myšlený element tedy působí smyková a normálová napětí tak, aby byl v rovnováze a nahrazují tak okolní účinek odstraněného okolí. Podmínky rovnováhy sil, jak ve směru  $x$ , tak ve směru  $y$  jsou splněny, protože napěťové složky na protilehlých stranách jsou shodné velikosti a opačného směru. Aby byla také splněna momentová podmínka rovnováhy musí také platit: [2]

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} \quad (28)$$

Stav napětí u rovinného je pak tedy dán 3 na sobě nezávislými hodnotami:  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$  v daném souřadném systému  $x$ ,  $y$ . (viz. Obr.36).



Obr. 36. Rovinná napjatost

Polohu lokálního souřadného systému jsme mohli volit jinak např. pootočenou o určitý úhel. Pak by na tento element obecně působily jiné hodnoty normálových a smykových napětí, ale napjatost by byla v tomto místě stejná. Jedná se tedy o veličinu, která je v různých souřadných systémech tvořena různými napěťovými složkami, mezi kterými existuje transformační vztah, známe-li složky napjatosti z jednoho souřadného systému. Veličiny které mají tuto vlastnost nazýváme veličinami tenzorovými. [2]

## 6.2 Rovnice elasticity pro dvouosou napjatost

Nechť máme plošný prvek z izotropního materiálu pro který platí Hookeův zákon. Pokud budeme namáhat tento prvek normálovým napětím, např. dejme tomu v ose x, pak bude relativní deformace ve směru osy x : [2]

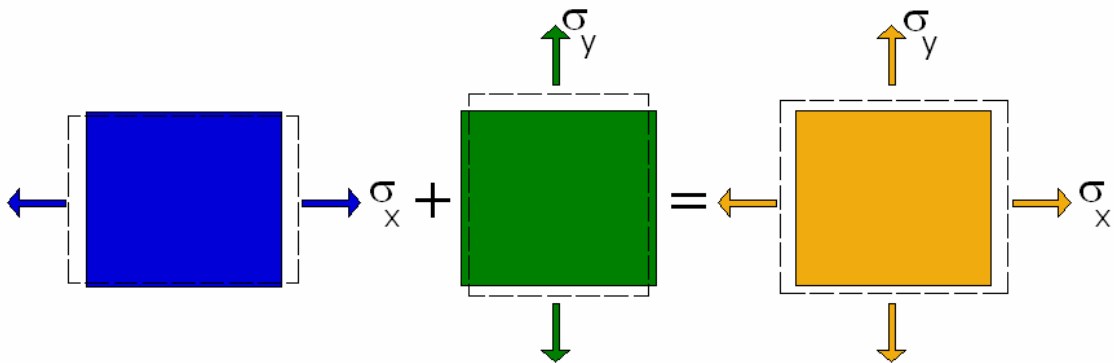
$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} \cdot \sigma_x \quad (29)$$

Ve směru y pak bude platit:

$$\varepsilon_y = -\nu \cdot \varepsilon_x = \frac{-\nu}{E} \cdot \sigma_x \quad (30)$$

V případě, že by působilo napětí ve směru osy y, bylo by tomu naopak, takže:

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} \cdot \sigma_y, \quad \varepsilon_x = -\nu \cdot \varepsilon_y = \frac{-\nu}{E} \cdot \sigma_y$$



Obr. 37. Schéma normálových napjatostí

Protože deformace předpokládáme malé a chování materiálu lineárně elastické, platí princip superpozice. Pak deformace prvku při dvouosé napjatosti tzn.  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  budou dány deformačními vztahy: [2]

**V ose x:** 
$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} \cdot (\sigma_x - \nu \sigma_y) \quad (31)$$

**V ose y:** 
$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} \cdot (\sigma_y - \nu \sigma_x) \quad (32)$$

Když kromě normálových napětí budou působit i smykové složky napětí, které způsobí smykovou deformaci (změna pravého úhlu), bude platit vztah:

$$2.\varepsilon_{xy} = \frac{1}{G}.\tau_{xy} \quad (33)$$

V maticovém zápisu mají rovnice elasticity pro dvouosou napjatost pak tvar:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ 2.\varepsilon_{xy} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & \frac{-\nu}{E} & 0 \\ \frac{-\nu}{E} & \frac{1}{E} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix}$$

Matici tedy můžeme symbolicky zapsat:

$$\varepsilon = [C]\sigma \quad (34)$$

Kde pak matici  $[C]$  nazýváme maticí poddajnosti.

Pomocí inverze výše uvedené rovnice můžeme naopak vyjádřit složky napětí v závislosti na složkách deformace, pak bude platit:

$$\sigma = [C]^{-1}.\varepsilon = [S](\varepsilon) \quad (35)$$

Kde  $[S]$  je maticí tuhosti izotropního materiálu v rovině a platí u ní:

$$[S] = \begin{bmatrix} E^{**} & \nu E^{**} & 0 \\ \nu & E^{**} & 0 \\ 0 & 0 & G \end{bmatrix}$$

Kde  $E^{**}$  je válcový modul pružnosti a platí pro něj:

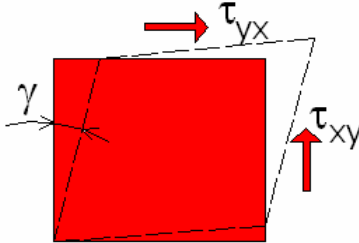
$$E^{**} = \frac{E}{1-\nu^2} \quad (36)$$

Válcový modul můžeme vyjádřit z rovnic elasticity:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}.\sigma_x - \nu\sigma_y, \text{ víme že } \sigma_y = \nu.\sigma_x \text{ a po dosazení dostáváme:}$$

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}.\sigma_x - \nu.\nu.\sigma_x = \frac{1}{E}.\sigma_x(1-\nu^2) \Rightarrow \sigma_x = \frac{E}{1-\nu^2}.\varepsilon_x = E^{**}.\varepsilon_x$$

Pokud budeme působit pouze smykovým napětím na výše uvedený element (viz. Obr.38), přejdou rovnice elasticity na tvar pro čistý smyk následovně:



Obr. 38. Schéma smykové napjatosti

Smyková deformace činí:

$$\gamma = \frac{1}{G} \cdot \tau \quad (37)$$

Dle vztahu  $\varepsilon_x = \frac{1}{E} \cdot (\sigma_x - \nu \sigma_y)$  můžeme tedy přepsat normálovou deformaci na smykovou deformaci následovně:

$$\text{Zřejmě platí že: } \varepsilon_x = \frac{\gamma}{2}, \quad \sigma_x = \tau, \quad \sigma_y = -\tau$$

Po dosazení do vztahu (31) bude platit :

$$\frac{\gamma}{2} = \frac{1}{E} \cdot (\tau - \nu \tau) = \frac{\tau}{E} \cdot (1 + \nu) \quad (38)$$

Odtud můžeme vyjádřit vztah modulu pružnosti ve smyku:

Protože víme, že  $G = \frac{\tau}{\gamma}$ , pak platí po vyjádření vztahu (38) tvar pro modul pružnosti ve smyku:

$$G = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad (39)$$

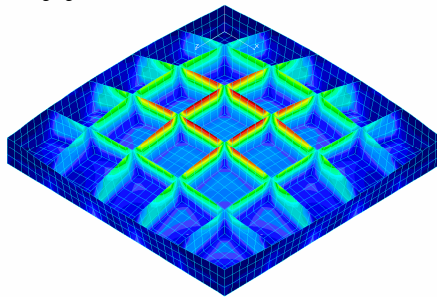
Z toho všeho tedy vyplývá, že lineárně elastické chování izotropního materiálu je tak dáno pouze 2 na sobě nezávislými elastickými konstantami. Je to tedy  $E$ ,  $\nu$ .

Hodnota třetí konstanty ( $G$ ) vyplývá jak vidíme dle vztahu (39) z konstant  $E$ ,  $\nu$ . [2]

### 6.3 Ohybová a membránová napjatost a tuhost tenkostěnných výrobků s homogenní stěnou

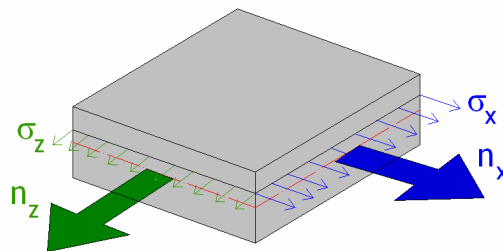
#### Membránová tuhost

Tělesa, které mají jeden rozměr (tloušťku) oproti ostatním dvěma rozměrům zanedbatelný nazýváme v praxi jako desková popř. skořepinová. Pak tedy můžeme zanedbat složky napětí ve směru normály ke střední ploše desky a tedy předpokládat, že napjatost tenkých desek a skořepin je jenom dvouosá. Na obrázku (Obr.39) níže vidíme tenkostěnnou desku vyztuženou žebry při zatížení a její deformaci. [2]



Obr. 39. Deska vyztužená žebry

Představme si nyní, že na element uvedený na obrázku (Obr.40), s rozměry 1x1 mm působí na jeho bočních stěnách (plochách) normálové tahové složky napětí, neboli teda působí normálové tahové síly  $N_x$ ,  $N_z$ , jejichž velikost která připadá na jednotkovou šířku průřezu desky je  $n_x$ ,  $n_z$ . Tyto síly jsou výslednicemi elementárních sil v průřezech elementu  $\sigma_x dS$ ,  $\sigma_z dS$ .



Obr. 40. Membránová napjatost

Platí tedy:

$$N_i = \int_S \sigma_i^M dS = \sigma_i^M \cdot dS, \text{ kde } i,j = x,z \quad (40)$$

Kde:

$$\sigma_i^M = \frac{n_i}{s}, \text{ kde } i,j = x,z \quad (41)$$

Kde: 
$$n_i = \frac{N_i}{b}, \text{ kde } i,j = x,z \quad (42)$$

Pak tedy každá myšlená „vrstva“ elementární tloušťky *dy* je ve stavu dvouosé napjatosti. Jedná se tedy o **membránovou napjatost** desek a skořepin. [2]

Z rovnic elasticity můžeme vyjádřit membránové deformace v hlavním souřadném systému *x,z*, kde tedy platí:

$$\varepsilon_i^M = \frac{1}{E} \cdot (\sigma_i^M - \nu \sigma_j^M), \text{ kde } i,j = x,z \quad (43)$$

Pak inverzní těchto rovnic je pak membránové napětí:

$$\sigma_i^M = E^{**} \cdot (\varepsilon_i^M + \nu \varepsilon_j^M), \text{ kde } i,j = x,z \quad (44)$$

Pak dosazením za  $\sigma_i^M$  ze vztahu (41) dostáváme:

$$\frac{n_i}{s} = E^{**} \cdot (\varepsilon_i^M + \nu \varepsilon_j^M), \text{ kde } i,j = x,z \quad (45)$$

Po úpravě pak dostaneme:

$$\frac{n_i}{E^{**} \cdot s} = (\varepsilon_i^M + \nu \varepsilon_j^M), \text{ kde } i,j = x,z \quad (46)$$

Kde tedy výraz  $E^{**} \cdot s$  je **membránovou tuhostí** stěny desky (skořepiny).

Označujeme ji jako 
$$A = E^{**} \cdot s \quad (47)$$

### Ohybová tuhost

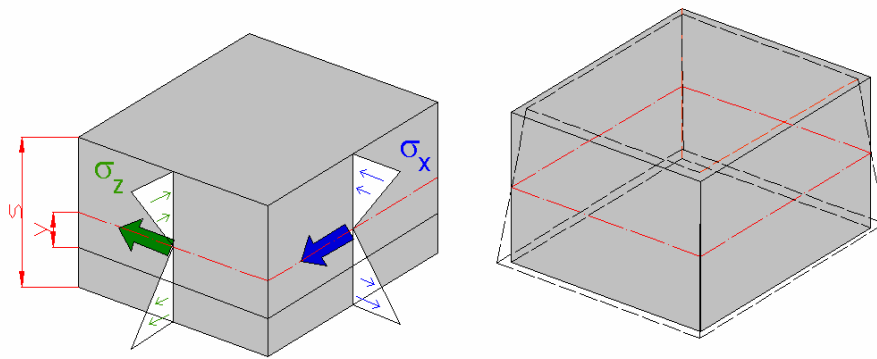
Nyní ať je homogenní izotropní deska obdélníkového tvaru namáhána pouze ohybovými momenty  $m_x, m_z$ , které jsou rovnoměrně rozložené po jejich okrajích. Technická teorie ohybu je založena na následujících předpokladech: [2]

- normály ke střední (neutrální) ploše desky zůstávají přímé a kolmé k této ploše i po deformaci.
- střední plocha se při ohybu desky plošně nedeformuje tj. neroztahuje se ani se nestlačuje.

Tyto předpoklady jsou analogické Bernoulliho – Navierově předpokladu o ohybu prutů. Pak na obrázku (Obr.41) jsou na elementu desky v myšlené vrstvě elementární tloušťky složky poměrné deformace ve vzdálenosti  $y$  od střední plochy ve vztahu: [2]

$$\varepsilon_i^o(y) = \frac{1}{r_i} \cdot y, \text{ kde } i,j = x,z \quad (48)$$

Podle předpokladu zůstávají totiž boční stěny rovinné a pootáčejí se kolem své neutrální osy, která je vlastně průsečnice boční stěny elementu se střední plochou (viz. Obr.41).



Obr. 41. Čistý Kirchhoffův ohyb

Ohybové momenty  $m_x, m_z$ , jsou vyvažovány v průřezech stěny vnitřními elementárními normálovými silami podle rovnic rovnováhy:

$$\int_s \sigma_i^o(y) dy \cdot y = m_i, \text{ kde } i,j = x,z \quad (49)$$

Platí :

$$\sigma_i^o = E^{**} \cdot (\varepsilon_i^o + \nu \varepsilon_j^o), \text{ kde } i,j = x,z \quad (50)$$

Po dosazení vztahu (50) a vztahu (48) do rovnic rovnováhy pak platí:

$$\int_s E^{**} (\varepsilon_i^o + \nu \varepsilon_j^o) y \cdot dy = m_i, \text{ kde } i,j = x,z \quad (51)$$

$$\int_s E^{**} \cdot \left( \frac{1}{r_i} + \nu \frac{1}{r_j} \right) y^2 dy = m_i, \text{ kde } i,j = x,z \quad (52)$$

$$\frac{1}{r_i} + \nu \frac{1}{r_j} = \frac{m_i}{E^{**} \cdot j}, \text{ kde } i,j = x,z \quad (53)$$

Kde tedy výraz  $E^{**} \cdot j$  nazýváme **válcovou (cylindrickou) ohybovou tuhostí** stěny desky (skořepiny).



Označujeme ji jako: 
$$D = E^{**} \cdot j \quad (54)$$

Kde tedy: 
$$j = \frac{s^3}{12}, \quad E^{**} = \frac{E}{1-\nu^2}$$

$j$  – kvadratický moment plochy průřezu desky,  $s$  – tloušťka stěny desky.

Pro zvláštní případ ohybu stěny do válcové plochy platí pro moment v ose  $x$ :

$$m_x = \int_S \sigma_x \cdot y dy \quad (55)$$

Pokud je deska deformována do válcové plochy, zůstávají boční plochy rovnoběžné i po deformaci, tzn. průřezy nemění svůj tvar, takže platí:

$$\varepsilon_z(y) = 0, \quad \frac{1}{r_z} = 0$$

V důsledku zabránění příčné deformace zde tedy vzniká napětí ve směru  $z$  o velikosti:

$$\sigma_z = \nu \cdot \sigma_x \quad (56)$$

Pak deformace ve směru  $x$  je:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} \cdot (\sigma_x - \nu \sigma_z) = \frac{1-\nu^2}{E} \cdot \sigma_x \quad (57)$$

Z toho napětí ve směru  $x$  je tedy:

$$\sigma_x = E^{**} \cdot \varepsilon_x \quad (58)$$

Dosazením do rovnic rovnováhy tedy platí:

$$m_x = \int_S E^{**} \cdot \varepsilon_x \cdot y dy \quad (59)$$

Přijmeme-li pak Bernoulliho předpoklad o rovinnosti průřezů při ohybu, platí tedy:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{r_x} \cdot y \text{ a dosazení do } m_x = \int_S E^{**} \cdot \varepsilon_x \cdot y dy \text{ dostáváme } m_x = \int_S E^{**} \cdot \frac{1}{r_x} \cdot y^2 dy.$$

Pak přejde rovnice  $\frac{1}{r_i} + \nu \frac{1}{r_j} = \frac{m_i}{E^{**} \cdot j}$  na rovnici:

$$\frac{1}{r_x} = \frac{m_x}{E^{**} \cdot j} \quad (60)$$

Kde opět tedy:  $D = E^{**} \cdot j$ ,  $j = \frac{s^3}{12}$

Pak tedy můžeme psát, že pro napětí ve směru osy x platí:

$$\sigma_x = \frac{m_x}{j} \cdot y \quad (61)$$

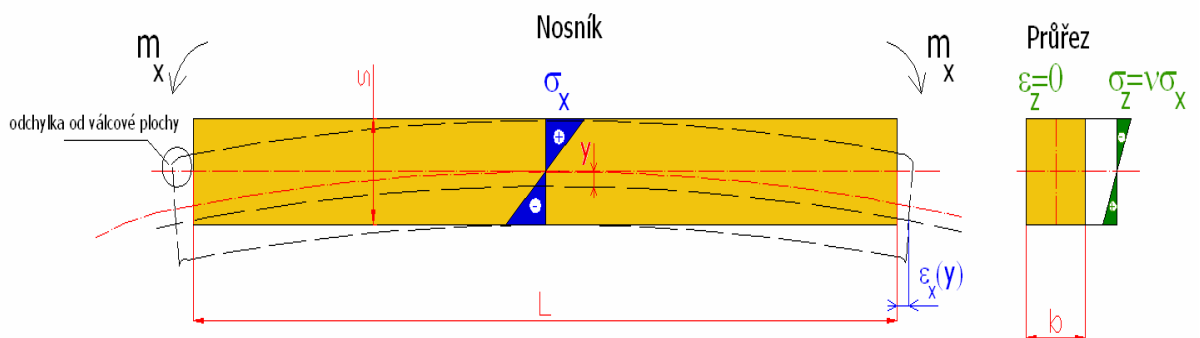
Pak ve směru osy z platí:

$$\sigma_z = \frac{\nu m_x}{j} \cdot y \quad (61)$$

Můžeme tedy říct, že v desce ohýbané do válcové plochy vzniká tzv. biaxiální ohyb. Takže kromě ohybového momentu  $m_x$ , vzniká ohybový moment v příčném směru o velikosti:

$$m_z = \nu m_x \quad (62)$$

S výjimkou okrajů, kde  $m_z = 0$ . Na podélných okrajích tedy vzniká odchylka od válcové plochy (viz. Obr.42).



Obr. 42. Nosník při ohybu do válcové plochy

Ohyb desky jako širokého nosníku, tj. do válcové plochy je zvláštním případem biaxiálního ohybu (stěna desky nebo skořepiny může být ohýbána i dvěma na sobě nezávislými momenty  $m_x, m_z$ ). Vzniklá deformační plocha však již nebude válcová.<sup>2</sup>

Dalším zvláštním případem ohybu desky je ohyb pro který platí, že:

$$m_x = m_z \quad (63)$$

To znamená, že pak platí:

$$\frac{1}{r_x} = \frac{1}{r_z} = \frac{1}{r} \quad (64)$$

Z tohoto vyplývá, že tedy plocha střednice desky se deformuje do plochy kulové. Pak její křivost se dá vyjádřit následovně:

$$\frac{1}{r} = \frac{m}{E^* \cdot j} \quad (65)$$

Kde: 
$$E^* = \frac{E}{1-\nu} \quad (66)$$

S označením  $E^*$  je **sférický modul**, který můžeme vyjádřit následovně:

Pokud platí tedy, že  $\frac{1}{r_x} = \frac{1}{r_z} = \frac{1}{r}$ , pak po dosazení do  $\frac{1}{r_i} + \nu \frac{1}{r_j} = \frac{m_i}{E^{**} \cdot j}$  pak bude:

$$\frac{1}{r} + \nu \frac{1}{r} = \frac{m}{E^{**} \cdot j} \Rightarrow \frac{1}{r}(1+\nu) = \frac{m \cdot (1-\nu^2)}{E \cdot j} \Rightarrow \frac{1}{r}(1+\nu) = \frac{m \cdot (1-\nu) \cdot (1+\nu)}{E \cdot j} \Rightarrow$$

$$\frac{1}{r} = \frac{m}{E^* \cdot j} \text{ takže } E^* = \frac{E}{1-\nu}$$

Pak tedy ohybová napětí v desce budou podle vztahu (50) a vztahu (53) nabývat hodnot:

$$\sigma_i(y) = \frac{m_i}{j} \cdot y, \text{ kde } i,j = x,z \quad (67)$$

Takže můžeme tedy psát pro  $j = \frac{s^3}{12}$  a pro  $y = \frac{s}{2}$ , že napětí v krajních plochách bude

činit jak v ose x tak v ose z:

$$\sigma_i = \frac{m_i}{\frac{s^3}{12}} \cdot \frac{s}{2}, \text{ kde } i,j = x,z \quad (68)$$

Po konečné úpravě pak:

$$\sigma_i = \frac{6 \cdot m_i}{s^2}, \text{ kde } i,j = x,z \quad (69)$$

Pokud v průřezu desky v daném globálním souřadném systému působí pouze ohybové momenty  $m_x$ ,  $m_z$ , pak působící napětí  $\sigma_x$ ,  $\sigma_z$  jsou hlavními napětími. U obecného ohybu desky působí v průřezech (bočních stěnách desky) však také napětí smyková, jejichž výslednice jsou pak kroutící momenty  $m_{xz}$ ,  $m_{zx}$ .

Rovnice (53) představují kromě zvláštního případu a to ohybu do válcové plochy deformační plochu nerozvinutelnou. Toto popírá předpoklad nulové deformace střední neutrální plochy. Můžeme tedy říct, že ve skutečnosti při dvouosém ohybu desky vzniká kromě napětí ohybových také napětí membránové.

Jejich vliv můžeme zanedbat, ale jenom při malých průhybech desky. Pokud při daném zatížení desky a okrajových podmínkách klesá její tuhost, (zmenšuje se tloušťka, modul pružnosti), pak se zvyšuje podíl působících membránových napětí, což má za následek chybu v určení skutečné napjatosti a deformace desky podle Kirchhoffovy teorie. To znamená, že od ohybově tuhých desek se dostáváme do oblasti tenkých desek, kde už není možné zanedbat vliv membránových napětí vůči napětím ohybovým (nelze zde použít Kirchhoffovy teorie).

Protože jsou obecně hodnoty tuhosti stěn plastových výrobků nízké, pak je zapotřebí v praxi těmto problémům věnovat zvýšené pozornosti. [2]

## **Stanovení cílů pro praktickou část**

V praktické části budeme provádět ohyb vytvarovaných profilů. Profily budou vytvarovány na pneumatickém tvarovacím stroji (FORMECH 300X) z plastových desek o tloušťce 1 mm a 2 mm. Materiál těchto desek je Polystyren (obchodní název Metzoplast). Po provedení ohybových zkoušek bude našim cílem zjistit, který z ohýbaných profilů bude vykazovat nejlepší mechanické vlastnosti, tzn. , který bude mít největší tuhost a pevnost (únosnost) při ohybu.

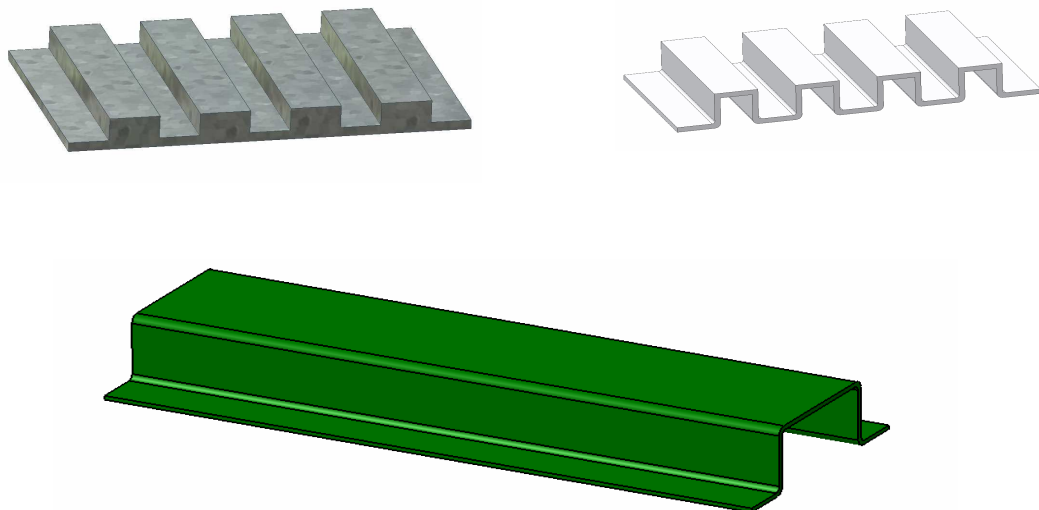
## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 7 VYTVOŘENÍ TENKOSTĚNNÝCH PLASTOVÝCH PROFILŮ

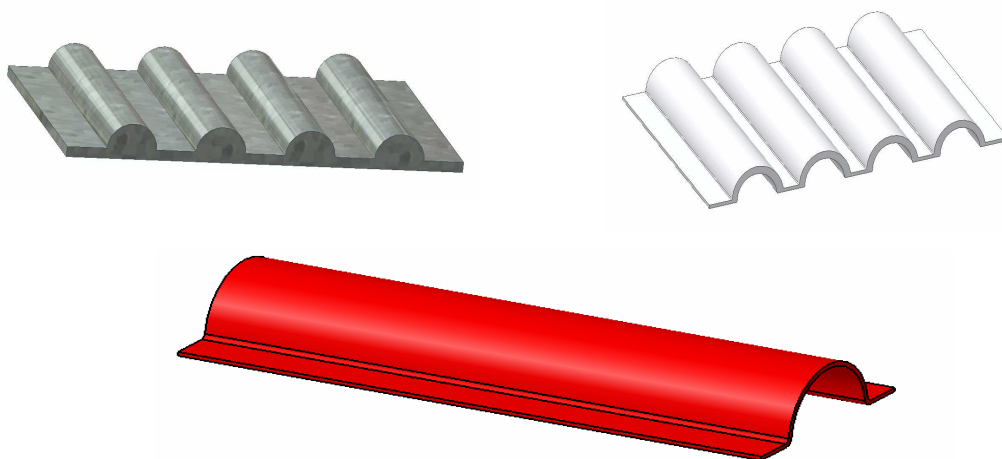
Plastové profily byly vytvořeny technologií pneumatického tvarování. K tomu byla potřeba pneumatického stroje, plastových desek a také formy (dřevěné šablony), která byla vložena do pneumatického stroje a podle níž došlo k vytvarování požadovaného tvaru.

Plastové desky byly z *Polystyrenu (Metzoplast)* a to o tloušťkách 1 a 2 mm. Nejdříve byla tedy vložena několikanásobná dřevěná šablona o rozměrech 400 x 260 mm do tvarovacího stroje *Formech 300*. Do téhož stroje byla vložena plastová deska, která byla nejdříve ohřátá na tvarovací teplotu, přičemž doba ohřevu záležela na tloušťce plastové desky (tzn. čím tlustší tím delší doba ohřevu). Na tomto stroji šlo také kromě délky ohřevu nastavit intenzitu ohřevu a způsob rozložení ohřevu po ploše desky. Doba ohřevu byla nastavena pro desku 1 mm, asi 45 s, pro desku 2 mm, asi 60 s.

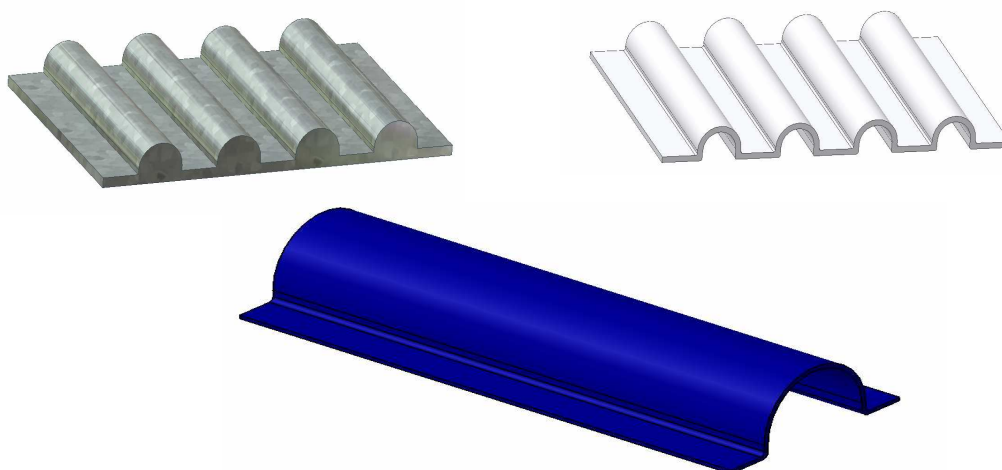
Po vyhřátí desky na tvarovací teplotu byla deska mechanicky natažena na šablonu a vlivem podtlaku došlo k vytvarování požadovaného profilu, který byl samozřejmě dán tvarem dřevěné šablony (formy). Po vytvarování byla dřevěná šablona i s nataženou plastovou deskou vyjmuta z tvarovacího stroje a ochlazená na vzduchu. Po zchladnutí byla vytvarovaná deska sejmuta z dřevěné šablony. Tímto způsobem byly vytvořeny všechny 4 profily. Byly tedy zapotřebí 4 dřevěné šablony. Po jejich vyrobění a nařezání na jednotlivé kusy následovala 3-bodová ohybová zkouška na trhacím stroji *ZWICK 1456*.



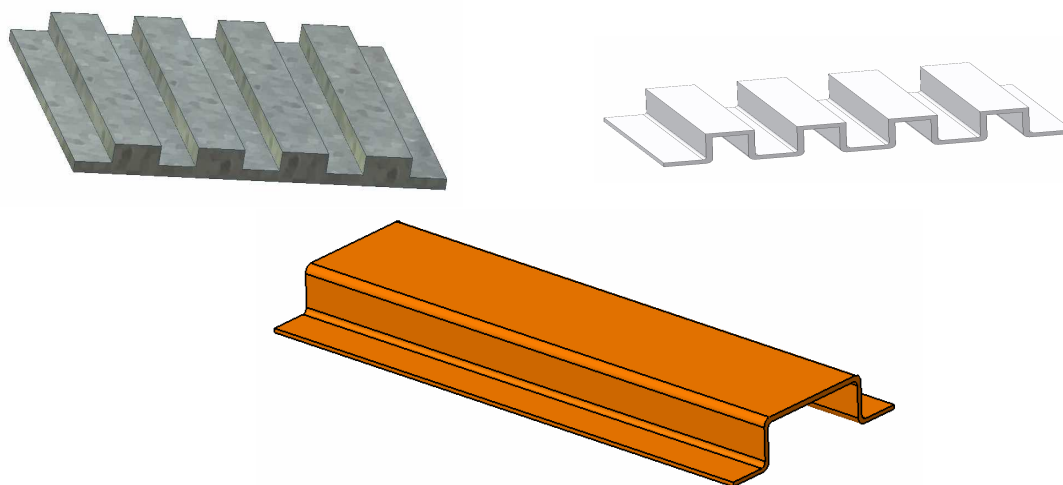
Obr. 43. Dřevěná šablona ,vytvarovaná deska a plastový profil číslo 1



*Obr. 44. Dřevěná šablona ,vytvarovaná deska a plastový profil číslo 2*



*Obr. 45. Dřevěná šablona ,vytvarovaná deska a plastový profil číslo 3*



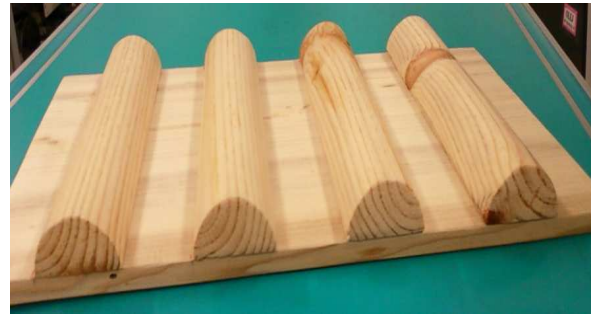
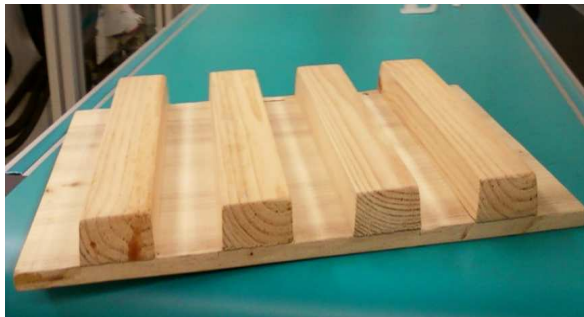
*Obr. 46. Dřevěná šablona ,vytvarovaná deska a plastový profil číslo 4*



## 7.1 Tvarovací stroj a dřevěné šablony (formy)



Obr. 47. Pohled na tvarovací stroj Formech 300X z jeho horní a přední části



Obr. 48. Dřevěné šablony Profilu 1 a Profilu 2

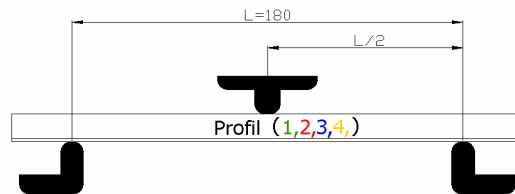


Obr. 49. Dřevěné šablony Profilu 3 a Profilu 4

Dřevěné šablony na obrázku (Obr.48) a obrázku (Obr.49) byly tedy vloženy do dutiny tvarovacího stroje, která je zobrazena na obrázku (Obr.47) nalevo. Na obrázku (Obr.47) napravo vidíme panel tvarovacího stroje, na kterém se nastavovaly parametry tvarování, tzn. teplota, podtlak, doba ohřevu, způsob rozložení teploty po ploše tvarované desky.

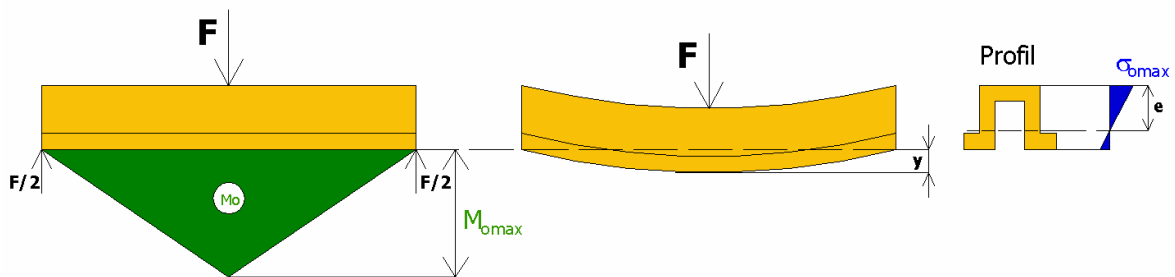
## 8 3-BODOVÁ OHYBOVÁ ZKOUŠKA

Ohybová zkouška byla provedena na trhacím stroji *ZWICK 1456*. Šlo o třibodovou ohybovou zkoušku, kdy profily určené k ohýbání byly umístěny na podpěry o vzdálenosti  $L = 180$  mm. Součástí trhacího stroje byl počítačový program *Zwick /Roell*, který nám vyhodnocoval mechanické vlastnosti a chování profilu při ohýbání.



Obr. 50. Schéma 3-bodové ohybové zkoušky

### 8.1 Základní vztahy 3-bodové ohybové zkoušky



Obr. 51. 3-bodový ohyb

$$\text{Maximální ohybový moment : } M_{o \max} = \frac{F}{2} \cdot \frac{L}{2} = \frac{F \cdot L}{4} \quad [\text{N} \cdot \text{mm}] \quad (70)$$

$$\text{Průhyb: } y = \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot J_z} \quad [\text{mm}] \quad (71)$$

$$\text{Maximální ohybové napětí : } \sigma_{o \max} = \frac{M_{o \max} \cdot e_{\max}}{J_z} \quad [\text{MPa}] \quad (72)$$

**Kde:** L – vzdálenost podpěr [mm]

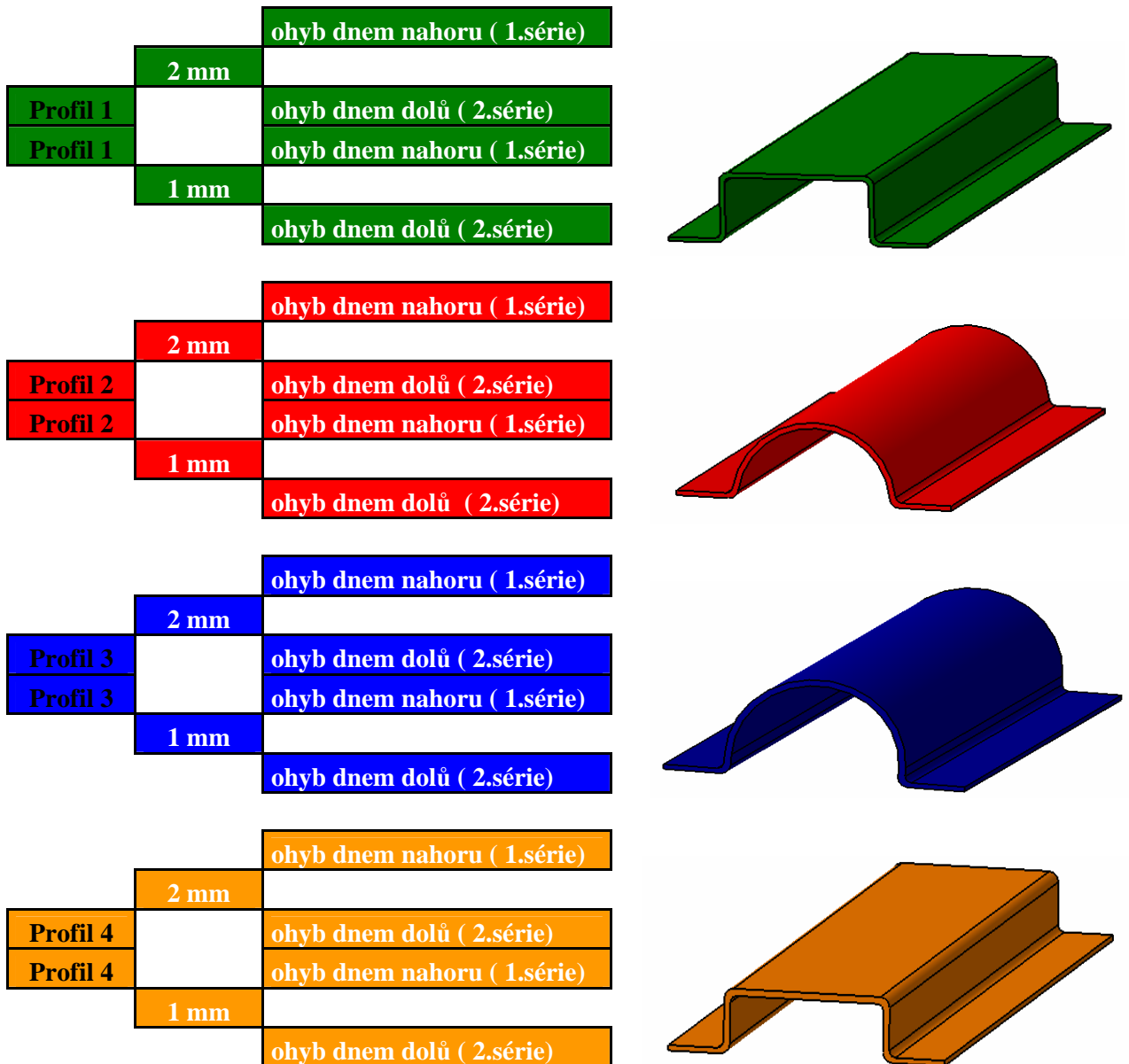
F – zatěžující síla [N]

$J_z$  – kvadratický moment průřezu profilu [mm<sup>4</sup>]

$e_{\max}$  – vzdálenost nejkrajnějšího vlákna profilu [mm]

E – modul pružnosti materiálu profilu [MPa]

## 8.2 Schéma provedení ohybových zkoušek



Obr. 52. Schéma provedení ohybových zkoušek

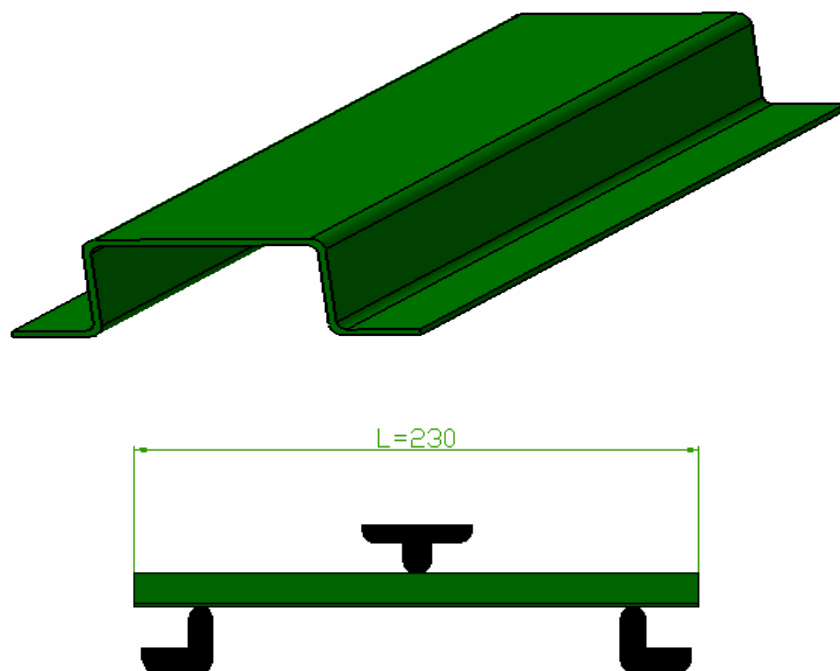
Podle výše uvedené tabulky na obrázku (Obr.52), můžeme vidět, že každý profil byl vytvářen z tloušťky materiálu 1 mm a 2 mm. Máme tedy profily (1,2,3,4 – 2 mm) a profily (1,2,3,4 – 1 mm). Každý z těchto profilů byl ohýbán nejdříve dnem nahoru (1.série) a poté dnem dolů (2.série), jak máme schématicky zobrazeno v tabulce.

V každé sérii např. (1.série tj. dnem nahoru) bylo provedeno 6 měření. Počet sérií jak můžeme vidět dle tabulky je 16. Celkově bylo provedeno tedy 96 ohybových zkoušek.

### 8.2.1 Ohyb profilu 1

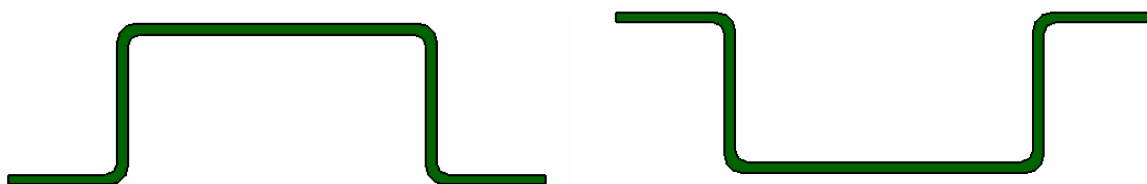
#### Profil 1

Na obrázku (Obr.53) vidíme **Profil č.1** a jeho obecný tvar a také schéma provedení ohybové zkoušky.



Obr. 53. Délka profilu a schéma ohybu

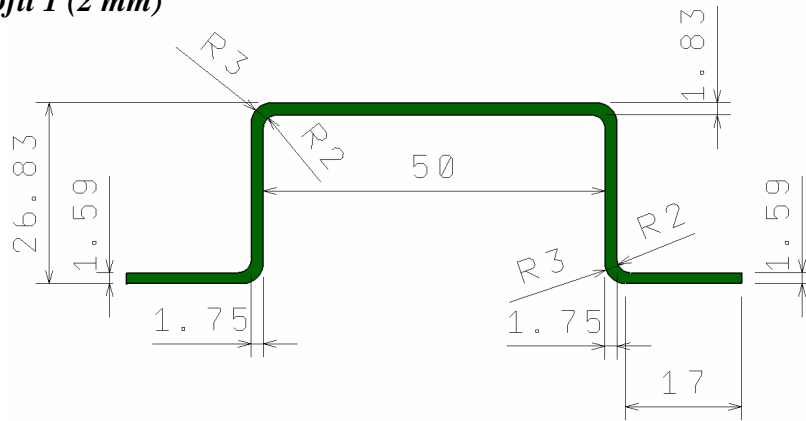
#### Způsob ohybu profilu 1



Obr. 54. Zleva série 1 a série 2

Profil bude zatěžován nejdříve dnem nahoru (série 1) a pak dnem dolů (série 2), jak ukazuje obrázek (Obr.54). *Profil 1* je rozdělen na profily o charakteristické tloušťce 2 mm a tloušťce 1 mm.

8.2.1.1 Profil 1 (2 mm)

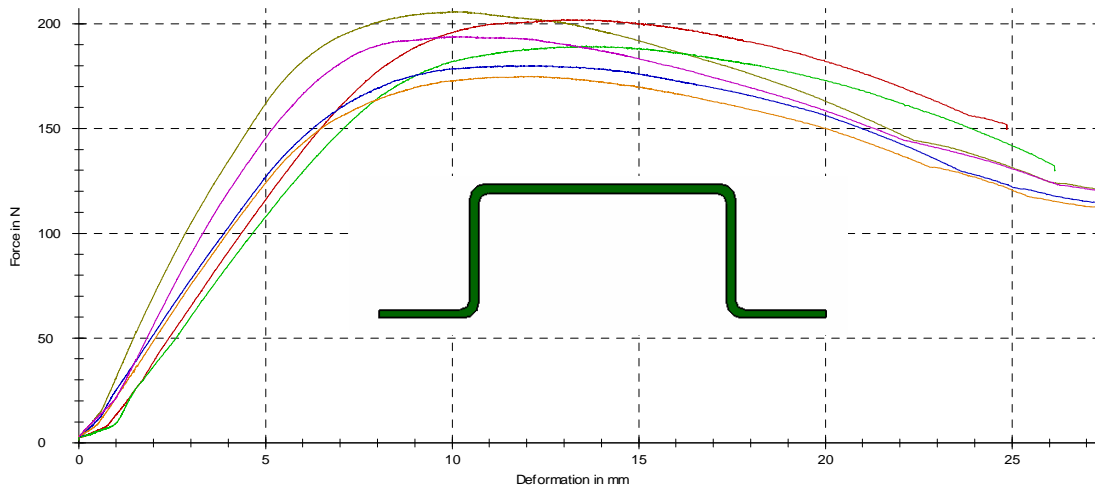


Obr. 55. Rozměry profilu 1 (2 mm)

Při ohybu **Profilu č.1** (2mm) dnem nahoru, můžeme dle hodnot v tabulce (Tab.1) a obrázku (Obr.56) vidět jednotlivé rozdíly zkoušek. Hodnoty maximální síly (meze pevnosti) se pohybují mezi **206-175 N**. Průměrná hodnota maximální síly činí **191 +/- 4,94 N**.

Profil 1	$F_{max}$	$y_{Fmax}$	$W_{Fmax}$	$y_E$	$y_P$
1.série	[N]	[mm]	[N.mm]	[mm]	[mm]
1	206	9,8	1393,72	5,1	4,7
2	202	12,3	1676,96	7,2	5,1
3	189	13,1	1680,44	8,5	4,6
4	180	12,1	1514,38	6,5	5,6
5	175	11,9	1458,68	6,5	5,4
6	194	9,7	1278,27	5,7	4
$\mu$	191	11,5	1500,41	6,6	4,9
$\sigma$	12,1	1,4	158,9	1,18	0,6
$s_e$	4,94	0,57	64,87	0,48	0,24

Tab. 1. Naměřené hodnoty profilu 1 (2mm) nahoru

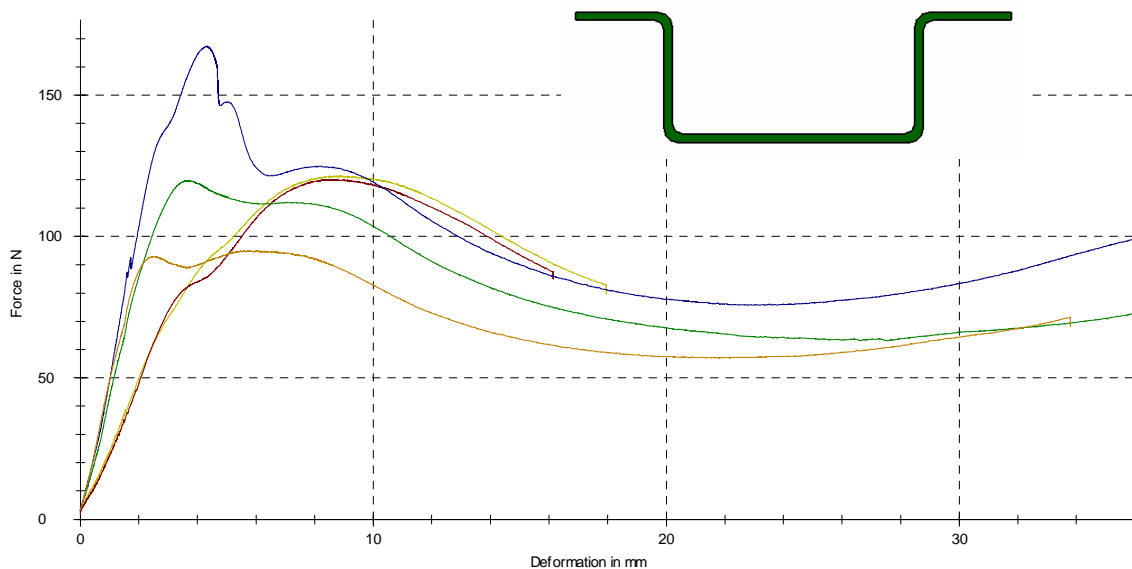


Obr. 56. Profil 1 (2mm) nahoru

Při ohybu *Profilu č.1 (2mm) dnem dolů*, můžeme dle hodnot v tabulce (Tab.2) a obrázku (Obr.57) vidět jednotlivé rozdíly zkoušek. Hodnoty maximální síly (meze pevnosti) se pohybují mezi **167-94,8 N**. Průměrná hodnota maximální síly činí **125 +/- 11,76 N**.

Profil 1	$F_{max}$	$y_{Fmax}$	$W_{Fmax}$	$y_E$	$y_P$
2.série	[N]	[mm]	[N.mm]	[mm]	[mm]
<b>1</b>	121	8,8	721,91	4,9	3,9
<b>2</b>	120	8,5	666,19	5,4	3,1
<b>3</b>	120	3,6	268,37	2,6	1
<b>4</b>	167	4,2	434,66	2,9	1,3
<b>5</b>	94,8	5,9	439,68	2,2	3,7
$\mu$	<b>125</b>	<b>6,2</b>	<b>506,16</b>	<b>3,6</b>	<b>2,6</b>
$\sigma$	<b>26,3</b>	<b>2,4</b>	<b>185,9</b>	<b>1,44</b>	<b>1,4</b>
$s_e$	<b>11,76</b>	<b>1,07</b>	<b>83,14</b>	<b>0,64</b>	<b>0,63</b>

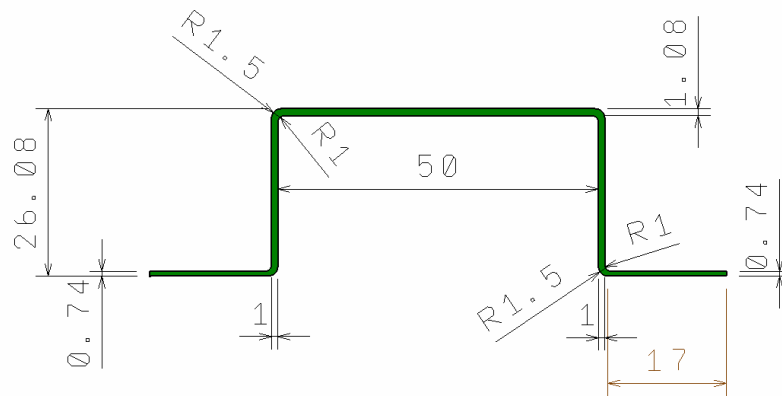
Tab. 2. Naměřené hodnoty profilu 1 (2mm) dolů



Obr. 57. Profil 1 (2mm) dolů

Pozn.: V případě měření 2.série bylo jedno měření z důvodů velké odlišnosti vyřazeno.

## 8.2.1.2 Profil 1 (1 mm)

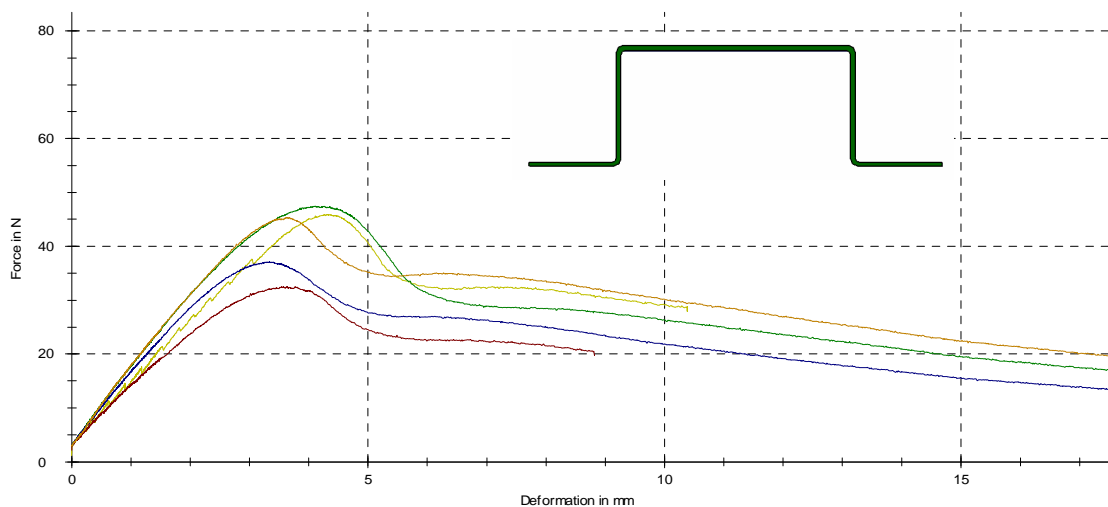


Obr. 58. Rozměry profilu 1 (1 mm)

Při ohybu **Profilu č.1 (1mm) dnem nahoru**, můžeme dle hodnot v tabulce (Tab.3) a obrázku (Obr.59) vidět jednotlivé rozdíly zkoušek. Hodnoty maximální síly (meze pevnosti) se pohybují mezi **47,4-32,5 N**. Průměrná hodnota maximální síly činí **41,7 +/- 2,90 N**.

Profil 1	$F_{\max}$	$y_{F_{\max}}$	$W_{F_{\max}}$	$y_E$	$y_P$
1.série	[N]	[mm]	[N.mm]	[mm]	[mm]
1	45,9	4,5	114,24	3,9	0,6
2	32,5	3,9	72,72	3,2	0,7
3	47,4	4,4	122	3,4	1
4	37,2	3,7	78,06	3	0,7
5	45,4	4	101,57	3,3	0,7
$\mu$	41,7	4,1	97,72	3,36	0,7
$\sigma$	6,49	0,4	21,73	0,33	0,1
$s_e$	2,90	0,18	9,72	0,15	0,04

Tab. 3. Naměřené hodnoty profilu 1 (1mm) nahoru

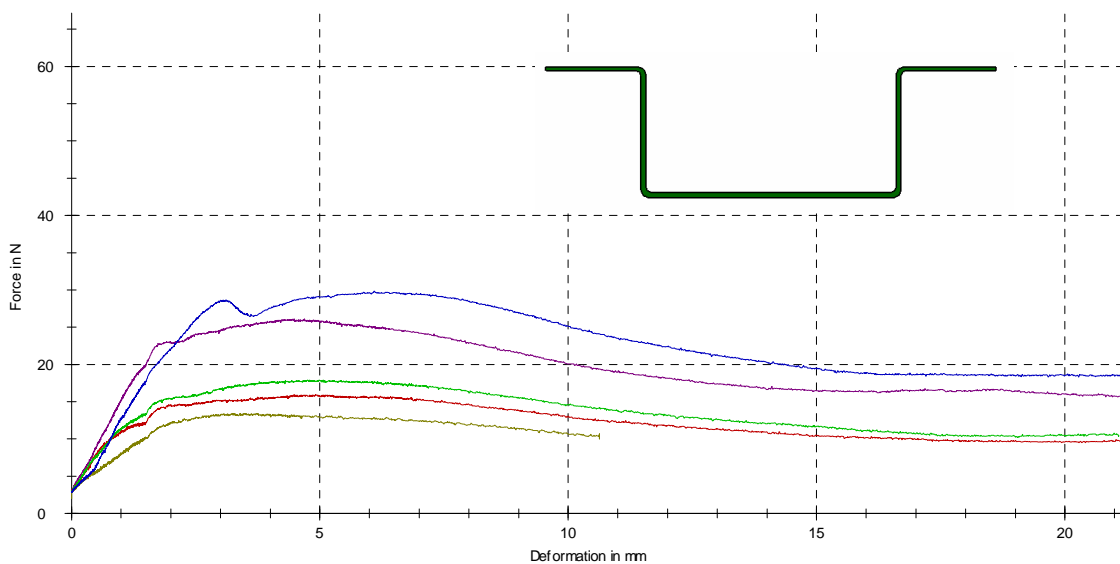


Obr. 59. Profil 1 (1mm) nahoru

Při ohybu *Profilu č.1 (1mm) dnem dolů*, můžeme dle hodnot v tabulce (Tab.4) a obrázku (Obr.60) vidět jednotlivé rozdíly zkoušek. Hodnoty maximální síly (meze pevnosti) se pohybují mezi **29,8-13,4 N**. Průměrná hodnota maximální síly činí **20,6 +/- 3,13 N**.

Profil 1	$F_{max}$	$y_{Fmax}$	$W_{Fmax}$	$y_E$	$y_P$
2.série	[N]	[mm]	[N.mm]	[mm]	[mm]
<b>1</b>	26,1	4,8	89,65	2,3	2,5
<b>2</b>	13,4	4,1	33,78	2,9	1,2
<b>3</b>	15,9	6,9	64,64	4,4	2,5
<b>4</b>	17,9	5,8	67,48	3,3	2,5
<b>5</b>	29,8	6,2	138,39	2,7	3,5
$\mu$	<b>20,6</b>	<b>5,6</b>	<b>78,79</b>	<b>3,12</b>	<b>2,4</b>
$\sigma$	<b>6,99</b>	<b>1,1</b>	<b>38,81</b>	<b>0,8</b>	<b>0,8</b>
$s_e$	<b>3,13</b>	<b>0,49</b>	<b>17,36</b>	<b>0,36</b>	<b>0,36</b>

Tab. 4. Naměřené hodnoty profilu 1 (1mm) dolů



Obr. 60. Profil 1 (1mm) dolů

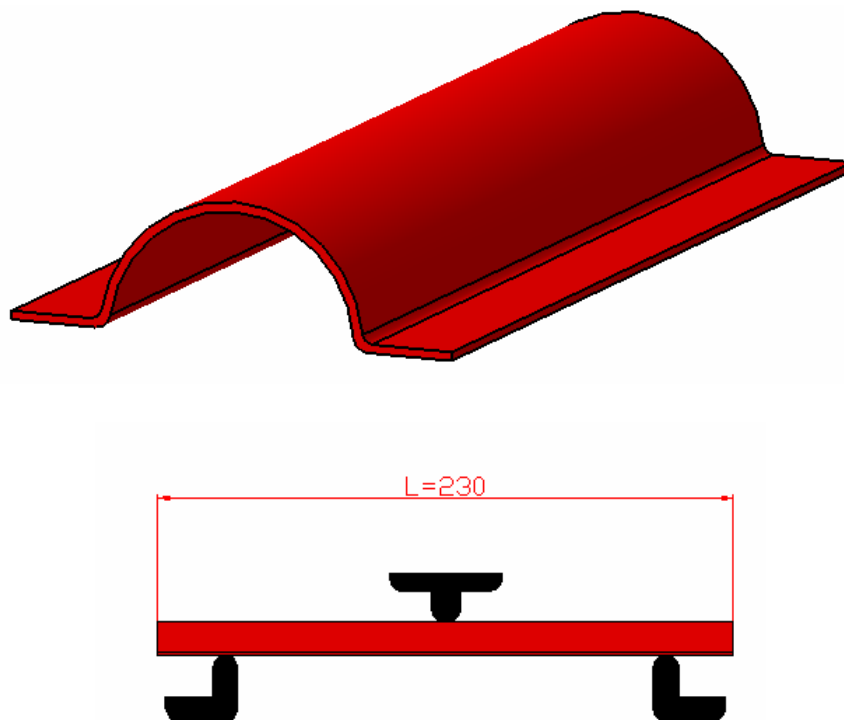
Pozn.: V případě měření 1.série bylo jedno měření z důvodů velké odlišnosti vyřazeno, stejně tak bylo vyřazeno jedno z měření 2.série.



## 8.2.2 Ohyb profilu 2

### Profil 2

Na obrázku (Obr.61) vidíme **Profil č.2** a jeho obecný tvar a také schéma provedení ohybové zkoušky.



Obr. 61. Délka profilu a schéma ohybu

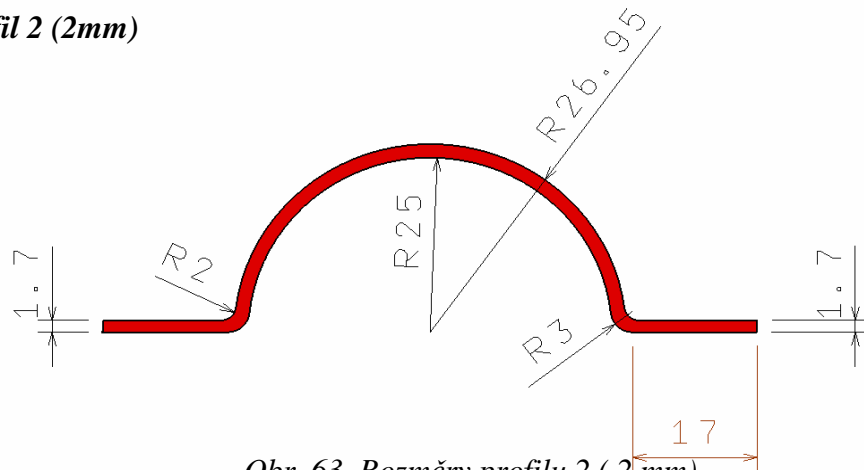
### Způsob ohybu profilu 2



Obr. 62. Zleva série 1 a série 2

Profil bude zatěžován nejdříve dnem nahoru (série 1) a pak dnem dolů (série 2), jak ukazuje obrázek (Obr.62). Profil 2 je rozdělen na profily o charakteristické tloušťce 2 mm a tloušťce 1 mm.

## 8.2.2.1 Profil 2 (2mm)

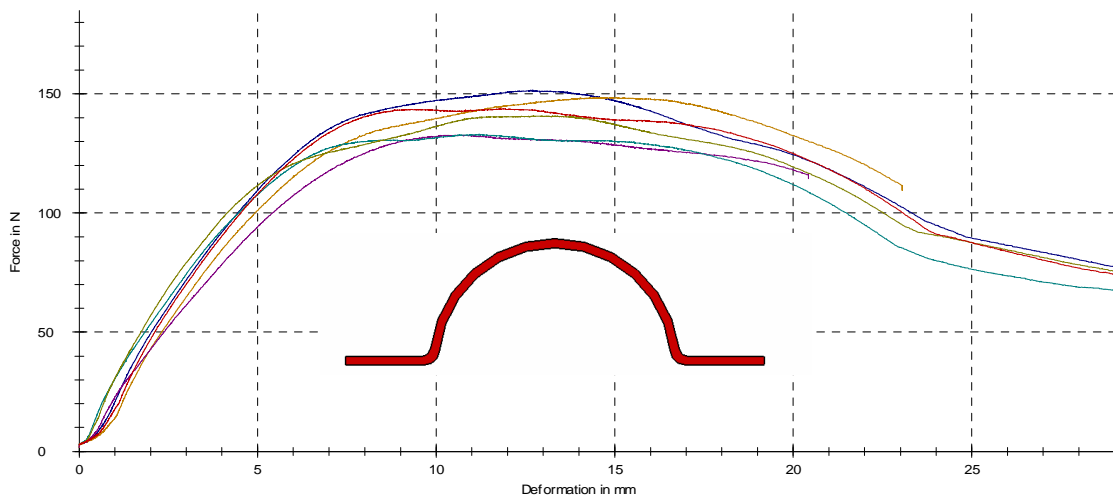


Obr. 63. Rozměry profilu 2 ( 2 mm)

Při ohybu **Profilu č.2** (2mm) dnem nahoru, můžeme dle hodnot v tabulce (Tab.5) a obrázku (Obr.64) vidět jednotlivé rozdíly zkoušek. Hodnoty maximální síly (meze pevnosti) se pohybují mezi **151-133 N**. Průměrná hodnota maximální síly činí **142 +/- 3,16 N**.

Profil 2	$F_{max}$	$y_{Fmax}$	$W_{Fmax}$	$y_E$	$y_P$
1.série	[N]	[mm]	[N.mm]	[mm]	[mm]
<b>1</b>	151	12,3	1359,38	4,8	7,5
<b>2</b>	148	14,9	1655,87	5,8	9,1
<b>3</b>	133	10,5	917,12	5,6	4,9
<b>4</b>	133	11,4	1093,53	5,1	6,3
<b>5</b>	141	12,7	1330,19	4,7	8
<b>6</b>	144	11,5	1215,8	5,1	6,4
$\mu$	<b>142</b>	<b>12,2</b>	<b>1261,98</b>	<b>5,18</b>	<b>7</b>
$\sigma$	<b>7,75</b>	<b>1,5</b>	<b>252,48</b>	<b>0,43</b>	<b>1,5</b>
$s_e$	<b>3,16</b>	<b>0,61</b>	<b>103,07</b>	<b>0,18</b>	<b>0,61</b>

Tab. 5. Naměřené hodnoty profilu 2 (2mm) nahoru

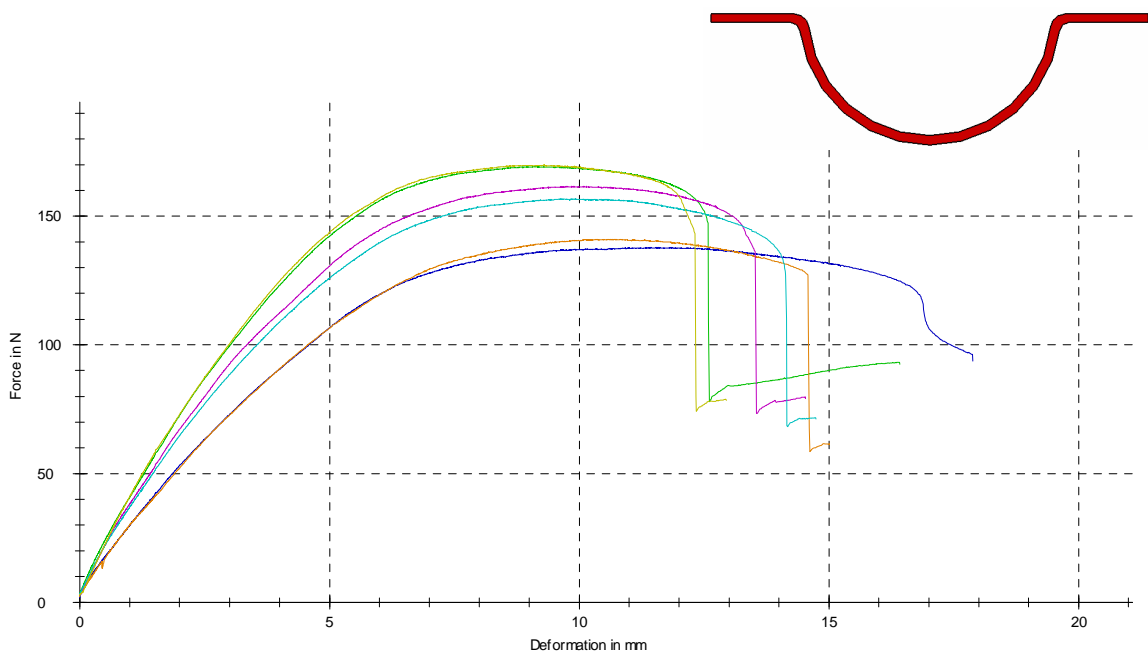


Obr. 64. Profil 2 (2mm) nahoru

Při ohybu *Profilu č.2 (2mm) dnem dolů*, můžeme dle hodnot v tabulce (Tab.6) a obrázku (Obr.65) vidět jednotlivé rozdíly zkoušek. Hodnoty maximální síly (meze pevnosti) se pohybují mezi **170-138 N**. Průměrná hodnota maximální síly činí **156 +/- 5,63 N**.

Profil 2	$F_{max}$	$y_{Fmax}$	$W_{Fmax}$	$y_E$	$y_P$
2.série	[N]	[mm]	[N.mm]	[mm]	[mm]
<b>1</b>	169	9,4	1079,86	5,2	4,2
<b>2</b>	138	11,8	1160,78	5,7	6,1
<b>3</b>	141	11	1053,39	6	5
<b>4</b>	162	10,4	1157,53	5,5	4,9
<b>5</b>	157	10	1059,49	5,5	4,5
<b>6</b>	170	9,5	1111,99	4,9	4,6
$\mu$	<b>156</b>	<b>10,3</b>	<b>1103,84</b>	<b>5,46</b>	<b>4,9</b>
$\sigma$	<b>13,8</b>	<b>0,9</b>	<b>47,49</b>	<b>0,38</b>	<b>0,7</b>
$s_e$	<b>5,63</b>	<b>0,37</b>	<b>19,39</b>	<b>0,16</b>	<b>0,29</b>

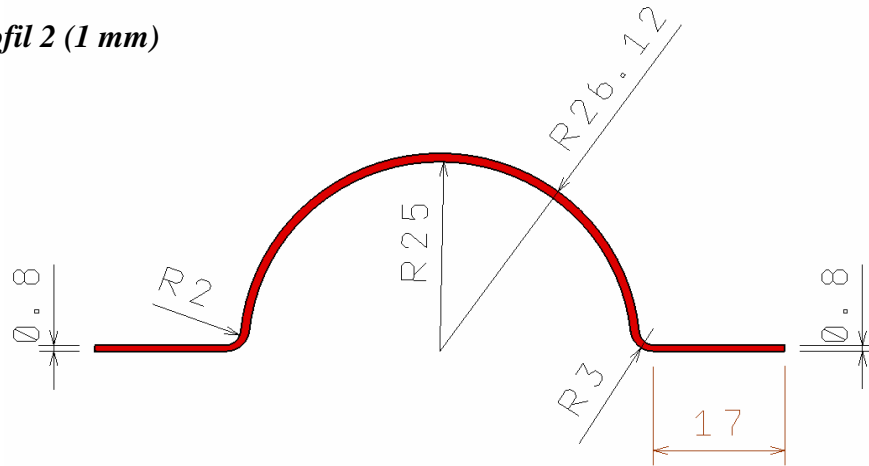
Tab. 6. Naměřené hodnoty profilu 2 (2mm) dolů



Obr. 65. Profil 2 (2mm) dolů

Pozn.: Nebylo vyřazeno žádné měření.

## 8.2.2.2 Profil 2 (1 mm)

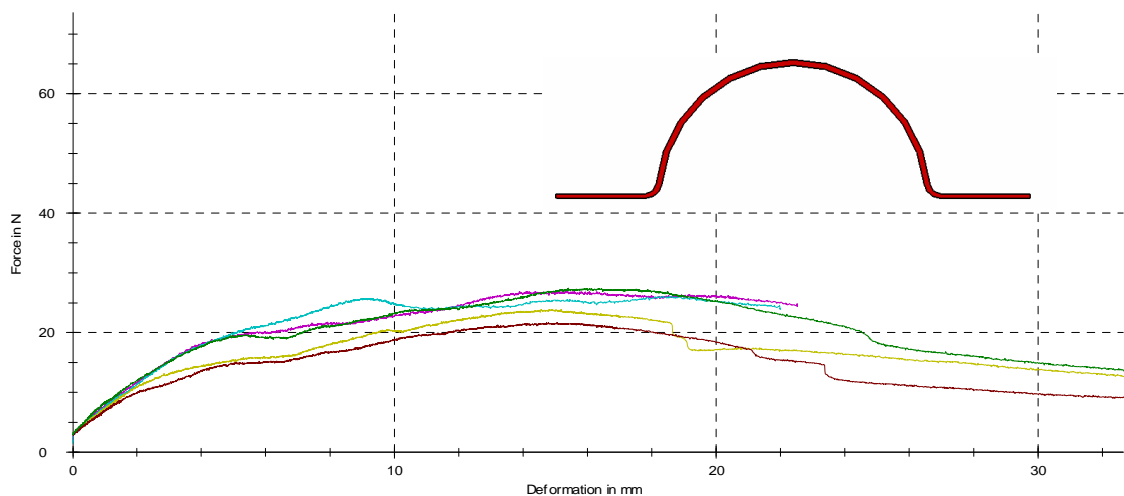


Obr. 66. Rozměry profilu 2 (1mm)

Při ohybu **Profilu č.2 (1mm) dnem nahoru**, můžeme dle hodnot v tabulce (Tab.7) a obrázku (Obr.67) vidět jednotlivé rozdíly zkoušek. Hodnoty maximální síly (meze pevnosti) se pohybují mezi **26,9-21,7 N**. Průměrná hodnota maximální síly činí **25,2 +/- 1,07 N**.

Profil 2	$F_{max}$	$y_{Fmax}$	$W_{Fmax}$	$y_E$	$y_P$
1.série	[N]	[mm]	[N.mm]	[mm]	[mm]
1	26,9	16,1	303,55	6,2	9,9
2	26,1	19,1	386,55	6,2	12,9
3	23,9	15,4	243,75	6	9,4
4	21,7	15,9	235,94	5,9	10
5	27,4	16,4	302,62	6,9	9,5
$\mu$	25,2	16,6	294,48	6,24	10,3
$\sigma$	2,39	1,5	60,47	0,39	1,5
$s_e$	1,07	0,67	27,04	0,17	0,67

Tab. 7. Naměřené hodnoty profilu 2 (1mm) nahoru

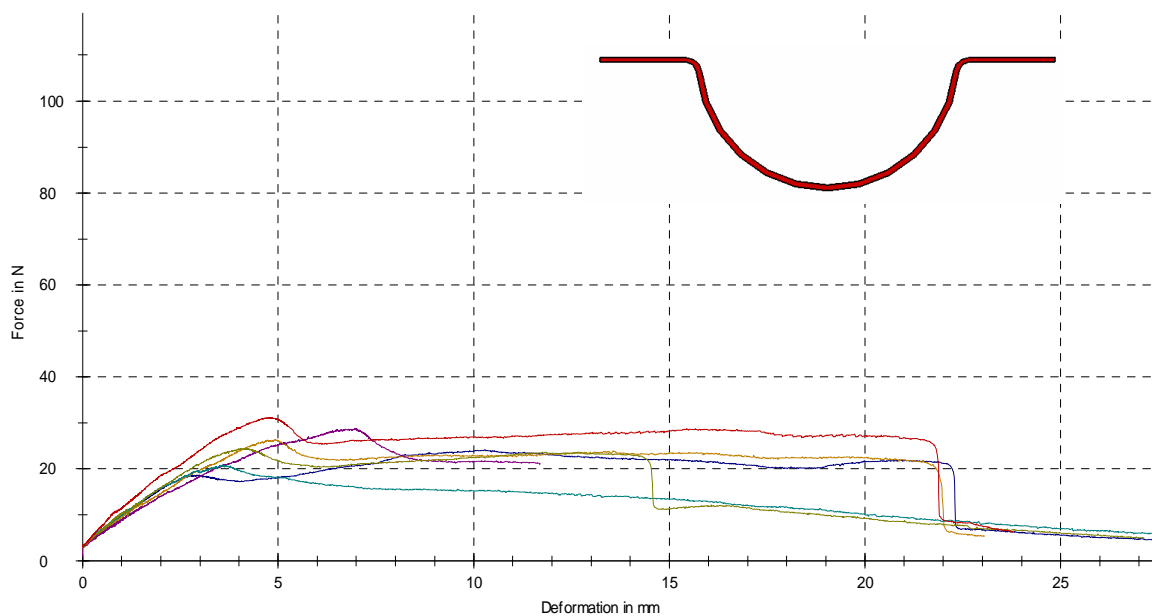


Obr. 67. Profil 2 (1mm) nahoru

Při ohybu *Profilu č.2 (1mm) dnem dolů*, můžeme dle hodnot v tabulce (Tab.8) a obrázku (Obr.68) vidět jednotlivé rozdíly zkoušek. Hodnoty maximální síly (meze pevnosti) se pohybují mezi **31,2-20,8 N**. Průměrná hodnota maximální síly činí **25,9 +/- 1,51 N**.

Profil 2	$F_{max}$	$y_{Fmax}$	$W_{Fmax}$	$y_E$	$y_P$
2.série	[N]	[mm]	[N.mm]	[mm]	[mm]
<b>1</b>	24,1	10,9	185,24	4,1	6,8
<b>2</b>	26,3	5,4	80,72	4,2	1,2
<b>3</b>	28,8	7,6	131,59	5,2	2,4
<b>4</b>	20,8	4,3	48,95	3,6	0,7
<b>5</b>	24,4	5	66,59	4,3	0,7
<b>6</b>	31,2	5,5	92,91	4,7	0,8
$\mu$	<b>25,9</b>	<b>6,4</b>	<b>101</b>	<b>4,35</b>	<b>2,1</b>
$\sigma$	<b>3,7</b>	<b>2,4</b>	<b>49,81</b>	<b>0,54</b>	<b>2,4</b>
$s_e$	<b>1,51</b>	<b>0,98</b>	<b>20,33</b>	<b>0,22</b>	<b>0,98</b>

Tab. 8. Naměřené hodnoty profilu 2 (1mm) dolů



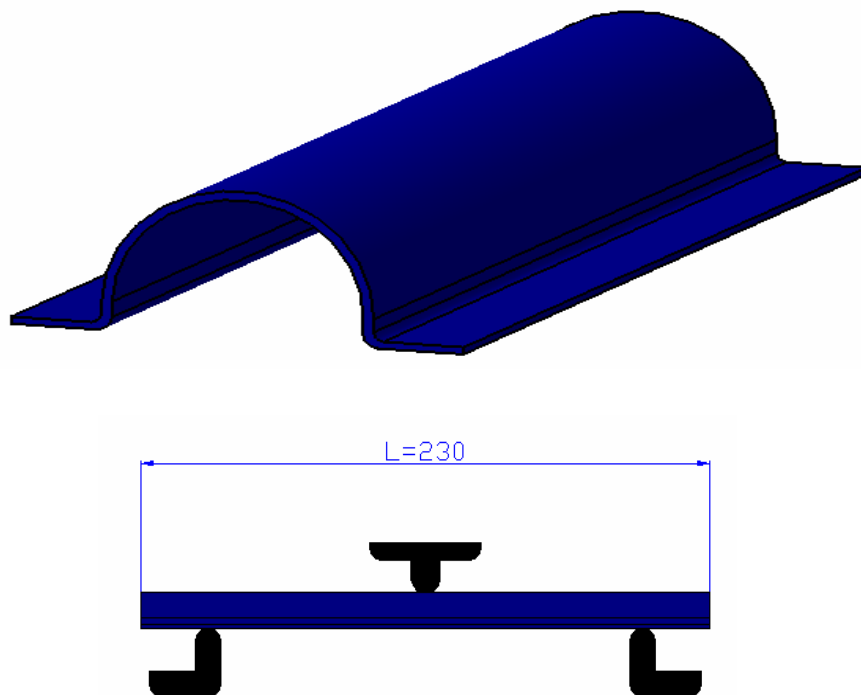
Obr. 68. Profil 2 (1mm) dolů

Pozn.: V případě měření 1.série bylo jedno měření z důvodů velké odlišnosti vyřazeno.

### 8.2.3 Ohyb profilu 3

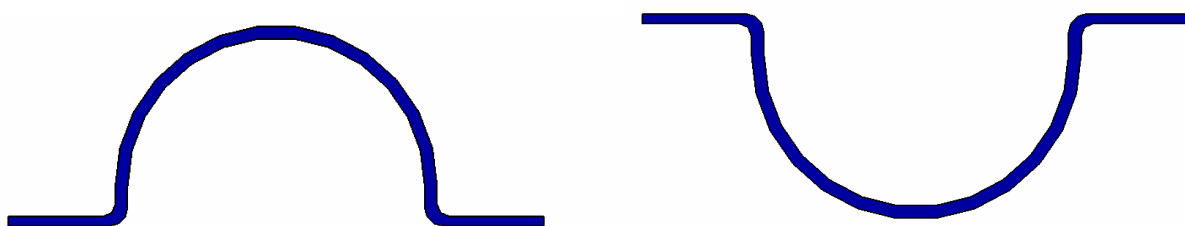
#### Profil 3

Na obrázku (Obr.69) vidíme **Profil č.3** a jeho obecný tvar a také schéma provedení ohybové zkoušky.



Obr. 69. Délka profilu a schéma ohybu

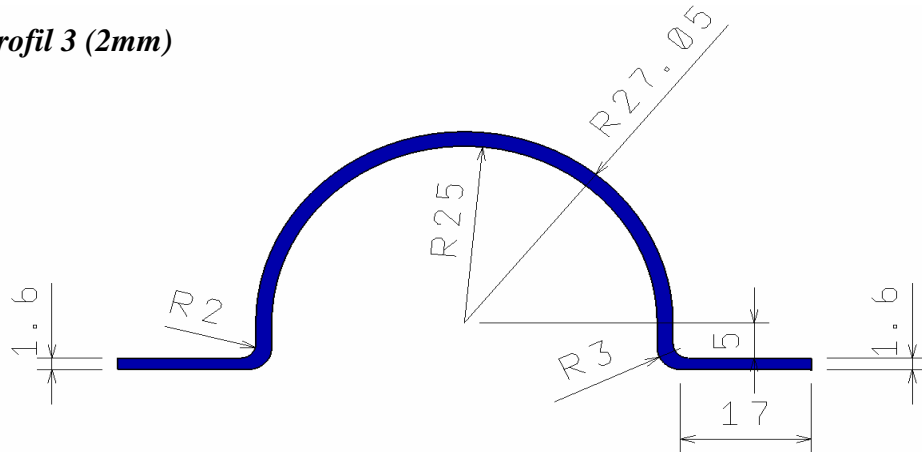
#### Způsob ohybu profilu 3



Obr. 70. Zleva série 1 a série 2

Profil bude zatěžován nejdříve dnem nahoru (série 1) a pak dnem dolů (série 2), jak ukazuje obrázek (Obr.70). *Profil 3* je rozdělen na profily o charakteristické tloušťce 2 mm a tloušťce 1 mm.

## 8.2.3.1 Profil 3 (2mm)

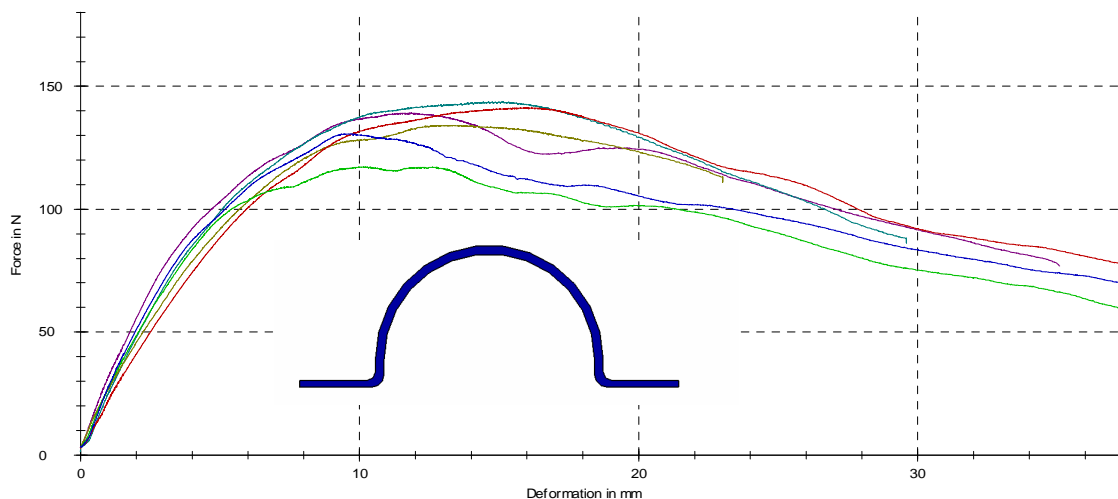


Obr. 71. Rozměry profilu 3 ( 2mm)

Při ohybu **Profilu č.3** (2mm) dnem nahoru, můžeme dle hodnot v tabulce (Tab.9) a obrázku (Obr.72) vidět jednotlivé rozdíly zkoušek. Hodnoty maximální síly (meze pevnosti) se pohybují mezi **144-117 N**. Průměrná hodnota maximální síly činí **134 +/- 3,94 N**.

Profil 3	$F_{\max}$	$y_{F_{\max}}$	$W_{F_{\max}}$	$y_E$	$y_P$
1.série	[N]	[mm]	[N.mm]	[mm]	[mm]
1	139	12	1172,76	5,5	6,5
2	144	15,1	1610,53	5,8	9,3
3	134	13,1	1201,48	6,5	6,6
4	141	15,8	1600,15	6,6	9,2
5	117	10,2	828,61	4,9	5,3
6	131	9,7	837,06	4,9	4,8
$\mu$	134	12,7	1208,43	5,7	6,9
$\sigma$	9,65	2,5	346,02	0,74	1,9
$s_e$	3,94	1,02	141,26	0,30	0,78

Tab. 9. Naměřené hodnoty profilu 3 (2mm) nahoru

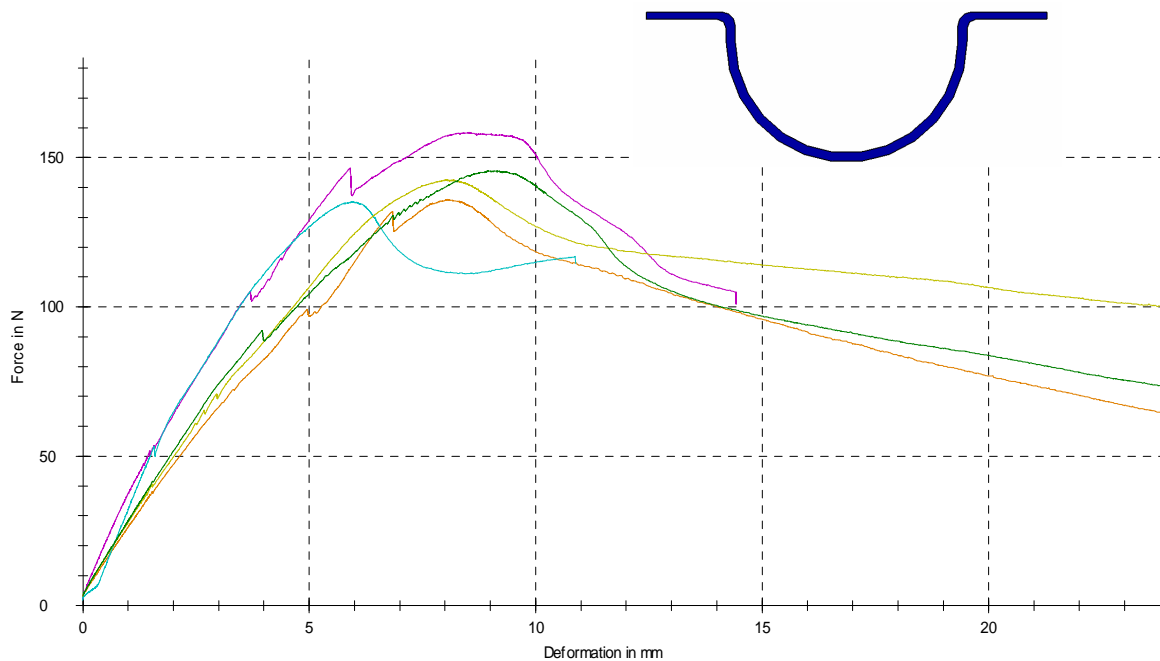


Obr. 72. Profil 3 (2mm) nahoru

Při ohybu *Profilu č.3 (2mm) dnem dolů*, můžeme dle hodnot v tabulce (Tab.10) a obrázku (Obr.73) vidět jednotlivé rozdíly zkoušek. Hodnoty maximální síly (meze pevnosti) se pohybují mezi **158-135 N**. Průměrná hodnota maximální síly činí **144 +/- 4,20 N**.

Profil 3	$F_{max}$	$y_{Fmax}$	$W_{Fmax}$	$y_E$	$y_P$
2.série	[N]	[mm]	[N.mm]	[mm]	[mm]
<b>1</b>	136	8,2	642,35	6,1	2,1
<b>2</b>	158	8,8	885,1	5,3	3,5
<b>3</b>	135	5,8	486,77	3,6	2,2
<b>4</b>	143	8,2	681,39	6,1	2,1
<b>5</b>	146	9,1	806,93	6	3,1
$\mu$	<b>144</b>	<b>8</b>	<b>700,5</b>	<b>5,42</b>	<b>2,6</b>
$\sigma$	<b>9,39</b>	<b>1,3</b>	<b>153,98</b>	<b>1,07</b>	<b>0,7</b>
$s_e$	<b>4,20</b>	<b>0,58</b>	<b>68,86</b>	<b>0,48</b>	<b>0,31</b>

Tab. 10. Naměřené hodnoty profilu 3 (2mm) dolů

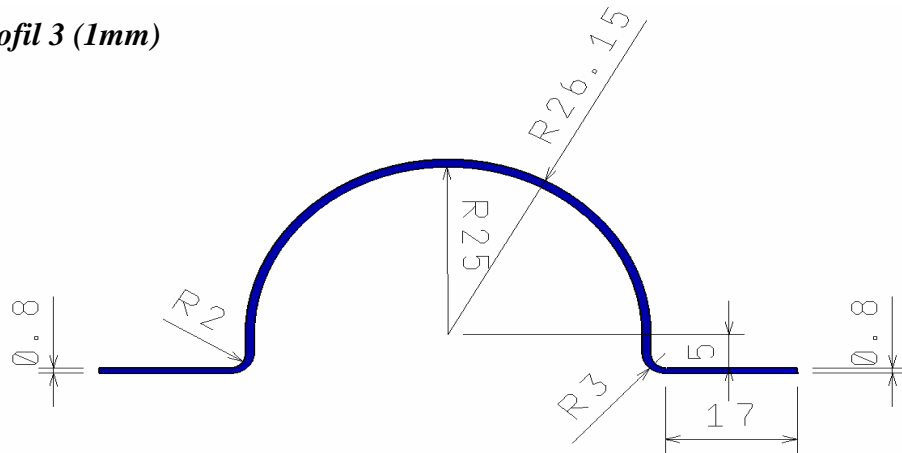


Obr. 73. Profil 3 (2mm) dolů

Pozn.: V případě měření 2.série bylo jedno měření z důvodů velké odlišnosti vyřazeno.



## 8.2.3.2 Profil 3 (1mm)

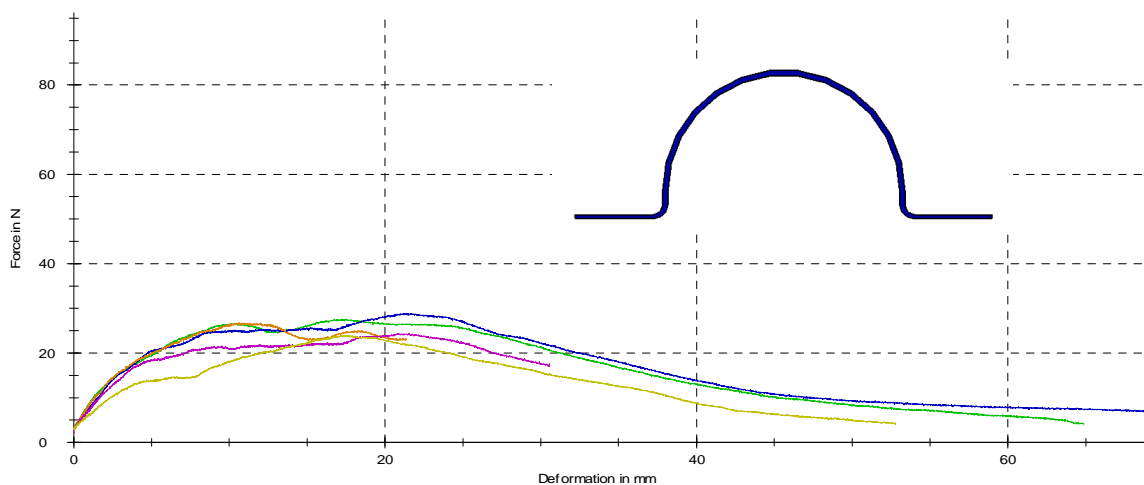


Obr. 74. Rozměry profilu 3 ( 1mm)

Při ohybu **Profilu č.3 (1mm) dnem nahoru**, můžeme dle hodnot v tabulce (Tab.11) a obrázku (Obr.75) vidět jednotlivé rozdíly zkoušek. Hodnoty maximální síly (meze pevnosti) se pohybují mezi **28,7-24 N**. Průměrná hodnota maximální síly činí **26,3 +/- 0,92 N**.

Profil 3	$F_{max}$	$y_{Fmax}$	$W_{Fmax}$	$y_E$	$y_P$
1.série	[N]	[mm]	[N.mm]	[mm]	[mm]
1	27,5	18	373,07	5,7	12,3
2	28,7	22	468,96	6,9	15,1
3	26,7	11,4	199,43	5,7	5,7
4	24,4	21,5	401,12	5,8	15,7
5	24	18,9	286,95	8,8	10,1
$\mu$	26,3	18,4	345,9	6,58	11,8
$\sigma$	2,05	4,3	104,72	1,34	4,1
$s_e$	0,92	1,92	46,83	0,60	1,83

Tab. 11. Naměřené hodnoty profilu 3 (1mm) nahoru

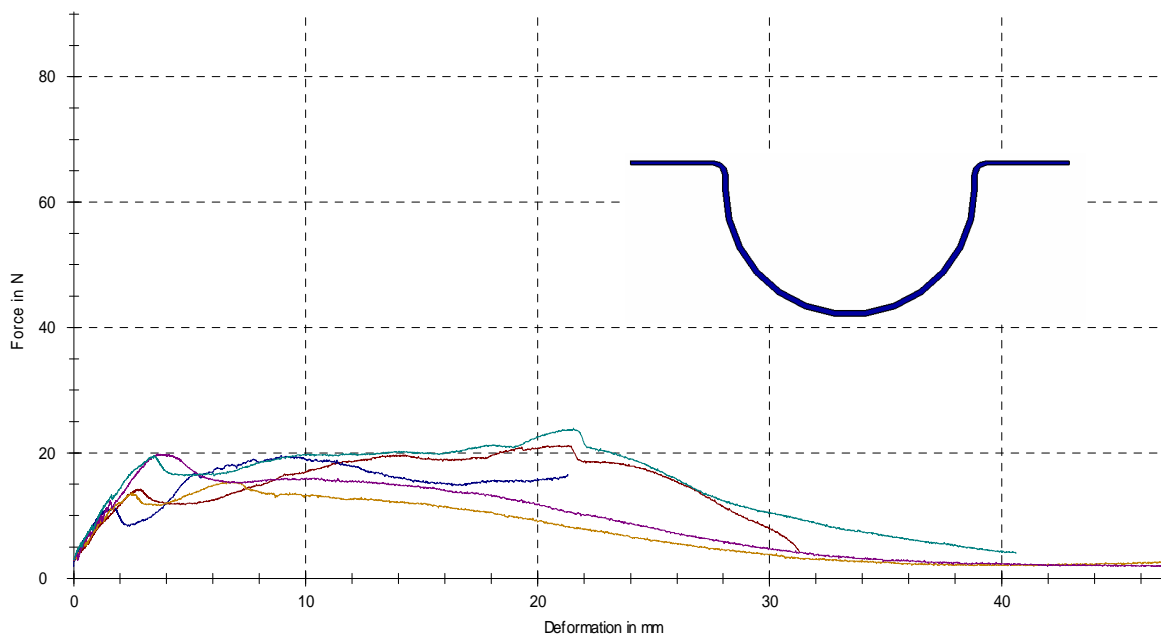


Obr. 75. Profil 3 (1mm) nahoru

Při ohybu *Profilu č.3 (1mm) dnem dolů*, můžeme dle hodnot v tabulce (Tab.12) a obrázku (Obr.76) vidět jednotlivé rozdíly zkoušek. Hodnoty maximální síly (meze pevnosti) se pohybují mezi **19,8-11,4 N**. Průměrná hodnota maximální síly činí **20 +/- 1,38 N**.

Profil 3	$F_{max}$	$y_{Fmax}$	$W_{Fmax}$	$y_E$	$y_P$
2.série	[N]	[mm]	[N.mm]	[mm]	[mm]
<b>1</b>	14,2	21,5	335,62	4,4	17,1
<b>2</b>	11,4	9,9	120,95	4,2	5,7
<b>3</b>	13,6	7,4	79,6	3	4,4
<b>4</b>	19,8	4,4	46,06	3,8	0,6
<b>5</b>	19,6	22	399	3,8	18,2
$\mu$	<b>20</b>	<b>13,1</b>	<b>196,25</b>	<b>3,84</b>	<b>9,2</b>
$\sigma$	<b>3,08</b>	<b>8,2</b>	<b>159,97</b>	<b>0,53</b>	<b>8</b>
$s_e$	<b>1,38</b>	<b>3,67</b>	<b>71,54</b>	<b>0,24</b>	<b>3,58</b>

Tab. 12. Naměřené hodnoty profilu 3 (1mm) dolů



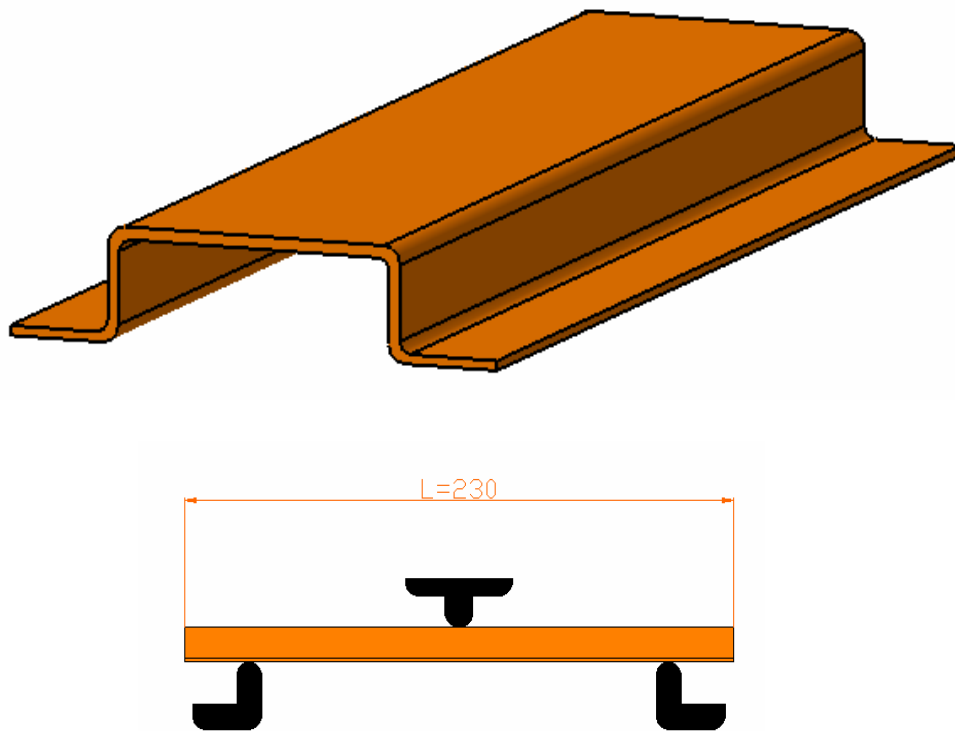
Obr. 76. Profil 3 (1mm) dolů

Pozn.: V případě měření 1.série bylo jedno měření z důvodů velké odlišnosti vyřazeno, stejně tak bylo vyřazeno jedno z měření 2.série.

## 8.2.4 Ohyb profilu 4

### Profil 4

Na obrázku (Obr.77) vidíme **Profil č.4** a jeho obecný tvar a také schéma provedení ohybové zkoušky.



Obr. 77. Délka profilu a schéma ohybu

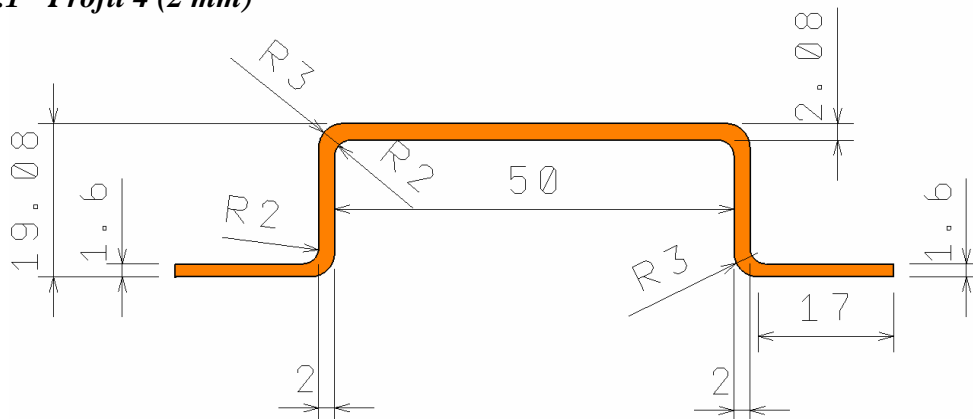
### Způsob ohybu profilu 4



Obr. 78. Zleva série 1 a série 2

Profil bude zatěžován nejdříve dnem nahoru (série 1) a pak dnem dolů (série 2), jak ukazuje obrázek (Obr.78). *Profil 4* je rozdělen na profily o charakteristické tloušťce 2 mm a tloušťce 1 mm.

## 8.2.4.1 Profil 4 (2 mm)

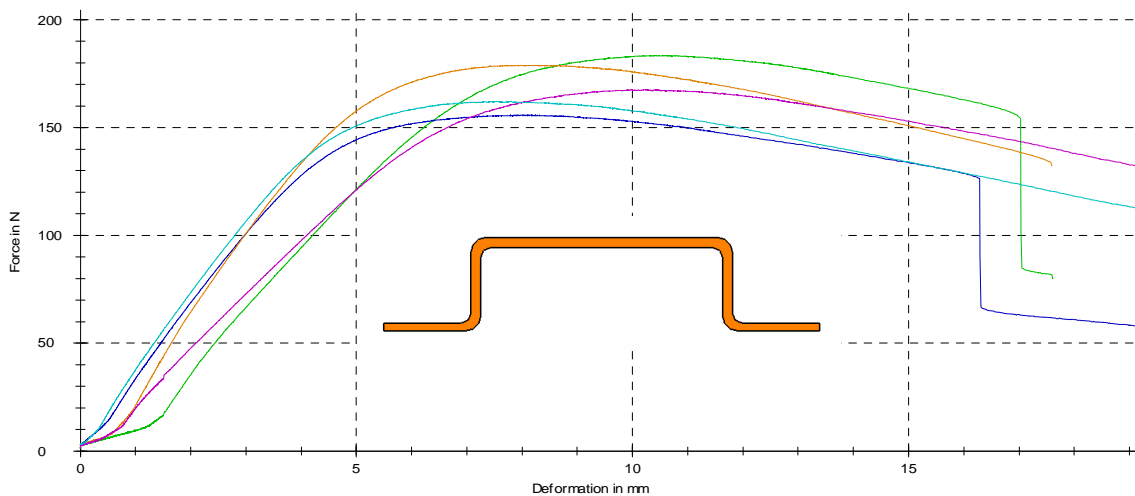


Obr. 79. Rozměry profilu 4 (2 mm)

Při ohybu **Profilu č.4** (2mm) dnem nahoru, můžeme dle hodnot v tabulce (Tab.13) a obrázku (Obr.80) vidět jednotlivé rozdíly zkoušek. Hodnoty maximální síly (meze pevnosti) se pohybují mezi **184-156 N**. Průměrná hodnota maximální síly činí **170 +/- 5,14 N**.

Profil 4	$F_{max}$	$y_{Fmax}$	$W_{Fmax}$	$y_E$	$y_P$
1.série	[N]	[mm]	[N.mm]	[mm]	[mm]
<b>1</b>	184	10,8	1230,94	9,8	4,9
<b>2</b>	156	8	867,48	7,9	3,8
<b>3</b>	179	8,1	940,16	7,7	3,2
<b>4</b>	168	10,2	1105,77	9,9	4,2
<b>5</b>	162	7,8	872,3	7,8	3,5
$\mu$	<b>170</b>	<b>9</b>	<b>1003,33</b>	<b>8,6</b>	<b>3,9</b>
$\sigma$	<b>11,5</b>	<b>1,4</b>	<b>159,62</b>	<b>1,1</b>	<b>0,6</b>
$s_e$	<b>5,14</b>	<b>0,63</b>	<b>71,38</b>	<b>0,49</b>	<b>0,27</b>

Tab. 13. Naměřené hodnoty profilu 4 (2mm) nahoru

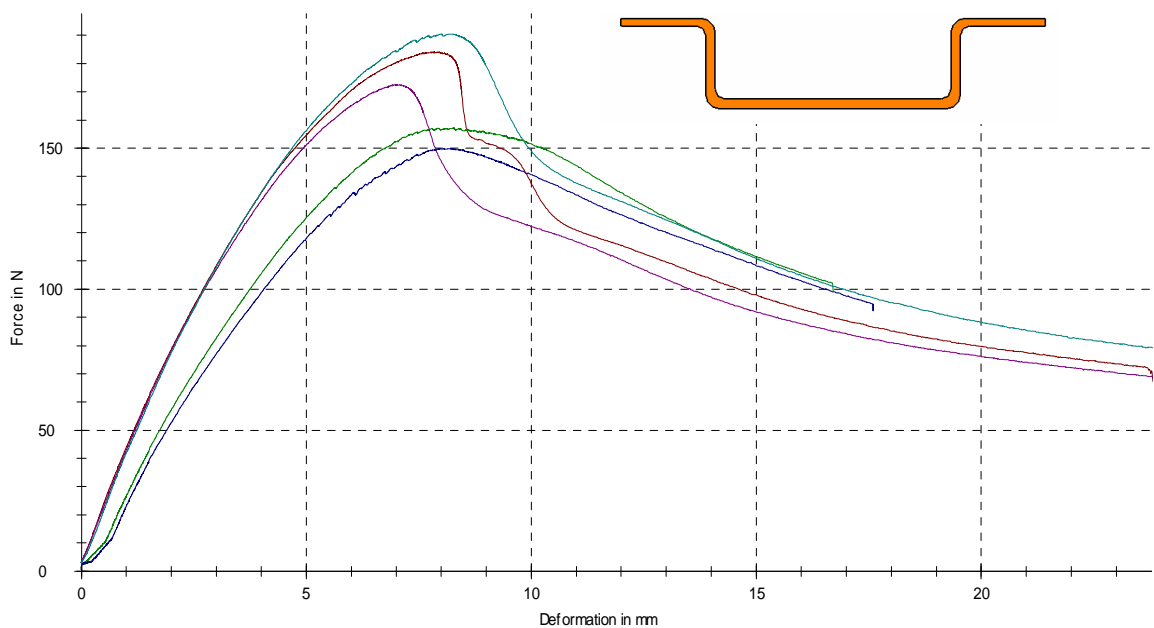


Obr. 80. Profil 4 (2mm) nahoru

Při ohybu *Profilu č.4 (2mm) dnem dolů*, můžeme dle hodnot v tabulce (Tab.14) a obrázku (Obr.81) vidět jednotlivé rozdíly zkoušek. Hodnoty maximální síly (meze pevnosti) se pohybují mezi **191-150 N**. Průměrná hodnota maximální síly činí **171 +/-7,69 N**.

<b>Profil 4</b>	<b>F<sub>max</sub></b>	<b>y<sub>Fmax</sub></b>	<b>W<sub>Fmax</sub></b>	<b>y<sub>E</sub></b>	<b>y<sub>p</sub></b>
<b>2.série</b>	<b>[N]</b>	<b>[mm]</b>	<b>[N.mm]</b>	<b>[mm]</b>	<b>[mm]</b>
<b>1</b>	184	7,9	951,49	8,1	3,1
<b>2</b>	157	8,3	814,06	8,1	3,3
<b>3</b>	150	8,2	747,34	7,9	3,3
<b>4</b>	173	7	762,43	7,1	2,5
<b>5</b>	191	8,2	1005,5	8,3	3,2
<b>μ</b>	<b>171</b>	<b>7,9</b>	<b>856,16</b>	<b>7,9</b>	<b>3,1</b>
<b>σ</b>	<b>17,2</b>	<b>0,5</b>	<b>115,96</b>	<b>0,5</b>	<b>0,3</b>
<b>s<sub>e</sub></b>	<b>7,69</b>	<b>0,22</b>	<b>51,86</b>	<b>0,22</b>	<b>0,13</b>

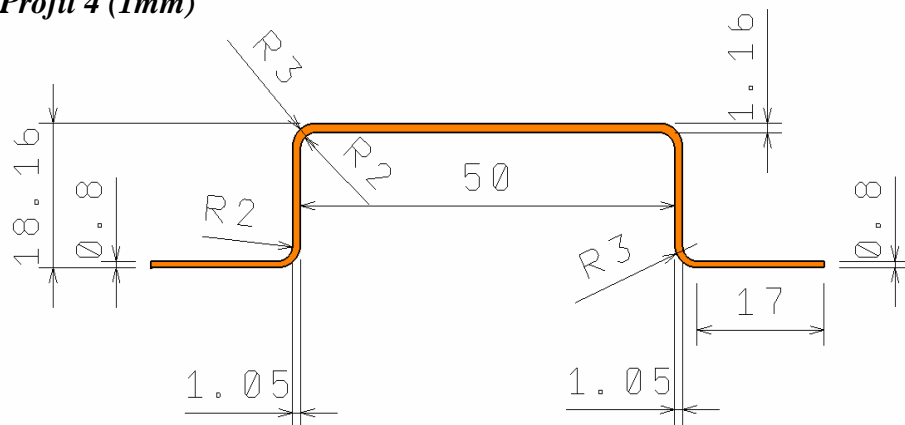
Tab. 14. Naměřené hodnoty profilu 4 (2mm) dolů



Obr. 81. Profil 4 (2mm) dolů

Pozn.: V případě měření 1.série bylo jedno měření z důvodů velké odlišnosti vyřazeno, stejně tak bylo vyřazeno jedno z měření 2.série.

## 8.2.4.2 Profil 4 (1mm)

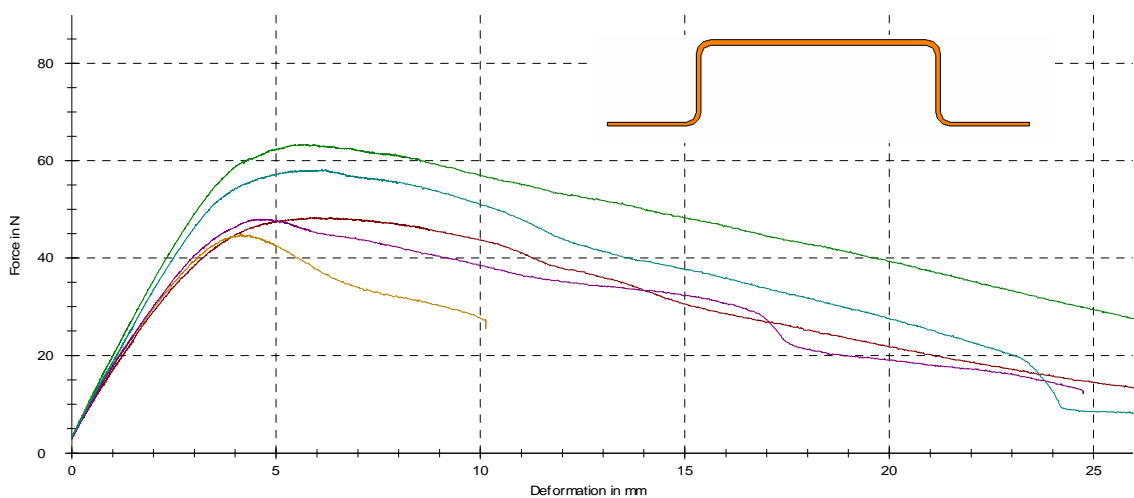


Obr. 82. Rozměry profilu 4 ( 1mm)

Při ohybu **Profilu č.4 (1mm) dnem nahoru**, můžeme dle hodnot v tabulce (Tab.15) a obrázku (Obr.83) vidět jednotlivé rozdíly zkoušek. Hodnoty maximální síly (meze pevnosti) se pohybují mezi **63,3-44,8 N**. Průměrná hodnota maximální síly činí **52,5 +/- 3,52 N**.

Profil 4	$F_{max}$	$y_{Fmax}$	$W_{Fmax}$	$y_E$	$y_P$
1.série	[N]	[mm]	[N.mm]	[mm]	[mm]
1	48,3	6,2	194,32	3,9	2,3
2	63,3	5,9	238,71	4	1,9
3	44,8	4,5	118,02	3,5	1
4	48	5	143,28	3,7	1,3
5	58,2	6,4	248,75	4	2,4
$\mu$	52,5	5,6	188,62	3,82	1,8
$\sigma$	7,86	0,8	57,44	0,21	0,6
$s_e$	3,52	0,36	25,69	0,09	0,27

Tab. 15. Naměřené hodnoty profilu 4 (1mm) nahoru

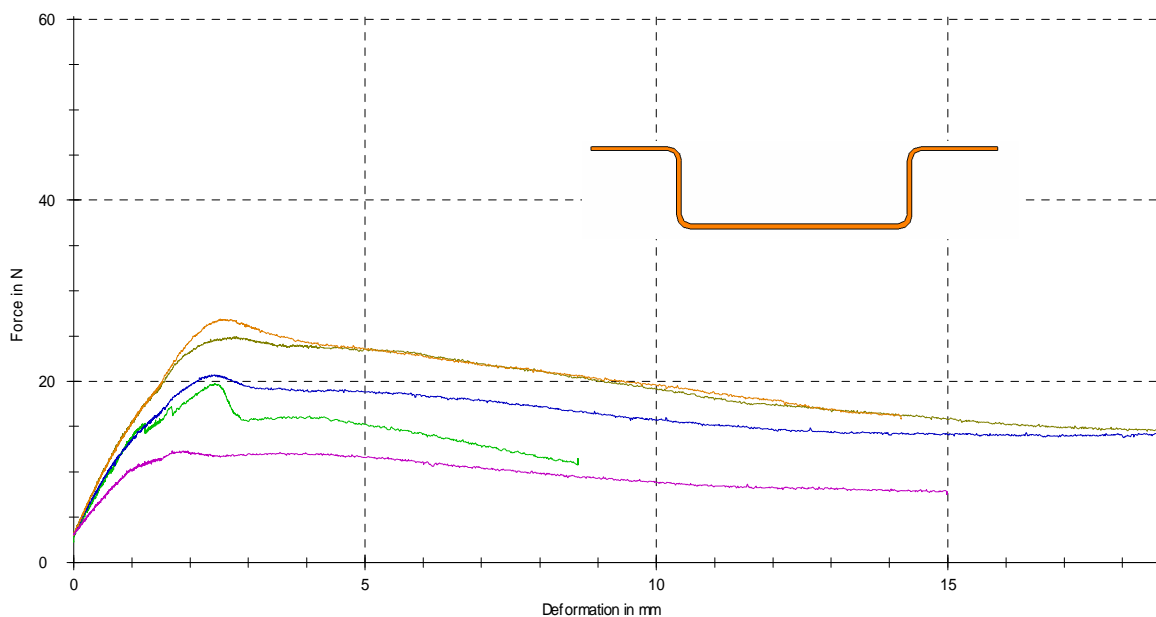


Obr. 83. Profil 4 (1mm) nahoru

Při ohybu *Profilu č.4 (1mm) dnem dolů*, můžeme dle hodnot v tabulce (Tab.16) a obrázku (Obr.84) vidět jednotlivé rozdíly zkoušek. Hodnoty maximální síly (meze pevnosti) se pohybují mezi **26,9-12,3 N**. Průměrná hodnota maximální síly činí **20,9 +/- 2,52 N**.

Profil 4	$F_{max}$	$y_{Fmax}$	$W_{Fmax}$	$y_E$	$y_P$
2.série	[N]	[mm]	[N.mm]	[mm]	[mm]
1	24,9	3,4	47,72	2,7	0,7
2	19,7	2,7	32,38	1,7	1
3	20,7	3,2	32,87	2,9	0,3
4	26,9	3,1	42,87	2,8	0,3
5	12,3	3,2	14,69	3,1	0,1
$\mu$	20,9	3,1	34,11	2,64	0,5
$\sigma$	5,64	0,3	12,68	0,54	0,4
$s_e$	2,52	0,13	5,67	0,24	0,18

Tab. 16. Naměřené hodnoty profilu 4 (1mm) dolů



Obr. 84. Profil 4 (1mm) dolů

Pozn.: V případě měření 1.série bylo jedno měření z důvodů velké odlišnosti vyřazeno, stejně tak bylo vyřazeno jedno z měření 2.série.

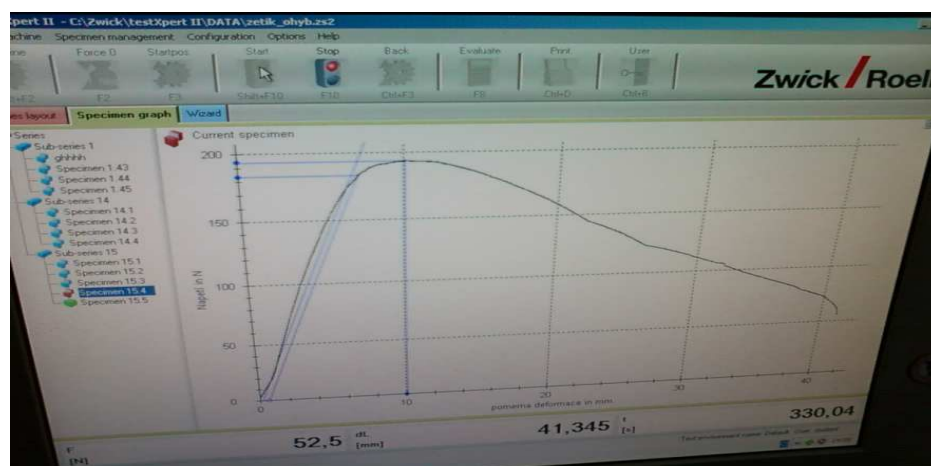
### 8.3 Trhací stroj Zwick a program Test Expert



Obr. 85. Ohyb Profilu 3 (1mm) na trhacím stroji Zwick



Obr. 86. Ohyb Profilu 1 (1mm) na trhacím stroji Zwick



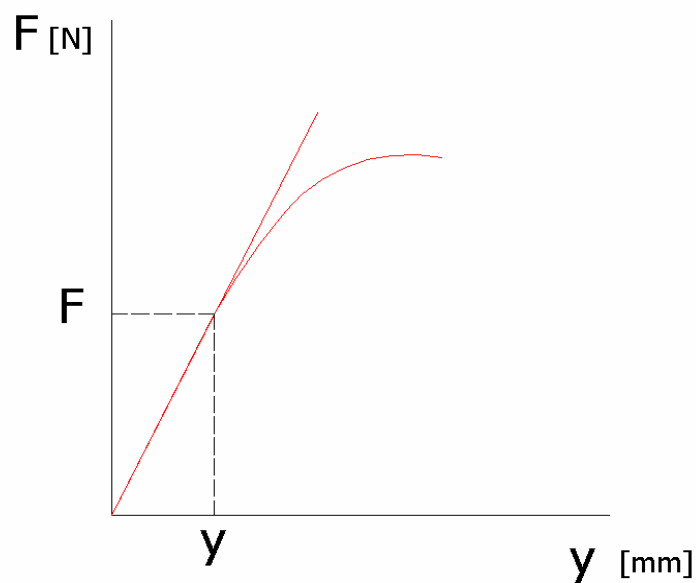
Obr. 87. Program Test Expert a graf závislosti y na F

Na obrázku (Obr.87) vidíme záznam závislosti síly na deformaci v průběhu ohybu jednotlivých profilů, kde na ose y je zobrazena síla [N] při ohybu a na ose x deformace [mm].



## 9 POUŽITÉ VZTAHY A ZNAČENÍ VE VÝSLEDKÁCH U PROFILŮ

Vypočtené hodnoty ohybové tuhosti  $E_{PR} \cdot J_z$ , byly počítány z hodnot odečtené programem *Test Expert 2*. Hodnoty síly  $F$  a průhybu  $y$  jsme odečetli z grafů ohybových zkoušek na základě lineární elasticity, tj. kdy síla  $F$  je úměrná deformaci  $y$ . (viz. Obr. 88). Dále byl spočítán tvarový modul pružnosti profilu „ $E_{PR}$ “, což znamená, že se nejedná o modul pružnosti materiálu „ $E$ “, ale modul geometrie ohýbaného profilu (průřezu), tzn. vliv tvaru profilu, jelikož výpočet modulu pružnosti materiálu z ohybové zkoušky nám software programu *Test Expert 2* neumožňoval.



Obr. 88. Závislost „ $y$  na  $F$ “

**Použité vztahy v následujících tabulkách:**

***Teoretická Ohybová tuhost:***

$$E \cdot J_z = \frac{F \cdot L^3}{y \cdot 48} \quad (73)$$

V našem případě tedy:

***Ohybová tuhost:***

$$E_{PR} \cdot J_z = \frac{F \cdot L^3}{y \cdot 48} \quad (74)$$

**Tvarový modul pružnosti profilu :**

$$E_{PR} = \frac{F.L^3}{y.48.J_z} \quad (75)$$

**Poměrná ohybová tuhost:**

$$k_t = \frac{J_{z(\max)}}{J_z} \quad (76)$$

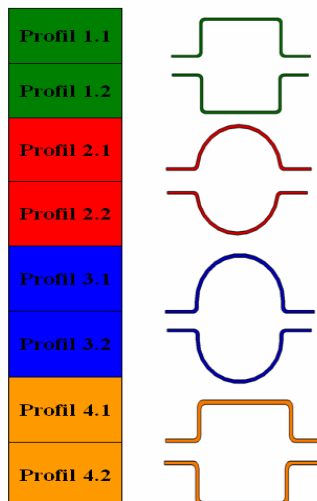
**Poměrná ohybová únosnost:**

$$k_p = \frac{W_{o(\max)}}{W_o} \quad (77)$$

Uvedené vztahy budou vyhodnoceny v následujících kapitolách a pomocí nich se pokusíme objasnit vypočtené výsledky.

Hodnoty vzdáleností krajních vláken „ $e_{max}$ “ a hodnoty kvadratických momentů „ $J_z$ “, které jsou uvedeny v následujících tabulkách byly odečteny z programu *CATIA V5R18* po vymodelování jednotlivých profilů v tomto programu.

**Značení v tabulce**



*Obr. 89. Orientace profilů*

Dle obrázku (Obr.89) můžeme tedy vidět, že značení v tabulkách např. *Profil 1.1* znamená profil s orientací při ohybu dnem nahoře, *Profil 1.2* s orientací dnem dole.

## 10 PROFILY Z TLOUŠŤKY 2 MM

V tabulce (Tab.17) vidíme vypočtené hodnoty profilů orientovaných dnem nahoru a dnem dolů. Hodnoty síly  $F$  a průhybu  $y$  jsou průměrné hodnoty z každé série měření.

2 mm	$e_{\max}$	$J_z$	L	F	y	$E_{PR} \cdot J_z$	$E_{PR}$
	[mm]	[mm <sup>4</sup> ]	[mm]	[N]	[mm]	[N.mm <sup>2</sup> ]	[MPa]
Profil 1.1	15,13	155400	180	90	2,8	3905357	<b>25,13</b>
Profil 1.2	15,13	155400	180	95	2,3	5018478	<b>32,29</b>
Profil 2.1	14,67	133700	180	44	1,86	2874194	<b>21,50</b>
Profil 2.2	14,67	133700	180	62	2,3	3275217	<b>24,50</b>
Profil 3.1	17,57	150000	180	48	2,15	2712558	<b>18,08</b>
Profil 3.2	17,57	150000	180	50	1,88	3231383	<b>21,54</b>
Profil 4.1	11,17	146600	180	65	2	3948750	<b>26,94</b>
Profil 4.2	11,17	146600	180	90	2,08	5257212	<b>35,86</b>

Tab. 17. Vypočtené hodnoty profilů (2mm)

### 10.1 Srovnání tvarových modulů pružnosti profilů ( 2 mm)

2 mm	$e_{\max}$	$J_z$	L	F	y	$E_{PR} \cdot J_z$	$E_{PR}$
	[mm]	[mm <sup>4</sup> ]	[mm]	[N]	[mm]	[N.mm <sup>2</sup> ]	[MPa]
Profil 4.2	11,17	146600	180	90	2,08	5257212	<b>35,86</b>
Profil 1.2	15,13	155400	180	95	2,3	5018478	<b>32,29</b>
Profil 4.1	11,17	146600	180	65	2	3948750	<b>26,94</b>
Profil 1.1	15,13	155400	180	90	2,8	3905357	<b>25,13</b>
Profil 2.2	14,67	133700	180	62	2,3	3275217	<b>24,50</b>
Profil 3.2	17,57	150000	180	50	1,88	3231383	<b>21,54</b>
Profil 2.1	14,67	133700	180	44	1,86	2874194	<b>21,50</b>
Profil 3.1	17,57	150000	180	48	2,15	2712558	<b>18,08</b>

Tab. 18. Srovnání tvarových modulů profilů (2 mm)

V tabulce (Tab.18) můžeme vidět seřazení profilů dle největšího modulu po nejmenší. Největších hodnot modulu tedy dosahuje **Profil č.4**, nejnižší modul má pak **Profil č.3**. Z tabulky můžeme vidět, že tuhost popř. modul profilů je závislý na smyslu otočení profilů při ohybu (tzn. dnem nahoru nebo dnem dolů), proto bude tedy lepší profily vyhodnocovat odděleně.

## 10.2 Srovnání tvarových modulů profilů s orientací dnem nahoru (2 mm)

2 mm nahoru	$e_{\max}$ [mm]	$J_z$ [mm <sup>4</sup> ]	L [mm]	F [N]	y [mm]	$E_{PR} \cdot J$ [N.mm <sup>2</sup> ]	$E_{PR}$ [MPa]
<b>Profil 4.1</b>	11,17	146600	180	65	2	3948750	<b>26,94</b>
<b>Profil 1.1</b>	15,13	155400	180	90	2,8	3905357	<b>25,13</b>
<b>Profil 2.1</b>	14,67	133700	180	44	1,86	2874194	<b>21,50</b>
<b>Profil 3.1</b>	17,57	150000	180	48	2,15	2712558	<b>18,08</b>

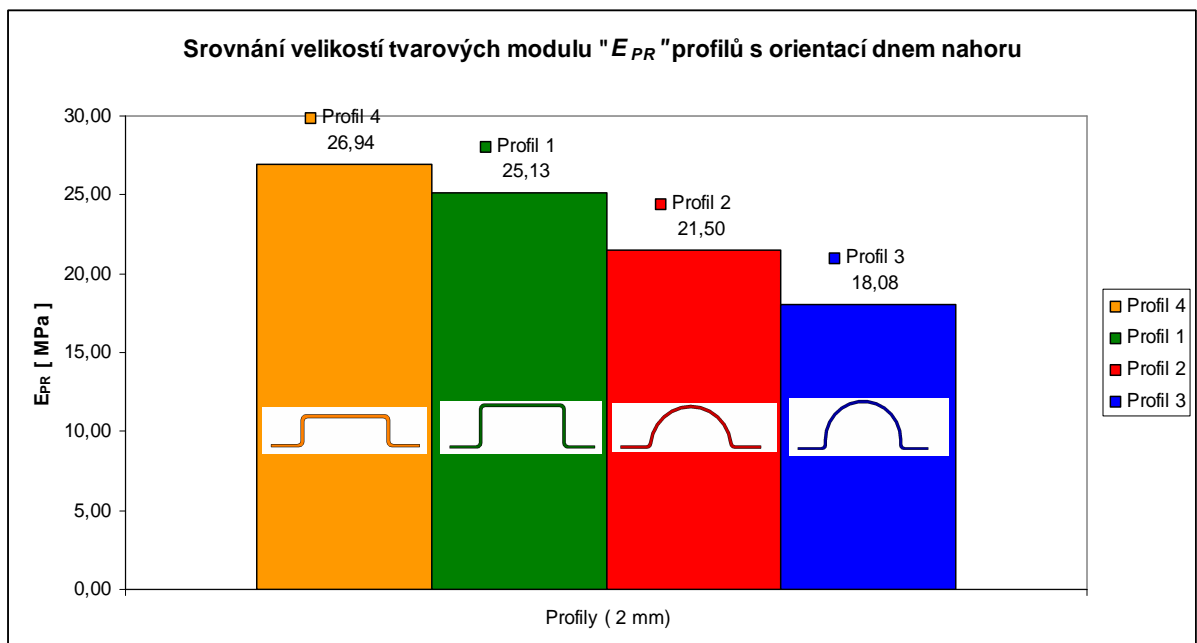
Tab. 19. Srovnání tvarových modulů profilů s orientací dnem nahoru (2 mm)

V tabulce (Tab.19) vidíme, že **Profil č.4** má nejvyšší tvarový modul. Nejnižší modul má **Profil č.3**. Rozdíly mezi těmito profily vzhledem k profilu s nejvyšším tvarovým modulem což je **Profilu č.4** si můžeme lépe přestavit v procentech.

2 mm nahoru	$E_{PR}$ [MPa]	$E_{PR}$ [%]
<b>Profil 4.1</b>	26,94	<b>0</b>
<b>Profil 1.1</b>	25,13	<b>6,71</b>
<b>Profil 2.1</b>	21,50	<b>20,2</b>
<b>Profil 3.1</b>	18,08	<b>32,88</b>

Tab. 20. Rozdíly  $E_{PR}$  v % (2 mm, nahoru)

Rozdíl v modulech můžeme také znázornit graficky.



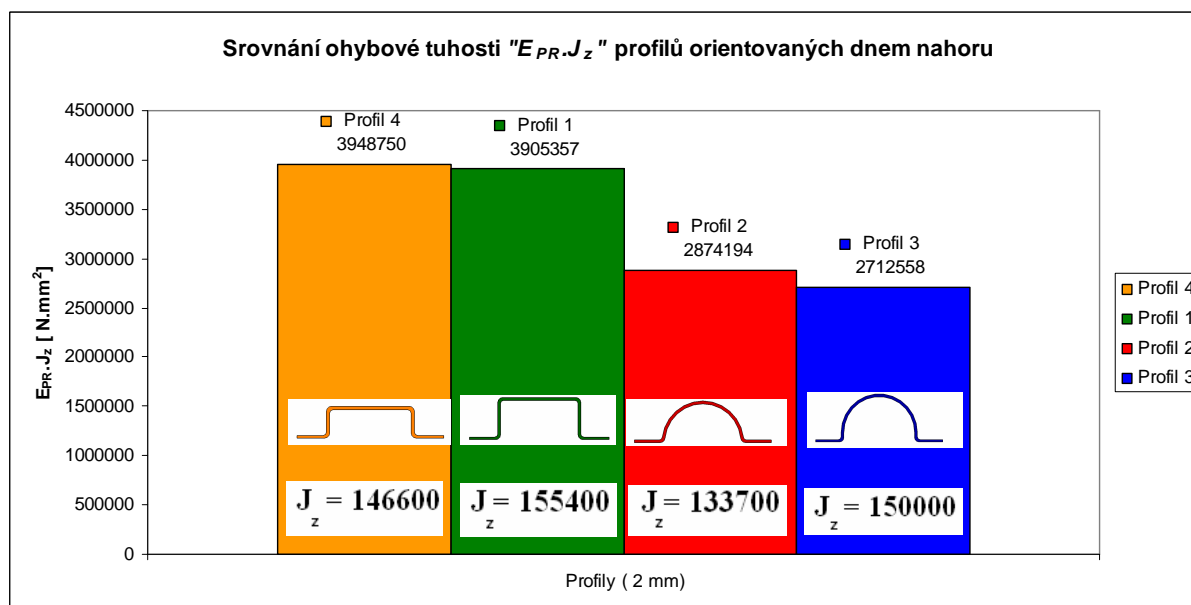
Obr. 90. Rozdíl tvarových modulů profilů s orientací dnem nahoru (2 mm)

### 10.2.1 Vliv geometrie průřezu profilů na zvýšení ohybové tuhosti a únosnosti profilů orientovaných dnem nahoru (2mm)

Ohybová tuhosti je závislá na materiálu „ $E$ “ tj. modulu pružnosti a taky na samotné geometrii profilu „ $J_z$ “ tj. kvadratickém momentu. V našem případě však můžeme vliv materiálu vypustit, protože u všech profilů byl použitý stejný materiál, takže modul pružnosti „ $E$ “ byl pro všechny profily stejný. Je tedy zřejmé, že se zaměříme na geometrii profilů a její vliv na tuhost profilů při ohybu. Je důležité si uvědomit, že ohybová tuhost se zvyšujícím se kvadratickým momentem stoupá. V našem případě jsme však z ohybové zkoušky nevy počítali modul materiálu ale již zmíněný tvarový modul profilu „ $E_{PR}$ “, takže hodnoty ohybové tuhosti budou ovlivněno kvadratickým momentem „ $J_z$ “ a tvarovým modulem „ $E_{PR}$ “.

2 mm	$J_z$	$E_{PR}$	$E_{PR} \cdot J_z$
nahoru	[mm <sup>4</sup> ]	[MPa]	[N.mm <sup>2</sup> ]
<b>Profil 1.1</b>	155400	25,13	<b>3905357</b>
<b>Profil 3.1</b>	150000	18,08	<b>2712558</b>
<b>Profil 4.1</b>	146600	26,94	<b>3948750</b>
<b>Profil 2.1</b>	133700	21,5	<b>2874194</b>

Tab. 21. Vliv  $J_z$  na  $E_{PR} \cdot J_z$  (2mm, nahoru)



Obr. 91. Srovnání ohybové tuhosti profilů orientovaných dnem nahoru (2mm)

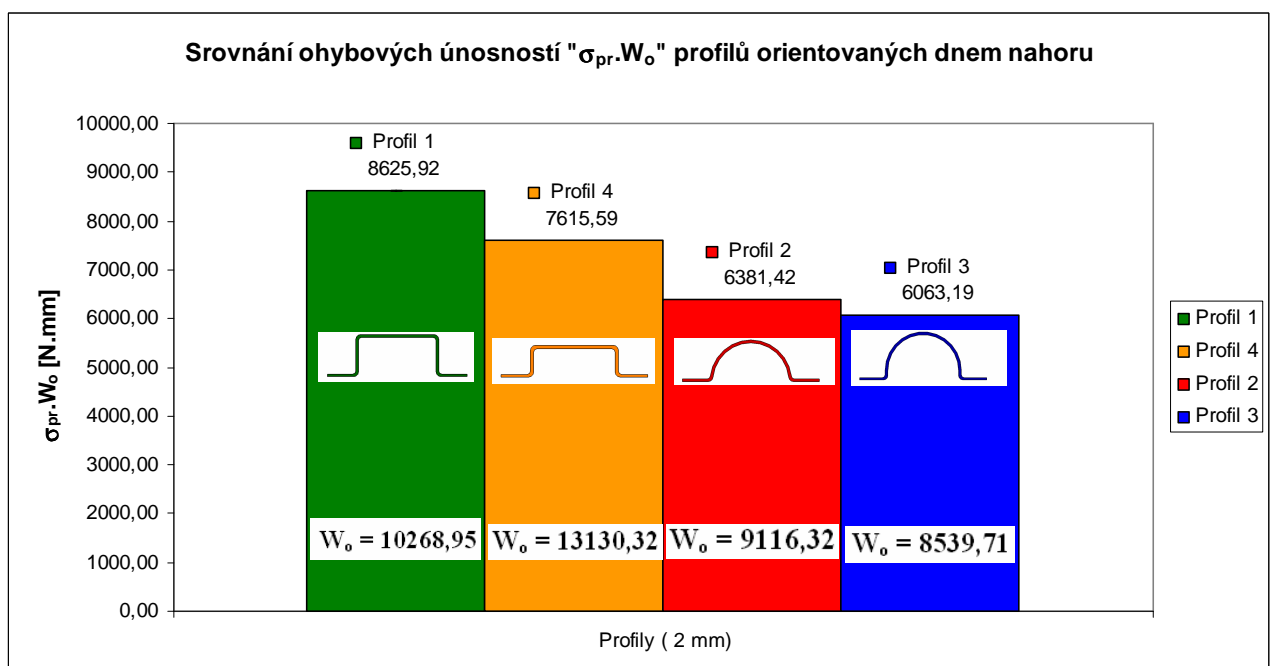
Vidíme tedy, že profil s nejvyšším kvadratickým momentem (**Profil č.1**) ve skutečnosti nevykazuje nejvyšší ohybovou tuhost. Nejvyšší ohybovou tuhost vykazuje **Profil č.4**.

Ohybová únosnost je dána součinem meze pevnosti materiálu  $\sigma_p$  a modulu průřezu v ohybu  $W_o$ . Z ohybové zkoušky jsme však nevypočítali mez pevnosti materiálu, ale mez pevnosti tvaru profilu. Označíme ho tedy podobně jako tomu bylo u ohybové tuhosti a to  $\sigma_{pr}$ .

V tabulce (Tab.22) vidíme srovnání profilů od největšího modulu průřezu v ohybu po nejmenší a jejich hodnoty meze pevnosti, jak v konečném důsledku ovlivnily ohybovou únosnost.

2 mm	$\sigma_{pr}$	$W_o$	$\sigma_{pr} \cdot W_o$
nahoru	[MPa]	[mm <sup>3</sup> ]	[ N.mm]
Profil 4.1	0,58	13130,32	7615,59
Profil 1.1	0,84	10268,95	8625,92
Profil 2.1	0,7	9116,32	6381,42
Profil 3.1	0,71	8539,71	6063,19

Tab. 22. Ohybová únosnost (2mm,nahoru)



Obr. 92. Srovnání ohybových únosností profilů orientovaných dnem nahoru (2 mm)

Dle obrázku (Obr.92) můžeme vidět, že profil s nejvyšším modulem průřezu v ohybu (**Profil č.4**) nevykazuje nejvyšší ohybovou únosnost. Nejvyšší únosnost má **Profil č.1**.

Je zřejmé, že **Profil 1** a **Profil č.4** se vyznačují větší pevností než **Profil č.3** a **Profil č.2**.

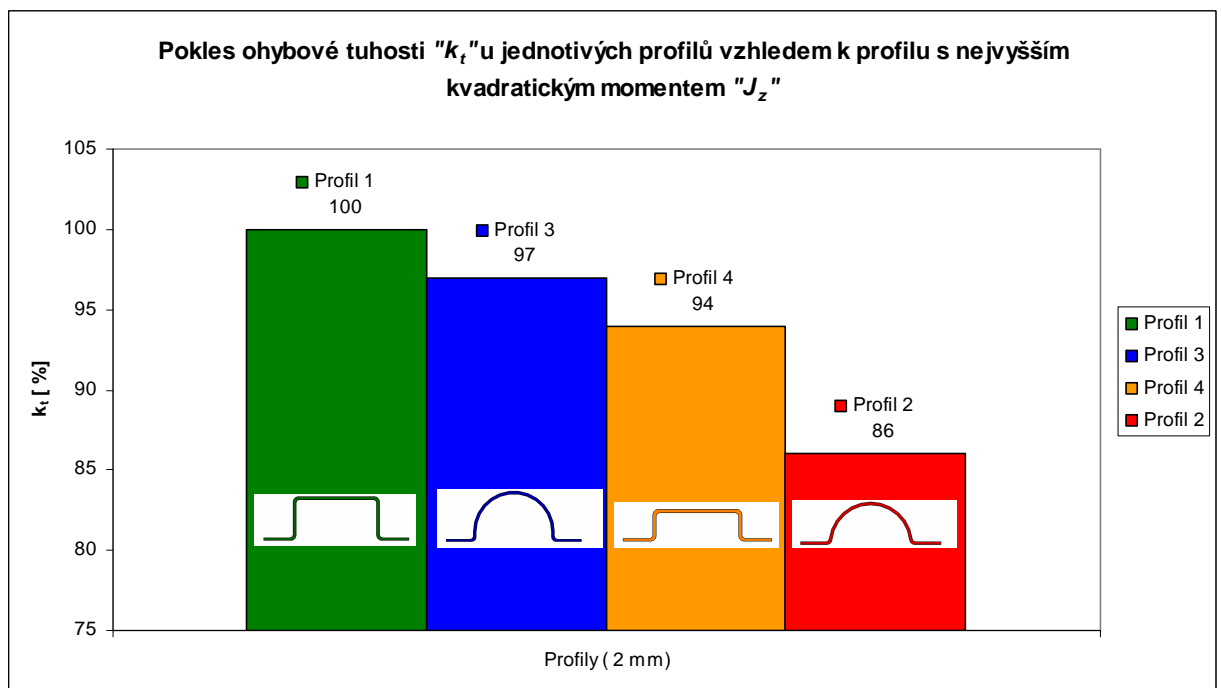
### Poměrná ( teoretická) ohybová tuhost „ $k_t$ “

Je tedy dána poměrem kvadratických momentů. Modul pružnosti „ $E$ “ neuvažujeme (stejný materiál). V tabulce (Tab.23) vidíme srovnání poměrných ohybových tuhostí profilů vzhledem k profilu s největším kvadratickým momentem, což je **Profil č.1**.

Je zřejmé, že tuhost **Profilu 3** z hlediska kvadratického momentu je o 3 % (97 ze 100) menší než tuhost **Profilu 1**. Tuhost **Profilu 4** o 6 % a tuhost **Profilu 2** o 14 %.

2 mm nahoru	$J_z$ [mm <sup>4</sup> ]	$k_t$ [%]
<b>Profil 1.1</b>	<b>155400</b>	100
<b>Profil 3.1</b>	<b>150000</b>	97
<b>Profil 4.1</b>	<b>146600</b>	94
<b>Profil 2.1</b>	<b>133700</b>	86

Tab. 23. Poměrná ohybová tuhost  
profilů (2mm ,nahoru)



Obr. 93. Poměrná ohybová tuhost profilů orientovaných dnem nahoru (2 mm)

Dle obrázku (Obr.93) můžeme vidět, že **Profil č.1** má nejvyšší kvadratický moment a tudíž nejvíce přispívá na ohybovou tuhost ze všech 4 profilů. Můžeme si všimnout, že rozdíly mezi poměrnými tuhostmi nejsou tak velké. Pohybují se mezi 3-14%.

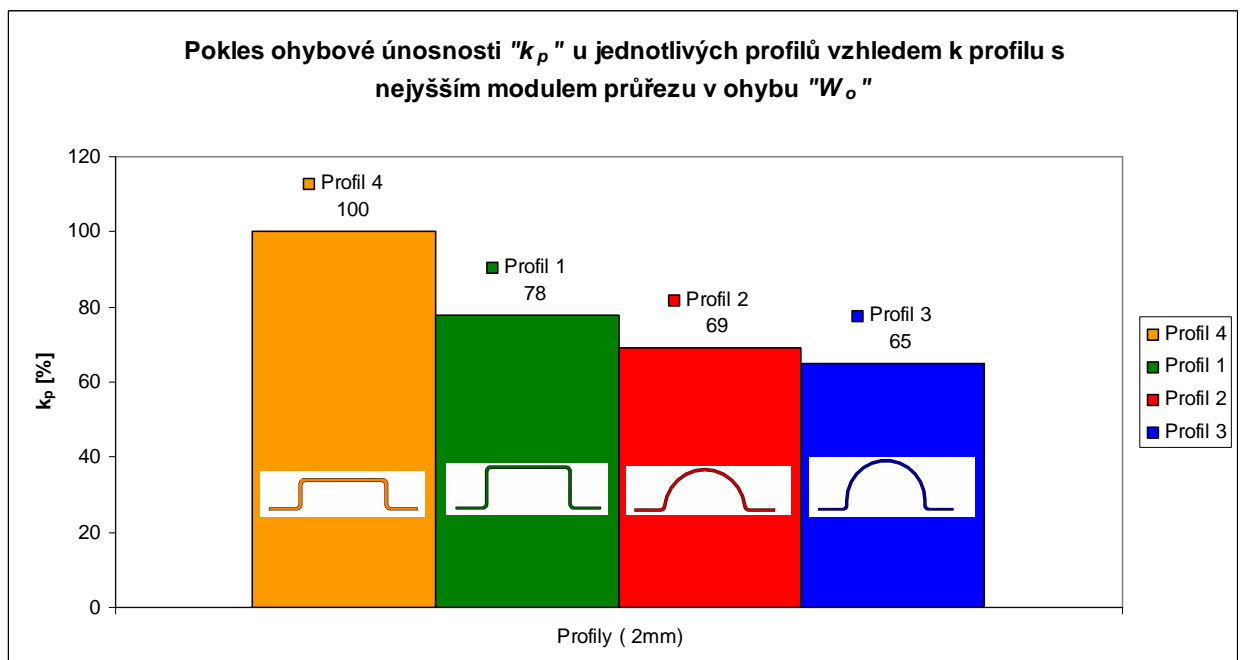
### Poměrná (teoretická) ohybová únosnost „ $k_p$ “

Je dána poměrem modulů průřezu v ohybu tzn., že ohybová únosnost nemusí vždy stoupat s rostoucím kvadratickým momentem, protože je také závislá na vzdálenosti krajního vlákna profilu, tzn. na poloze těžiště a tedy na rozložení a optimálním využitím materiálu průřezu profilu. Mez pevnosti materiálu neuvažujeme (stejný materiál). V tabulce (Tab.24) vidíme srovnání poměrných ohybových únosností profilů vzhledem k profilu s největším modulem průřezu v ohybu, což je **Profil č.4**.

Je zřejmé, že únosnost **Profilu 1** z hlediska modulu průřezu v ohybu je o 22 % (78 ze 100) menší než únosnost **Profilu 4**. Únosnost **Profilu 2** o 31 % a únosnost **Profilu 3** o 35 %.

2 mm nahoru	$J_z$ [mm <sup>4</sup> ]	$e_{max}$ [mm]	$W_o$ [mm <sup>3</sup> ]	$k_p$ [%]
<b>Profil 4.1</b>	146600	11,17	<b>13130,32</b>	100
<b>Profil 1.1</b>	155400	15,13	<b>10268,95</b>	78
<b>Profil 2.1</b>	133700	14,67	<b>9116,32</b>	69
<b>Profil 3.1</b>	150000	17,57	<b>8539,71</b>	65

Tab. 24. Poměrná ohybová únosnost profilu (2 mm, nahoru)



Obr. 94. Poměrná ohybová únosnost profilů orientovaných dnem nahoru (2 mm)

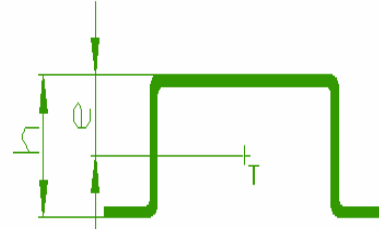
Dle obrázku (Obr.94) můžeme vidět, že **Profil č.1** má nejvyšší ohybovou únosnost. Nejnižší pak **Profil č.3**. Rozdíly mezi únosnostmi už jsou však větší a to mezi 22-35%.



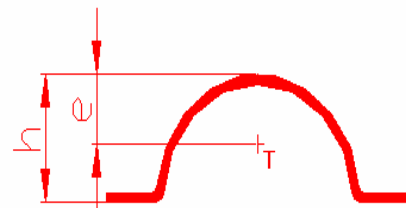
10.2.2 Vliv poměru výšky profilu „h“ a vzdálenosti krajního vlákna „ $e_{max}$ “ na ohybovou tuhost „ $E_{PR} \cdot J_z$ “

Naměřené a vypočtené hodnoty

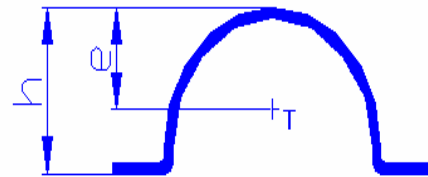
2 mm	$e_{max}$	h	$h/e_{max}$	$E_{PR} \cdot J_z$
nahoru	[mm]	[mm]	[-]	[N.mm <sup>2</sup> ]
<b>Profil 1.1</b>	15,13	26,83	1,77	3905357



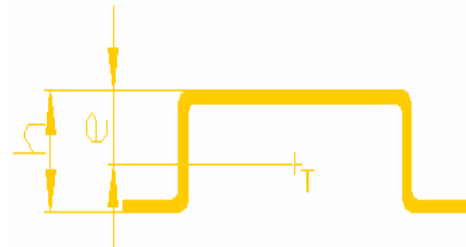
2 mm	$e_{max}$	h	$h/e_{max}$	$E_{PR} \cdot J_z$
nahoru	[mm]	[mm]	[-]	[N.mm <sup>2</sup> ]
<b>Profil 2.1</b>	14,67	26,95	1,84	2874194



2 mm	$e_{max}$	h	$h/e_{max}$	$E_{PR} \cdot J_z$
nahoru	[mm]	[mm]	[-]	[N.mm <sup>2</sup> ]
<b>Profil 3.1</b>	17,57	33,65	1,92	2712558



2 mm	$e_{max}$	h	$h/e_{max}$	$E_{PR} \cdot J_z$
nahoru	[mm]	[mm]	[-]	[N.mm <sup>2</sup> ]
<b>Profil 4.1</b>	11,17	19,08	1,71	3948750



Seřazení poměrů „ $h/e_{max}$ “ od nejmenšího po největší:

2 mm	$e_{max}$	h	$h/e_{max}$
nahoru	[mm]	[mm]	[-]
<b>Profil 4.1</b>	11,17	19,08	<b>1,71</b>
<b>Profil 1.1</b>	15,13	26,83	<b>1,77</b>
<b>Profil 2.1</b>	14,67	26,95	<b>1,84</b>
<b>Profil 3.1</b>	17,57	33,65	<b>1,92</b>

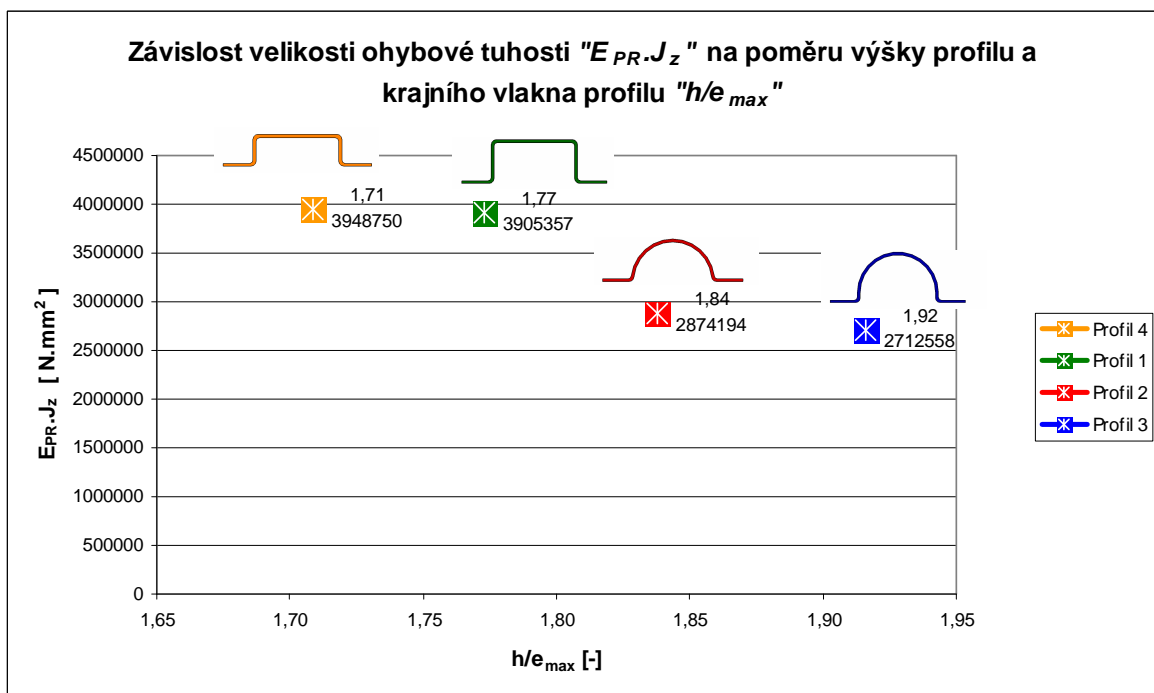
Tab. 25. Seřazení poměrů  $h/e_{max}$  (2mm)

### Grafické znázornění vypočtených hodnot

Dle tabulky (Tab.26) vidíme, že čím menší je poměr mezi výškou profilu a vzdáleností krajního vlákna profilu, tím ohybová tuhost stoupá.

2 mm	$e_{max}$	h	$h/e_{max}$	$E_{PR} \cdot J_z$
nahoru	[mm]	[mm]	[-]	[N.mm <sup>2</sup> ]
<b>Profil 4.1</b>	11,17	19,08	<b>1,71</b>	<b>3948750</b>
<b>Profil 1.1</b>	15,13	26,83	<b>1,77</b>	<b>3905357</b>
<b>Profil 2.1</b>	14,67	26,95	<b>1,84</b>	<b>2874194</b>
<b>Profil 3.1</b>	17,57	33,65	<b>1,92</b>	<b>2712558</b>

Tab. 26. Vliv  $h/e_{max}$  na  $E_{PR} \cdot J_z$



Obr. 95. Vliv  $h/e_{max}$  na  $E_{PR} \cdot J_z$

Dle obrázku (Obr.95) můžeme vidět, že poměr  $h/e_{max}$  má pravděpodobně vliv na ohybovou tuhost. Se zvyšujícím se poměrem ohybová tuhost klesá, profil ztrácí rychleji stabilitu a rychleji se otvírá. Se snižujícím poměrem ohybová tuhost stoupá, profil je více tuhý a více stabilní, pomaleji se otvírá (bortí).

### 10.3 Srovnání tvarových modulů profilů s orientací dnem dolů (2 mm)

2 mm dolů	$e_{\max}$ [mm]	$J_z$ [mm <sup>4</sup> ]	L [mm]	F [N]	y [mm]	$E_{PR} \cdot J_z$ [N·mm <sup>2</sup> ]	$E_{PR}$ [MPa]
<b>Profil 4.2</b>	11,17	146600	180	90	2,08	5257212	<b>35,86</b>
<b>Profil 1.2</b>	15,13	155400	180	95	2,3	5018478	<b>32,29</b>
<b>Profil 2.2</b>	14,67	133700	180	62	2,3	3275217	<b>24,50</b>
<b>Profil 3.2</b>	17,57	150000	180	50	1,88	3231383	<b>21,54</b>

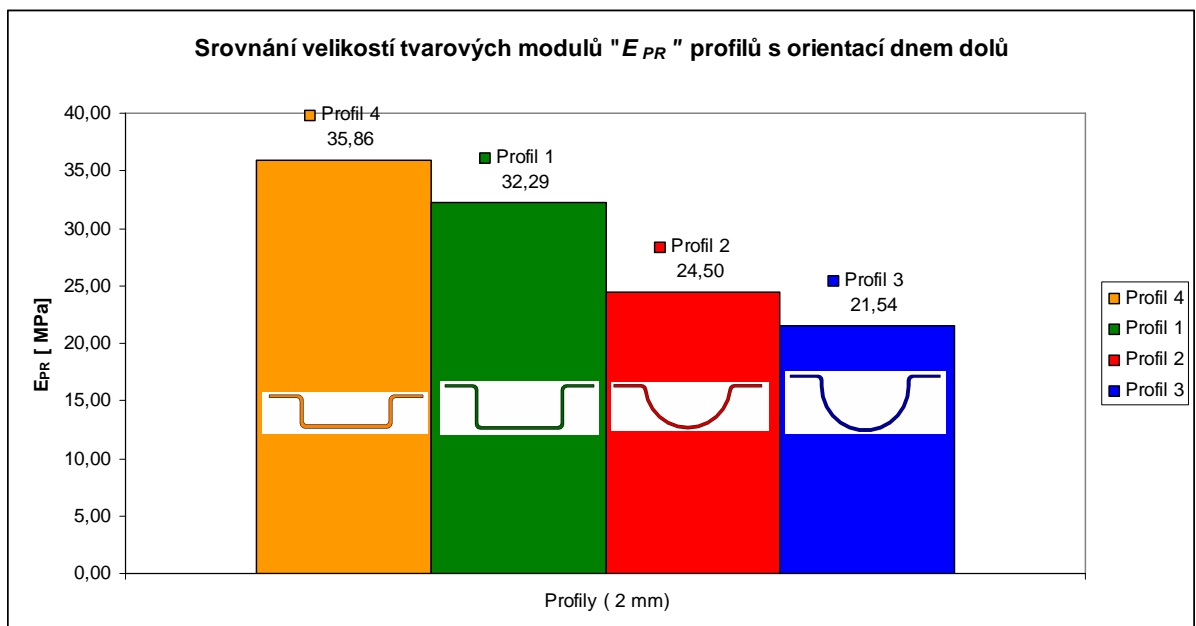
Tab. 27. Srovnání tvarových modulů profilů s orientací dnem dolů (2 mm)

V tabulce (Tab.27) vidíme, že **Profil č.4** má nejvyšší tvarový modul. Nejnižší modul má **Profil č.3**. Rozdíly mezi těmito profily vzhledem k profilu s nejvyšším tvarovým modulem, což je **Profilu č.4** si můžeme lépe přestavit v procentech.

2 mm dolů	$E_{PR}$ [MPa]	$E_{PR}$ [%]
<b>Profil 4.2</b>	35,86	<b>0</b>
<b>Profil 1.2</b>	32,29	<b>9,94</b>
<b>Profil 2.2</b>	24,50	<b>31,67</b>
<b>Profil 3.2</b>	21,54	<b>40</b>

Tab. 28. Rozdíly  $E_{PR}$  v % (2 mm, dolů)

Rozdíl v modulech můžeme také znázornit graficky.



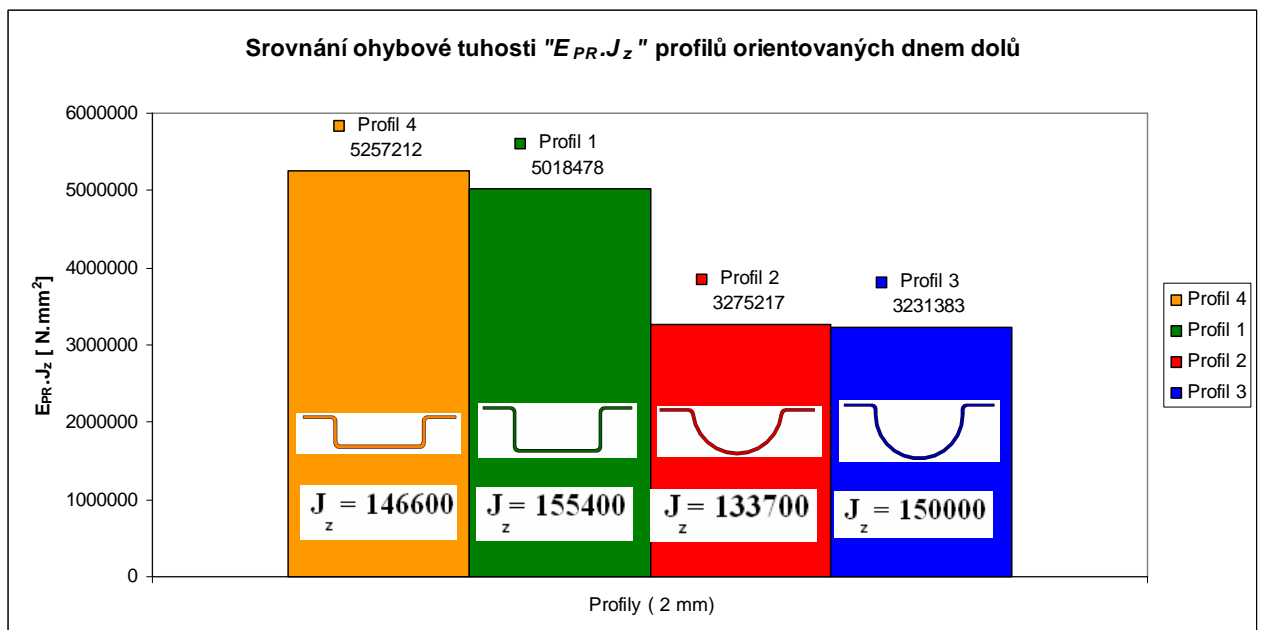
Obr. 96. Rozdíl tvarových modulů profilů s orientací dnem nahoru (2 mm)

### 10.3.1 Vliv geometrie průřezu profilů na zvýšení ohybové tuhosti a únosnosti profilů orientovaných dnem dolů (2 mm)

Vyhodnocení budeme provádět stejně jako u profilů orientovaných dnem nahoru. Opět se zaměříme na samotnou geometrii profilů a její vliv na mechanické chování. V tabulce (Tab.29) vidíme seřazení profilů s nejvyšším kvadratickým momentem po profil s nejmenším kvadratickým momentem a jejich vliv na ohybovou tuhost.

2 mm dolů	$J_z$ [mm <sup>4</sup> ]	$E_{PR}$ [MPa]	$E_{PR} \cdot J_z$ [N.mm <sup>2</sup> ]
<b>Profil 1.2</b>	155400	32,29	<b>5018478</b>
<b>Profil 3.2</b>	150000	21,54	<b>3231383</b>
<b>Profil 4.2</b>	146600	35,86	<b>5257212</b>
<b>Profil 2.2</b>	133700	24,50	<b>3275217</b>

Tab. 29. Vliv  $J_z$  na  $E_{PR} \cdot J_z$  (2 mm, dolů)



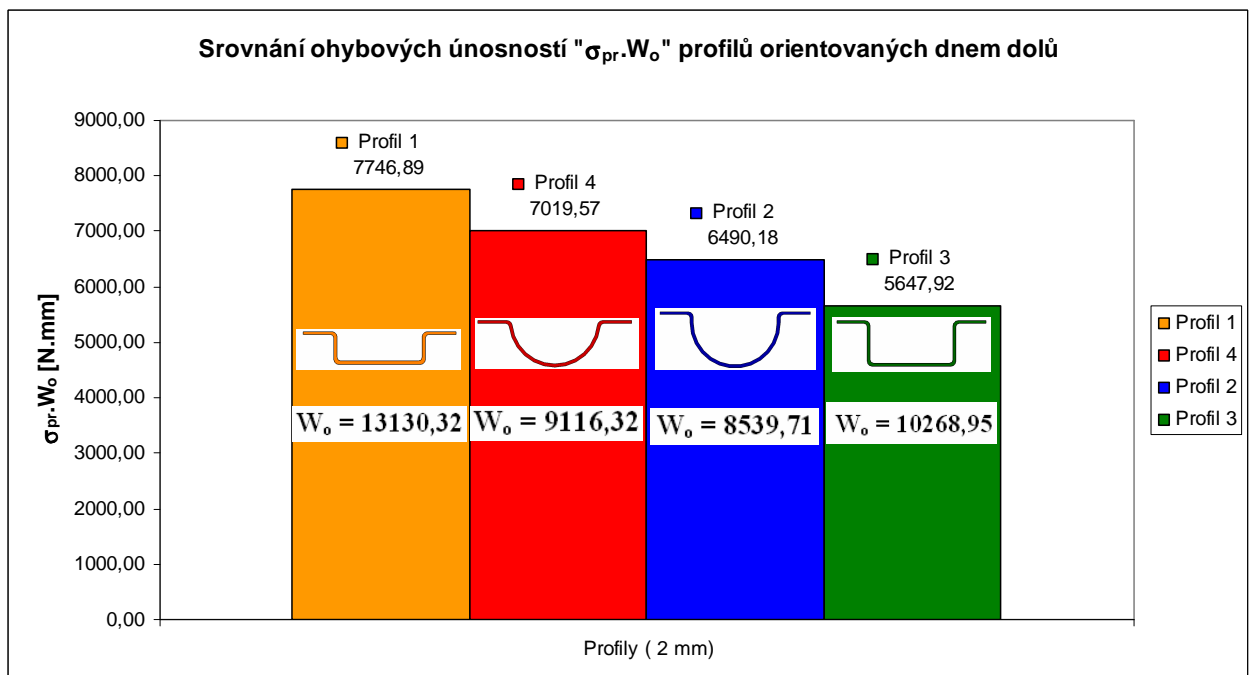
Obr. 97. Srovnání ohybové tuhosti profilů orientovaných dnem dolů (2 mm)

Dle obrázku (Obr.97) vidíme opět, že profil s nejvyšším kvadratickým momentem (**Profil č.1**) ve skutečnosti nevykazuje nejvyšší ohybovou tuhost. Nejvyšší ohybovou tuhost vykazuje **Profil č.4**.

V tabulce (Tab.30) vidíme srovnání profilů od největšího modulu průřezu v ohybu po nejmenší a jejich hodnoty meze pevnosti jak v konečném důsledku ovlivnili ohybovou únosnost.

2 mm dolů	$\sigma_{pr}$ [MPa]	$W_o$ [mm <sup>3</sup> ]	$\sigma_{pr} \cdot W_o$ [ N.mm]
<b>Profil 4.2</b>	0,59	13130,32	<b>7746,89</b>
<b>Profil 1.2</b>	0,55	10268,95	<b>5647,92</b>
<b>Profil 2.2</b>	0,77	9116,32	<b>7019,57</b>
<b>Profil 3.2</b>	0,76	8539,71	<b>6490,18</b>

Tab. 30. Ohybová únosnost profilů (2mm, dolů)



Obr. 98. Srovnání ohybové únosnosti profilů orientovaných dnem dolů (2 mm)

Dle obrázku (Obr.98) můžeme vidět, že profil s nejvyšším modulem průřezu v ohybu (**Profil č.4**) tentokrát vykazuje nejvyšší ohybovou únosnost. Nejnižší únosnost má **Profil č.1**.

Je zřejmé, že **Profil 4** má opět vysoké hodnoty, jak ohybové tuhosti, tak také pevnosti. U profilů orientovaných dnem dolů se vyznačuje nejvyšší ohybovou tuhostí i únosností.

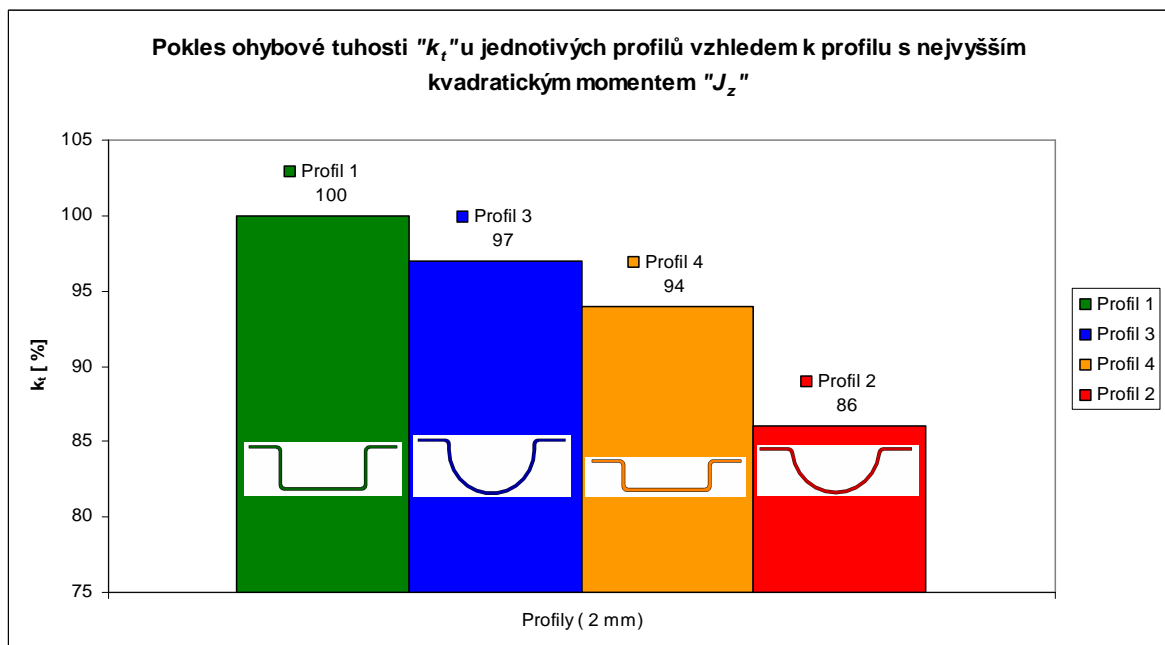
### Poměrná (teoretická) ohybová tuhost „ $k_t$ “

V tabulce (Tab.31) vidíme srovnání poměrných ohybových tuhostí profilů vzhledem k profilu s největším kvadratickým momentem, což je **Profil č.1**.

Je zřejmé, že tuhost **Profilu 3** z hlediska kvadratického momentu je o 3 % (97 ze 100) menší než tuhost **Profilu 1**. Tuhost **Profilu 4** o 6 % a tuhost **Profilu 2** o 14 %. Rozdíly mezi poměrnými tuhostmi se pohybují v rozmezí 3-14 %.

2 mm dolů	$J_z$ [mm <sup>4</sup> ]	$k_t$ [%]
<b>Profil 1.2</b>	<b>155400</b>	100
<b>Profil 3.2</b>	<b>150000</b>	97
<b>Profil 4.2</b>	<b>146600</b>	94
<b>Profil 2.2</b>	<b>133700</b>	86

Tab. 31. Poměrná ohybová tuhost  
profilů (2 mm, dolů)



Obr. 99. Poměrná ohybová tuhost profilů orientovaných dnem dolů (2 mm)

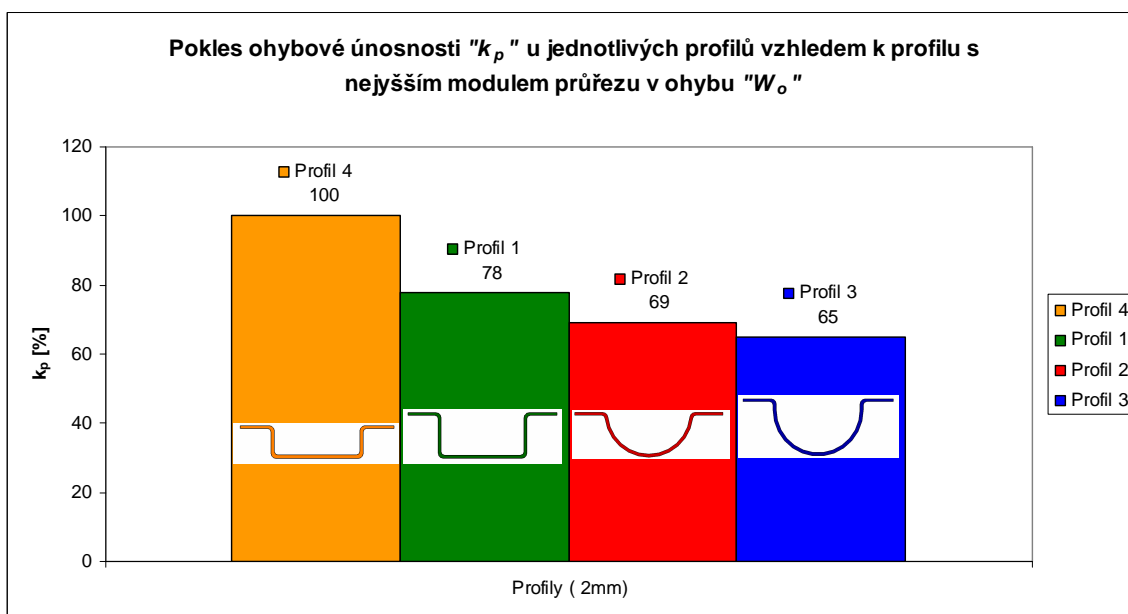
Dle obrázku (Obr.99) můžeme vidět, že **Profil č.1** má nejvyšší kvadratický moment a tudíž nejvíce přispívá na ohybovou tuhost ze všech 4 profilů stejně jako u profilů orientovaných dnem nahoru. Orientace profilů (dnem nahoru nebo dnem dolů) nemá vliv na velikost kvadratických momentů.

### Poměrná (teoretická) ohybová únosnost „ $k_p$ “

V tabulce (Tab.32) vidíme seřazení profilů s nejvyšším modulem průřezu v ohybu po nejmenší a jejich hodnoty poměrné ohybové únosnosti vzhledem k profilu s nejvyšším modulem průřezu v ohybu  $W_o$ , což je **Profil č.4**. Pohybují se mezi 22-35 %, stejně jako u profilů orientovaných dnem nahoru.

2 mm dolů	$J_z$ [mm <sup>4</sup> ]	$e_{max}$ [mm]	$W_o$ [mm <sup>3</sup> ]	$k_p$ [%]
<b>Profil 4.2</b>	146600	11,17	<b>13130,32</b>	100
<b>Profil 1.2</b>	155400	15,13	<b>10268,95</b>	78
<b>Profil 2.2</b>	133700	14,67	<b>9116,32</b>	69
<b>Profil 3.2</b>	150000	17,57	<b>8539,71</b>	65

Tab. 32. Poměrná ohybová únosnost profilů (2 mm, dolů)



Obr. 100. Poměrná ohybová únosnost profilů orientovaných dnem dolů (2 mm)

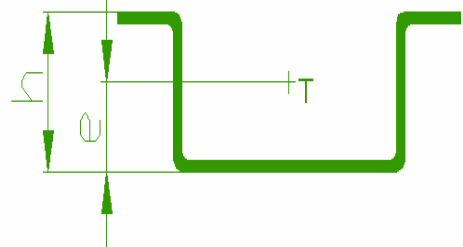
Dle obrázku (Obr.100) můžeme vidět, že **Profil č.4** má nejvyšší ohybovou únosnost. Nejnížší pak **Profil č.3**.

Dle výpočtů je tedy zřejmé, že také hodnoty poměrných únosností profilů orientovaných dnem dolů jsou shodné s hodnotami poměrných únosností profilů orientovaných dnem nahoru. I zde tedy orientace profilů (dnem nahoru nebo dnem dolů) nemá vliv, jelikož hodnoty  $J_z$  a  $e_{max}$  neboli tedy ( $W_o$ ) se nemění s orientací profilů (dnem nahoru, dnem dolů).

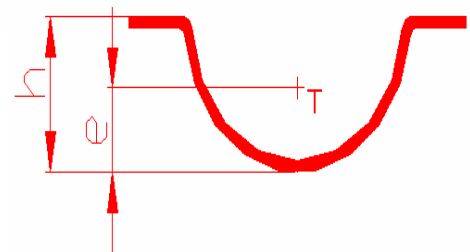
10.3.2 Vliv poměru výšky profilu „h“ a vzdálenosti krajního vlákna profilu „e<sub>max</sub>“ na ohybovou tuhost „E<sub>PR</sub>·J<sub>z</sub>“

Naměřené a vypočtené hodnoty

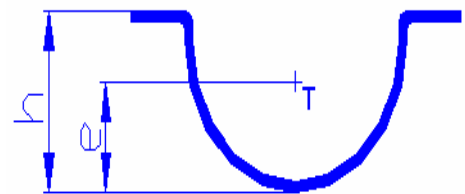
2 mm	e <sub>max</sub>	h	h/e <sub>max</sub>	E <sub>PR</sub> ·J <sub>z</sub>
dolů	[mm]	[mm]	[-]	[N.mm <sup>2</sup> ]
<b>Profil 1.2</b>	15,13	26,83	1,77	5018478



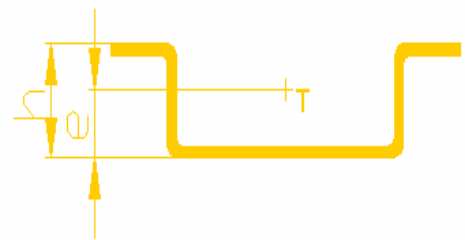
2 mm	e <sub>max</sub>	h	h/e <sub>max</sub>	E <sub>PR</sub> ·J <sub>z</sub>
dolů	[mm]	[mm]	[-]	[N.mm <sup>2</sup> ]
<b>Profil 2.2</b>	14,67	26,95	1,84	3275217



2 mm	e <sub>max</sub>	h	h/e <sub>max</sub>	E <sub>PR</sub> ·J <sub>z</sub>
dolů	[mm]	[mm]	[-]	[N.mm <sup>2</sup> ]
<b>Profil 3.2</b>	17,57	33,65	1,92	3231383



2 mm	e <sub>max</sub>	h	h/e <sub>max</sub>	E <sub>PR</sub> ·J <sub>z</sub>
dolů	[mm]	[mm]	[-]	[N.mm <sup>2</sup> ]
<b>Profil 4.2</b>	11,17	19,08	1,71	5257212



Seřazení poměrů „h/e<sub>max</sub>“ od nejmenšího po největší:

2 mm	e <sub>max</sub>	h	h/e <sub>max</sub>
dolů	[mm]	[mm]	[-]
<b>Profil 4.2</b>	11,17	19,08	<b>1,71</b>
<b>Profil 1.2</b>	15,13	26,83	<b>1,77</b>
<b>Profil 2.2</b>	14,67	26,95	<b>1,84</b>
<b>Profil 3.2</b>	17,57	33,65	<b>1,92</b>

Tab. 33. Seřazení poměrů h/e<sub>max</sub> (2 mm)

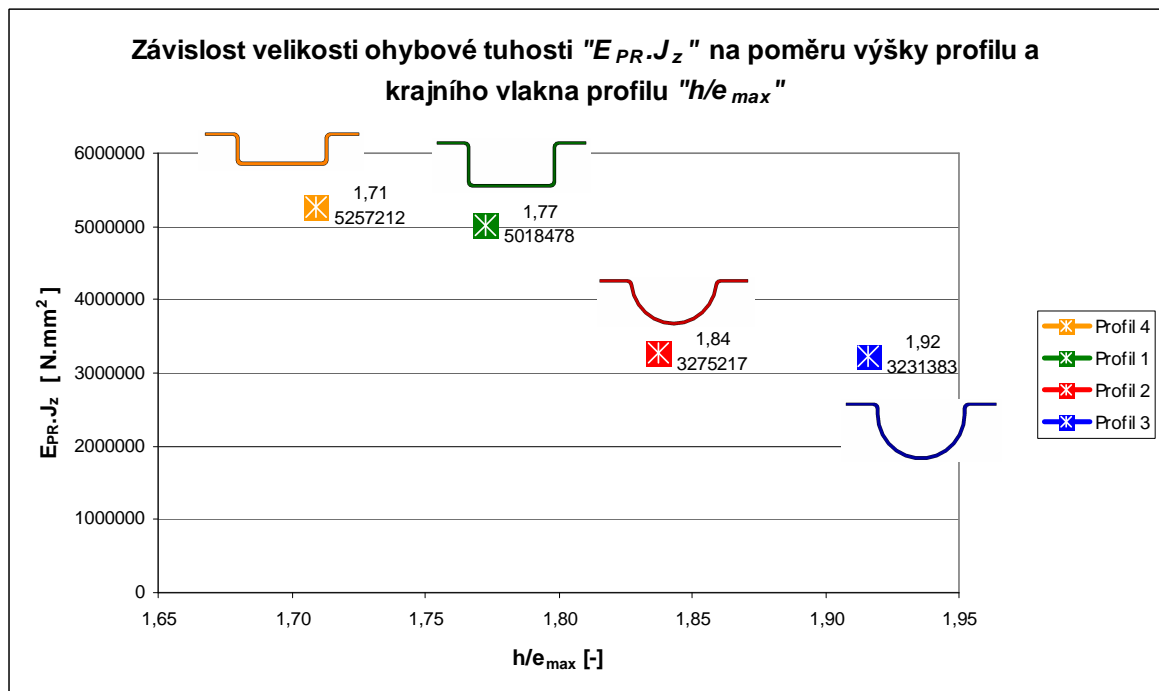


### Grafické znázornění vypočtených hodnot

Dle tabulky (Tab.34) vidíme, že stejně jako u profilů se dnem orientovaným nahoru i tady platí skutečnost, že čím je menší poměr mezi výškou profilu a vzdáleností krajního vlákna profilu, tím ohybová tuhost stoupá.

2 mm dolů	$e_{max}$ [mm]	$h$ [mm]	$h/e_{max}$ [-]	$E_{PR-J_z}$ [N.mm <sup>2</sup> ]
Profil 4.2	11,17	19,08	1,71	5257212
Profil 1.2	15,13	26,83	1,77	5018478
Profil 2.2	14,67	26,95	1,84	3275217
Profil 3.2	17,57	33,65	1,92	3231383

Tab. 34. Vliv  $h/e_{max}$  na  $E_{PR-J_z}$  (2 mm, dolů)



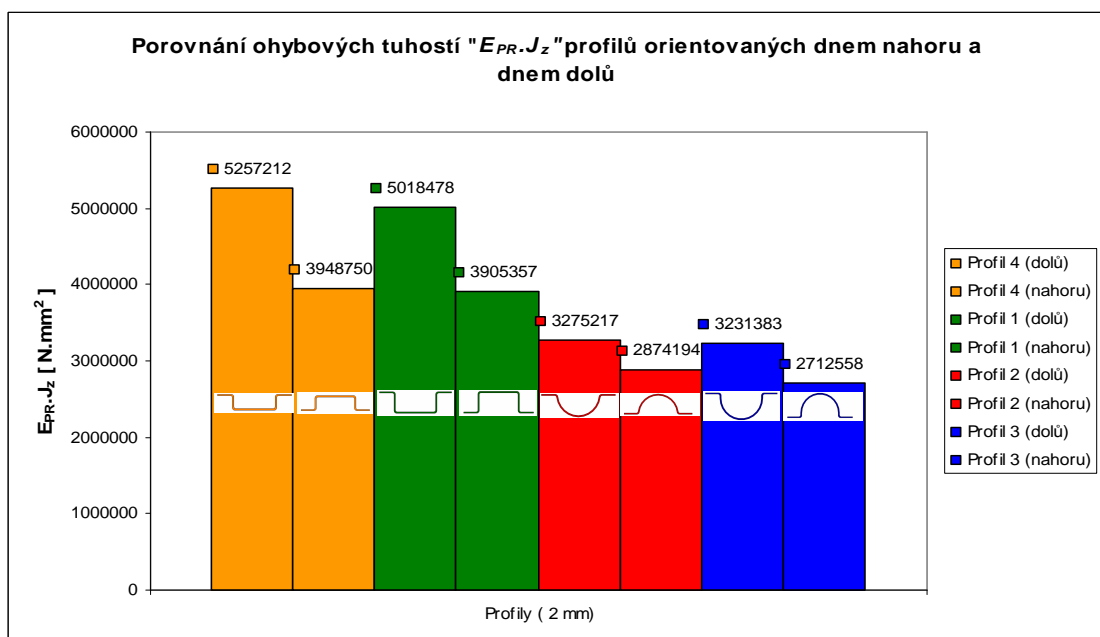
Obr. 101. Vliv  $h/e_{max}$  na  $E_{PR-J_z}$  profilů orientovaných dnem dolů (2 mm)

Dle obrázku (Obr.101) můžeme vidět, že poměr  $h/e_{max}$  má pravděpodobně vliv na ohybovou tuhost jako u profilů se dnem nahoru. Se zvyšujícím se poměrem ohybová tuhost klesá, profil ztrácí rychle stabilitu a rychle se otvírá. Se snižujícím se poměrem ohybová tuhost stoupá, profil je více tuhý a více stabilní a pomaleji se otvírá (bortí).

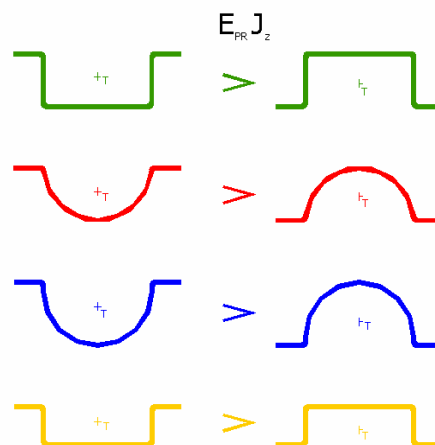
## 11 SHRNU TÍ A VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ PROFILŮ TLOUŠŤKY 2 MM

### 11.1 Srovnání ohybové tuhosti mezi profily orientovanými dnem nahoru a dnem dolů (2 mm)

V následujícím obrázku (Obr.102) můžeme vidět, že všechny profily orientované dnem dolů vykazují vyšší ohybovou tuhost než profily orientované dnem nahoru, což je zřejmě způsobeno tím, že profily se dnem nahoru se rychleji otvírají a tím rychleji ztrácí stabilitu.



Obr. 102. Srovnání  $E_{PR} \cdot J_z$  dnem nahoru a dnem dolů (2 mm)

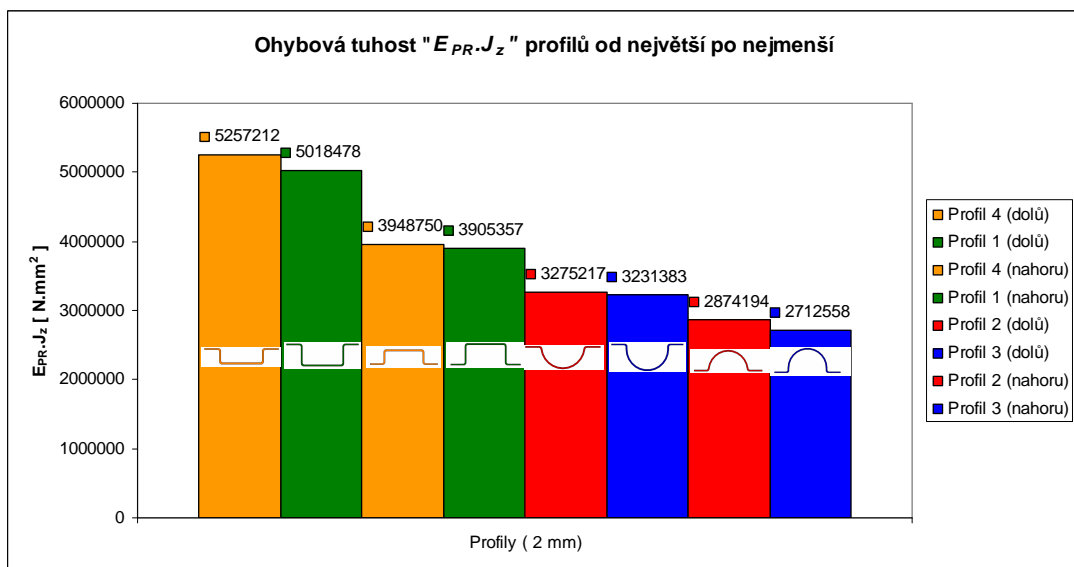


Obr. 103. Srovnání  $E_{PR} \cdot J_z$  dnem nahoru a dnem dolů (2 mm)

V následující tabulce (Tab.35) a obrázku (Obr.104) můžeme vidět seřazení ohybové tuhosti profilů od nejvíce tuhého profilu po nejméně tuhý profil.

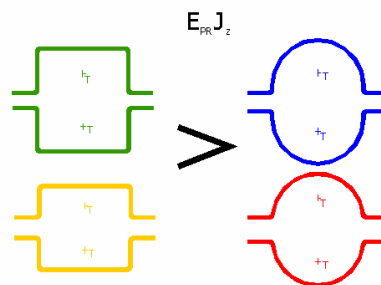
	2 mm	$E_{PR} \cdot J_z$
	Profil	[N.mm <sup>2</sup> ]
1	Profil 4.2	5257212
2	Profil 1.2	5018478
3	Profil 4.1	3948750
4	Profil 1.1	3905357
5	Profil 2.2	3275217
6	Profil 3.2	3231383
7	Profil 2.1	2874194
8	Profil 3.1	2712558

Tab. 35.  $E_{PR} \cdot J_z$  od největší po nejmenší (2 mm)



Obr. 104.  $E_{PR} \cdot J_z$  od největší po nejmenší pro profily 2 mm

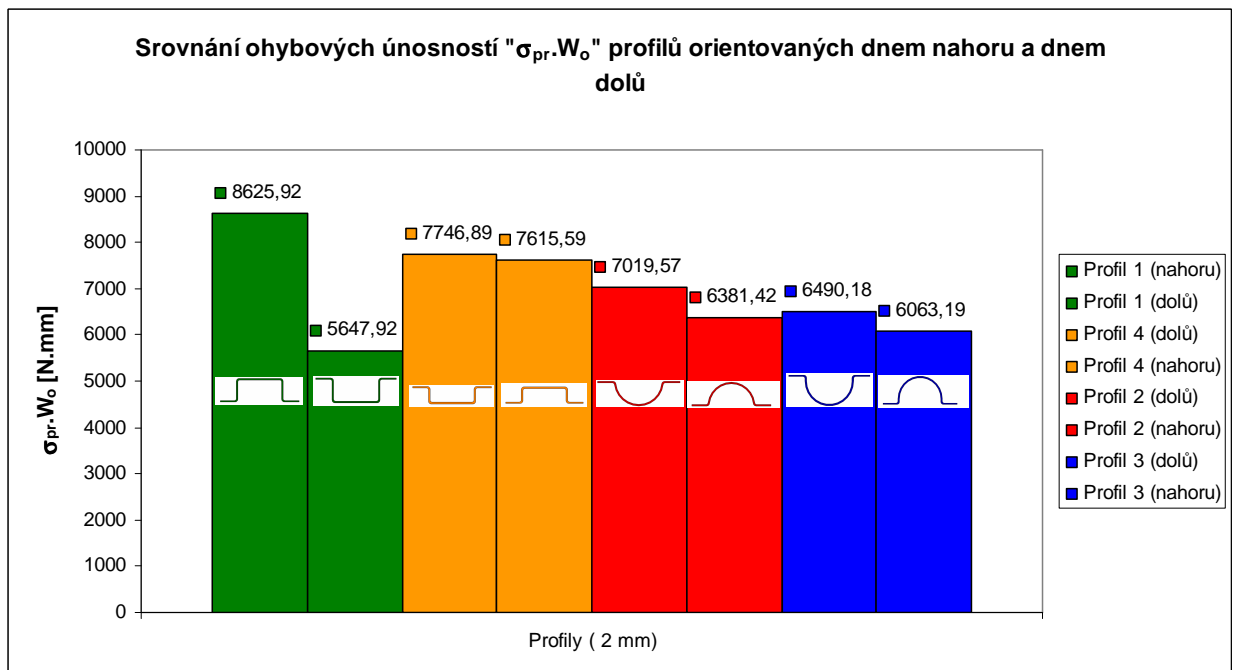
Z obrázku (Obr.105) je také zřejmé, že **Profil č.4**.a **Profil č.1** jsou více tuhé než **Profil č.2** a **Profil č.3** a to, jak orientací dnem nahoru, tak orientací dnem dolů. Platí tedy:



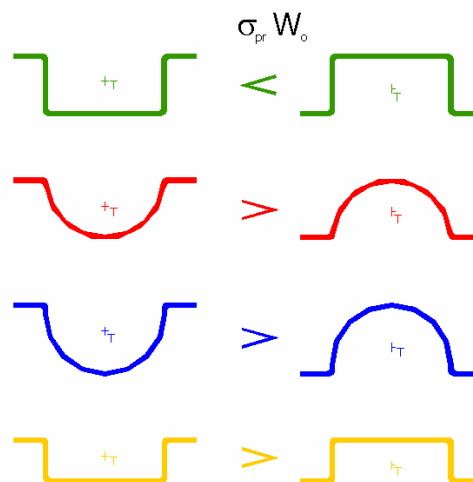
Obr. 105. Srovnání  $E_{PR} \cdot J_z$  (2 mm)

### 11.2 Srovnání ohybové únosnosti mezi profily orientovanými dnem nahoru a dnem dolů (2 mm)

Na obrázku (Obr.106) vidíme, že profily s orientací dnem dolů se vyznačují vyšší ohybovou únosností než profily orientované dnem nahoru, kromě jednoho případu, kterým je **Profil č.1**. Zde je hodnota ohybové únosnosti větší při orientaci dnem nahoru. Na základě teoretických výpočtů je však pravděpodobné, že naměřené hodnoty **Profilu č.1** při orientaci dnem dolů nejsou povedené (profily mohly být hůře vytvarovány).



Obr. 106. Srovnání  $\sigma_{pr} \cdot W_o$  dnem nahoru a dnem dolů pro profily tloušťky 2 mm

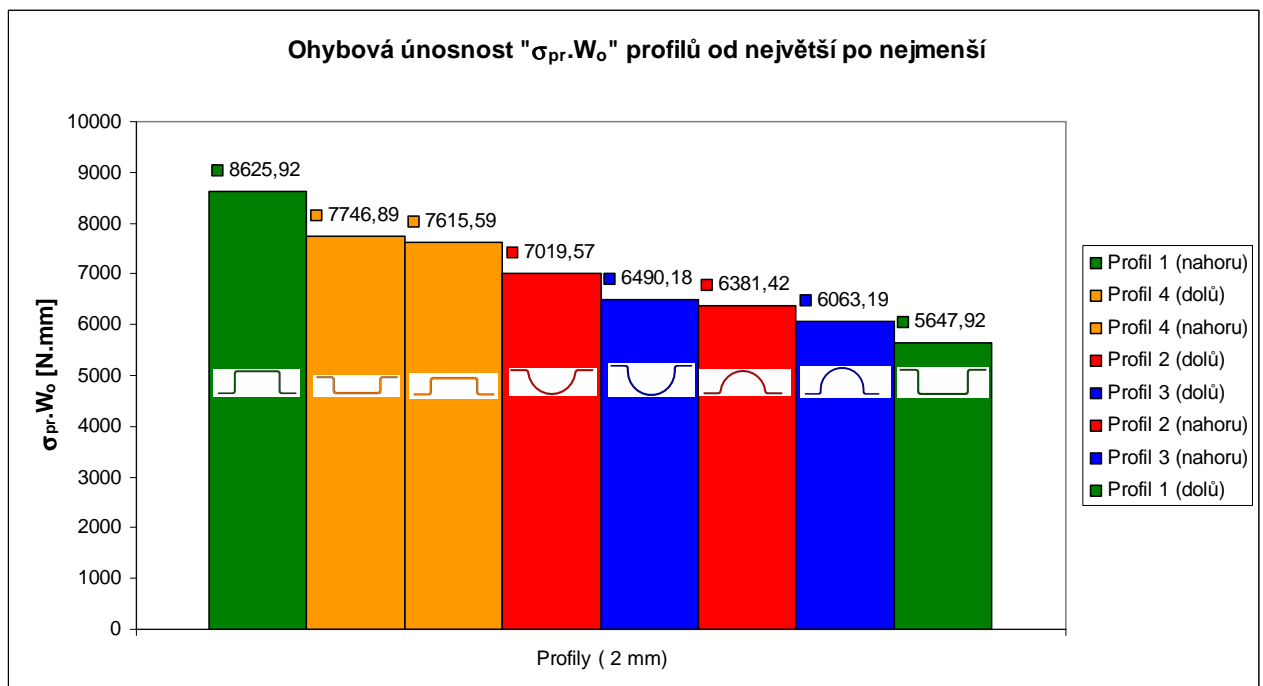


Obr. 107. Srovnání  $\sigma_{pr} \cdot W_o$  dnem nahoru a dnem dolů (2 mm)

V tabulce (Tab.36) vidíme seřazení profilů od největší ohybové únosnosti po nejmenší.

	2 mm	$\sigma_{pr} \cdot W_o$
	Profil	[ N.mm]
1	Profil 1.1	8625,92
2	Profil 4.2	7746,89
3	Profil 4.1	7615,59
4	Profil 2.2	7019,57
5	Profil 3.2	6490,18
6	Profil 2.1	6381,42
7	Profil 3.1	6063,19
8	Profil 1.2	5647,92

Tab. 36.  $\sigma_{pr} \cdot W_o$  od největší po nejmenší (2 mm)



Obr. 108.  $\sigma_{pr} \cdot W_o$  od největší po nejmenší pro profily tloušťky 2 mm

Na obrázku (Obr.108) vidíme grafické srovnání ohybové únosnosti profilů od největší po nejmenší. Pokud tedy budeme uvažovat fakt, že měření **Profilu č.1** dnem dolů bylo nepovedené, můžeme říci, že **Profil č.1** a **Profil č.4** jsou z hlediska pevnosti nejodolnější a pomaleji se bortí.

### 11.3 Srovnání teoretické ohybové tuhosti a únosnosti mezi profily orientovanými dnem nahoru a dnem dolů (2 mm)

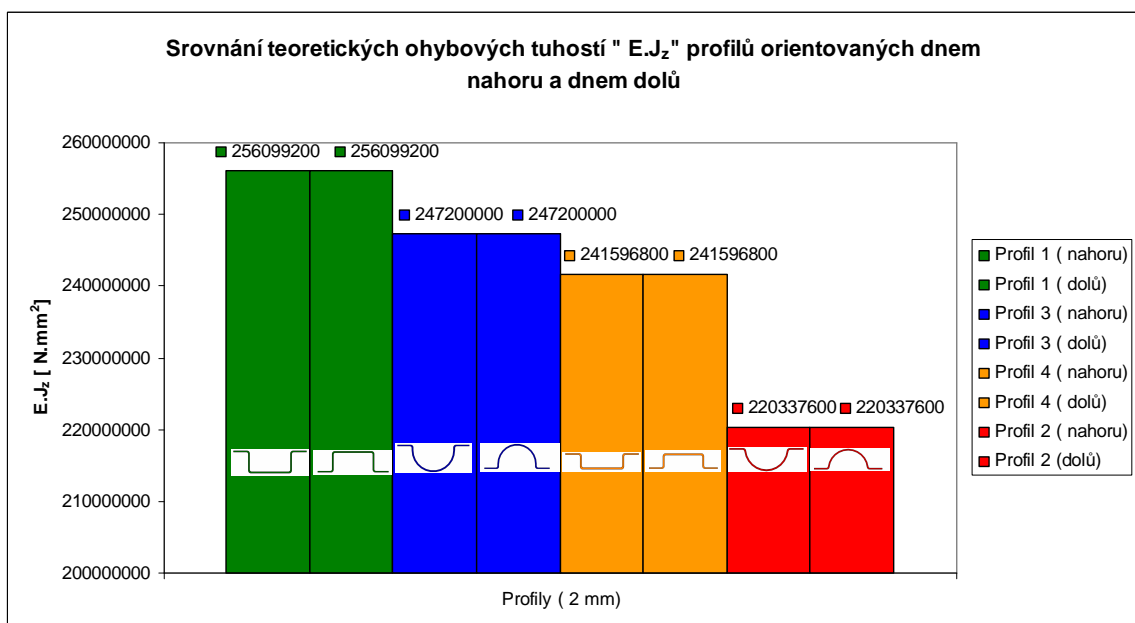
#### 11.3.1 Teoretická ohybová tuhost profilů (2 mm)

Dle obrázku (Obr.109) můžeme vidět, že nejvyšší ohybové tuhosti je dosaženo u **Profilu č.1**, jelikož se vyznačuje nejvyšší hodnotou kvadratického momentu průřezu plochy. Jako ohybovou tuhost by jsme mohli vyhodnocovat pouze kvadratický moment profilů, jelikož modul pružnosti materiálu  $E$  je pro všechny profily stejný (nemusíme ho tedy uvažovat). Můžeme tedy vidět, že hodnoty ohybových tuhostí profilů se teoreticky nemění s orientací profilů tzn. dnem nahoru nebo dnem dolů.

V tabulce (Tab.37) můžeme vidět seřazení teoretických ohybových tuhostí profilů od největší tuhosti po nejmenší.

	2 mm	$J_z$	$E$	$E \cdot J_z$
		[mm <sup>4</sup> ]	[MPa]	[N.mm <sup>2</sup> ]
1	<b>Profil 1</b>	155400	1648	256099200
2	<b>Profil 3</b>	150000	1648	247200000
3	<b>Profil 4</b>	146600	1648	241596800
4	<b>Profil 2</b>	133700	1648	220337600

Tab. 37. Srovnání  $E \cdot J_z$  profilů (2 mm)



Obr. 109. Srovnání  $E \cdot J_z$  orientovaných dnem nahoru a dnem dolů (2 mm)

### 11.3.2 Teoretická ohybová únosnost profilů (2 mm)

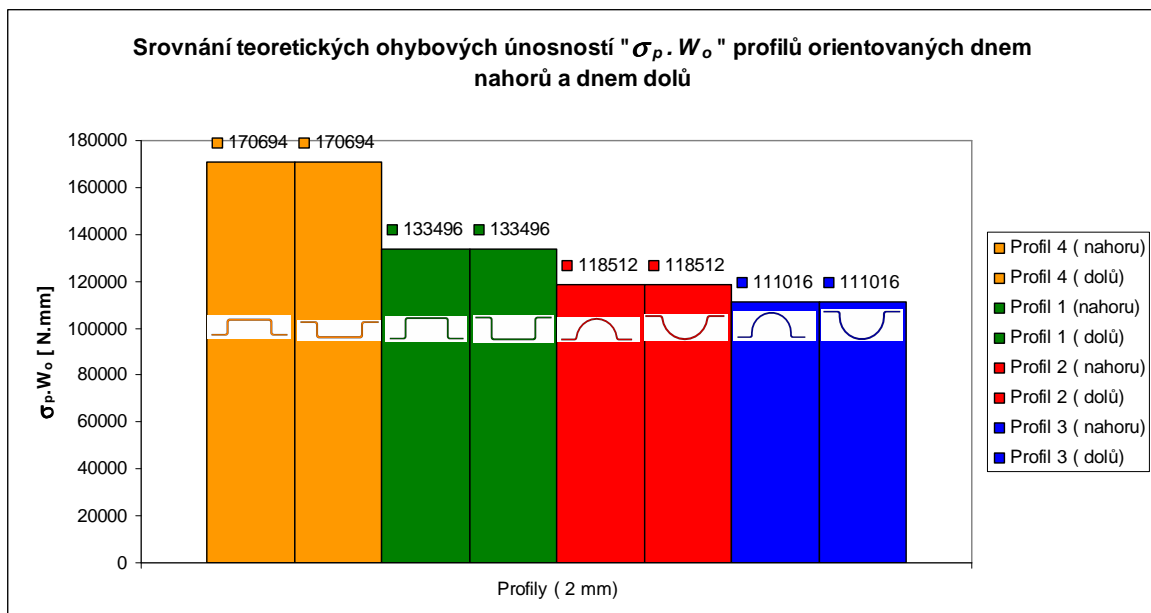
Dle obrázku (Obr.110) můžeme vidět, že nejvyšší ohybové únosnosti je dosaženo u **Profilu č.4**. I zde můžeme vidět, že orientace profilů (dnem nahoru nebo dnem dolů) teoreticky nemá vliv na hodnotu ohybové únosnosti profilů.

V tabulce (Tab.38) můžeme vidět seřazení teoretických ohybových únosností profilů od největšího modulu průřezu v ohybu po nejmenší. Mez pevnosti materiálu je pro všechny profily stejná (stejný materiál).

Je tedy zřejmé, že **Profil č.4** se vyznačuje největší odolností proti ohybu a tedy také největší pevností.

	2 mm	$W_o$	$\sigma_p$	$\sigma_p \cdot W_o$
		[mm <sup>3</sup> ]	[MPa]	[N.mm]
1	Profil 4	13130	13	170694
2	Profil 1	10269	13	133496
3	Profil 2	9116	13	118512
4	Profil 3	8540	13	111016

Tab. 38. Srovnání  $\sigma_p \cdot W_o$  profilů (2 mm)



Obr. 110. Srovnání  $\sigma_p \cdot W_o$  profilů orientovaných dnem nahoru a dnem dolů (2 mm)

## 12 PROFILY Z TLOUŠŤKY 1 MM

V tabulce (Tab.39) vidíme vypočtené hodnoty profilů orientovaných dnem nahoru a dnem dolů. Hodnoty síly  $F$  a průhybu  $y$  jsou průměrné hodnoty z každé série měření.

1 mm	$e_{\max}$	$J_z$	L	F	y	$E_{PR} \cdot J_z$	$E_{PR}$
	[mm]	[mm <sup>4</sup> ]	[mm]	[N]	[mm]	[N.mm <sup>2</sup> ]	[MPa]
Profil 1.1	15,43	80700	180	30	2,1	1735714	<b>21,51</b>
Profil 1.2	15,43	80700	180	14	1,3	1308462	<b>16,21</b>
Profil 2.1	13,65	67360	180	13,5	2,2	745568	<b>11,07</b>
Profil 2.2	13,65	67360	180	17	2,13	969718	<b>14,40</b>
Profil 3.1	16,32	76690	180	13	2,2	717955	<b>9,36</b>
Profil 3.2	16,32	76690	180	10	1,55	783871	<b>10,22</b>
Profil 4.1	10,96	73310	180	33	2,2	1822500	<b>24,86</b>
Profil 4.2	10,96	73310	180	16	1,42	1369014	<b>18,67</b>

Tab. 39. Vypočtené hodnoty profilů (1 mm)

### 12.1 Srovnání tvarových modulů pružnosti profilů ( 1 mm)

1 mm	$e_{\max}$	$J_z$	L	F	y	$E_{PR} \cdot J_z$	$E_{PR}$
	[mm]	[mm <sup>4</sup> ]	[mm]	[N]	[mm]	[N.mm <sup>2</sup> ]	[MPa]
Profil 4.1	10,96	73310	180	33	2,2	1822500	<b>24,86</b>
Profil 1.1	15,43	80700	180	30	2,1	1735714	<b>21,51</b>
Profil 4.2	10,96	73310	180	16	1,42	1369014	<b>18,67</b>
Profil 1.2	15,43	80700	180	14	1,3	1308462	<b>16,21</b>
Profil 2.2	13,65	67360	180	17	2,13	969718	<b>14,40</b>
Profil 2.1	13,65	67360	180	13,5	2,2	745568	<b>11,07</b>
Profil 3.2	16,32	76690	180	10	1,55	783871	<b>10,22</b>
Profil 3.1	16,32	76690	180	13	2,2	717955	<b>9,36</b>

Tab. 40. Srovnání tvarových modulů profilů (1mm)

V tabulce (Tab.40) můžeme vidět seřazení profilů dle největšího modulu po nejmenší. Největších hodnot modulu tedy dosahuje **Profil č.4**, nejnižší modul má pak **Profil č.3**. Z tabulky můžeme vidět, že tuhost profilů popř. modul jsou závislé na smyslu otočení profilů při ohybu (tzn. dnem nahoru nebo dnem dolů). Proto bude tedy lepší profily vyhodnocovat odděleně.



## 12.2 Srovnání tvarových modulů profilů s orientací dnem nahoru (1 mm)

1 mm nahoru	$e_{\max}$ [mm]	$J_z$ [mm <sup>4</sup> ]	L [mm]	F [N]	y [mm]	$E_{PR} \cdot J_z$ [N.mm <sup>2</sup> ]	$E_{PR}$ [MPa]
<b>Profil 4.1</b>	10,96	73310	180	33	2,2	1822500	<b>24,86</b>
<b>Profil 1.1</b>	15,43	80700	180	30	2,1	1735714	<b>21,51</b>
<b>Profil 2.1</b>	13,65	67360	180	13,5	2,2	745568	<b>11,07</b>
<b>Profil 3.1</b>	16,32	76690	180	13	2,2	717955	<b>9,36</b>

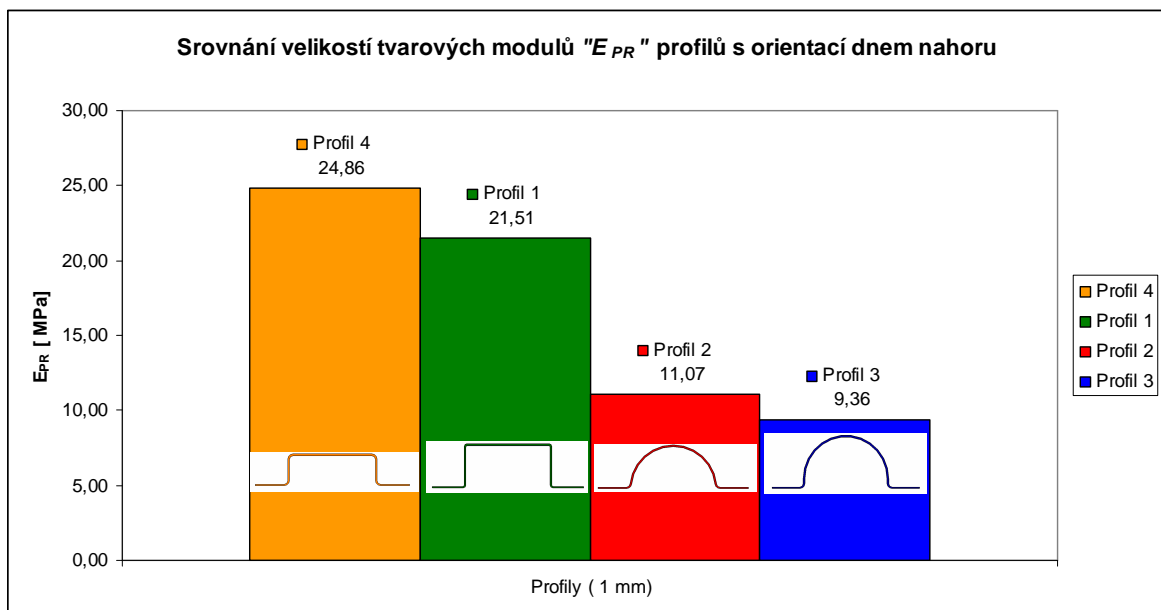
Tab. 41. Srovnání tvarových modulů profilů s orientací dnem nahoru (1 mm)

V tabulce (Tab.41) vidíme, že **Profil č.4** má nejvyšší tvarový modul. Nejnižší modul má **Profil č.3**. Rozdíly mezi těmito profily vzhledem k profilu s nejvyšším tvarovým modulem, což je **Profilu č.4** si můžeme lépe přestavit v procentech.

1 mm nahoru	$E_{PR}$ [MPa]	$E_{PR}$ [%]
<b>Profil 4.1</b>	24,86	<b>0</b>
<b>Profil 1.1</b>	21,51	<b>13,48</b>
<b>Profil 2.1</b>	11,07	<b>55,47</b>
<b>Profil 3.1</b>	9,36	<b>62,35</b>

Tab. 42. Rozdíl  $E_{PR}$  v % (1 mm, nahoru)

Rozdíl v modulech můžeme také znázornit graficky.



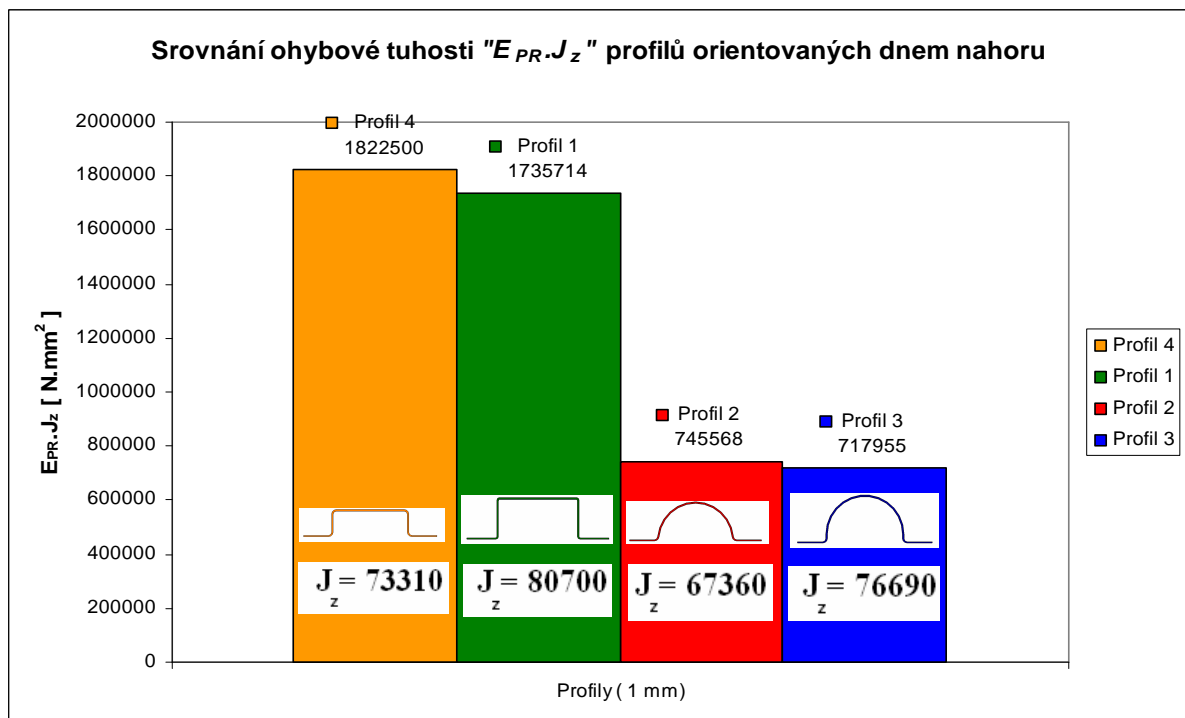
Obr. 111. Rozdíl tvarových modulů profilů s orientací dnem nahoru (1mm)

### 12.2.1 Vliv geometrie průřezu profilů na poměrné zvýšení ohybové tuhosti a únosnosti profilů orientovaných dnem nahoru (1mm)

Stejně jako u profilů tloušťky 2 mm i tady budeme posuzovat vliv geometrie profilů na jejich mechanické chování při ohybu. V tabulce (Tab.43) můžeme vidět seřazení profilů s nejvyšším kvadratickým momentem po nejmenší a jejich hodnoty tvarových modulů, jak v konečném důsledku ovlivnily příslušnou ohybovou tuhost.

1 mm nahoru	$J_z$ [mm <sup>4</sup> ]	$E_{PR}$ [MPa]	$E_{PR} \cdot J_z$ [N.mm <sup>2</sup> ]
<b>Profil 1.1</b>	80700	21,51	<b>1735714</b>
<b>Profil 3.1</b>	76690	9,36	<b>717955</b>
<b>Profil 4.1</b>	73310	24,86	<b>1822500</b>
<b>Profil 2.1</b>	67360	11,07	<b>745568</b>

Tab. 43. Vliv  $J_z$  na  $E_{PR} \cdot J_z$  (1mm, nahoru)



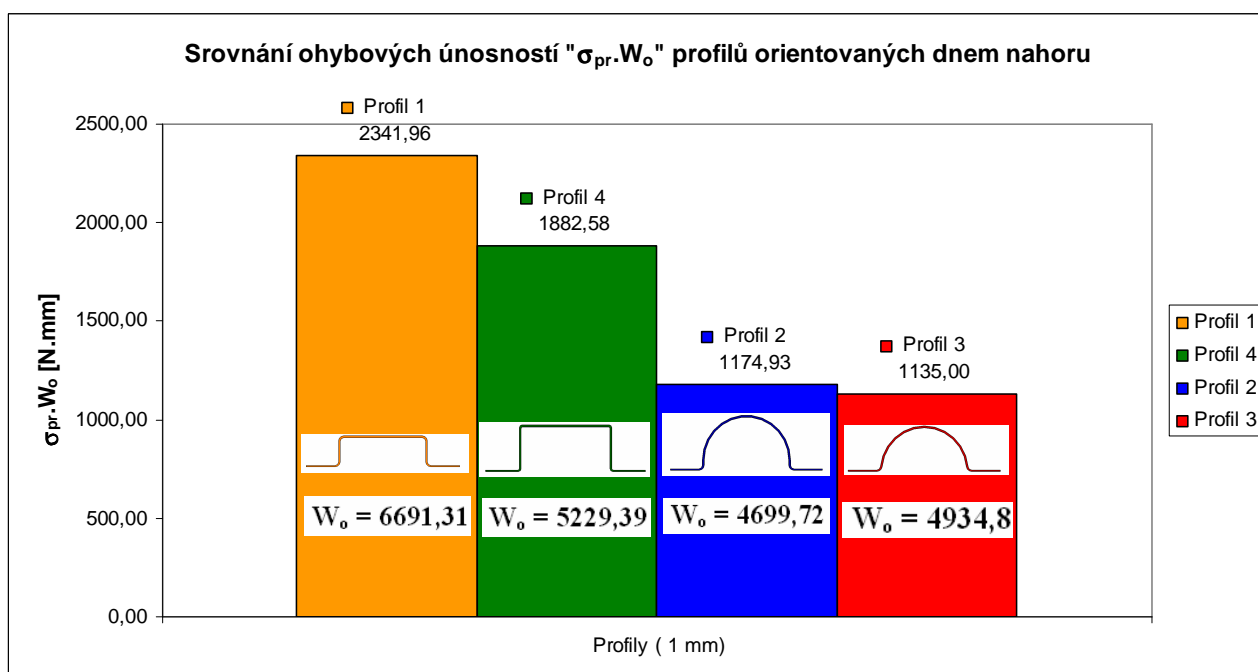
Obr. 112. Srovnání ohybové tuhosti profilů orientovaných dnem nahoru (1 mm)

Dle obrázku (Obr.112) vidíme, že profil s nejvyšším kvadratickým momentem (**Profil č.1**) ve skutečnosti nevykazuje nejvyšší ohybovou tuhost. Nejvyšší ohybovou tuhost vykazuje **Profil č.4**.

V tabulce (Tab.44) vidíme srovnání profilů od největšího modulu průřezu v ohybu po nejmenší a jejich hodnoty meze pevnosti, jak v konečném důsledku ovlivnily ohybovou únosnost.

1 mm	$\sigma_p$	$W_o$	$\sigma_p \cdot W_o$
nahoru	[ MPa]	[mm <sup>3</sup> ]	[ N.mm]
<b>Profil 4.1</b>	0,35	6691,31	<b>2341,96</b>
<b>Profil 1.1</b>	0,36	5229,39	<b>1882,58</b>
<b>Profil 2.1</b>	0,23	4934,8	<b>1135,00</b>
<b>Profil 3.1</b>	0,25	4699,72	<b>1174,93</b>

Tab. 44. Ohybová únosnost (1 mm, nahoru)



Obr. 113. Srovnání ohybové únosnosti profilů orientovaných dnem nahoru (1 mm)

Dle obrázku (Obr.113) můžeme vidět, že profil s nejvyšším modulem průřezu v ohybu (**Profil č.4**) vykazuje nejvyšší ohybovou únosnost. Nejnižší únosnost má **Profil č.2**.

Je zřejmé, že **Profil 4** má opět vysoké hodnoty, jak ohybové tuhosti, tak také únosnosti (pevnosti). U profilů orientovaných dnem nahoru se vyznačuje nejvyšší ohybovou tuhostí i únosností.

### Poměrná (teoretická) ohybová tuhost „ $k_t$ “

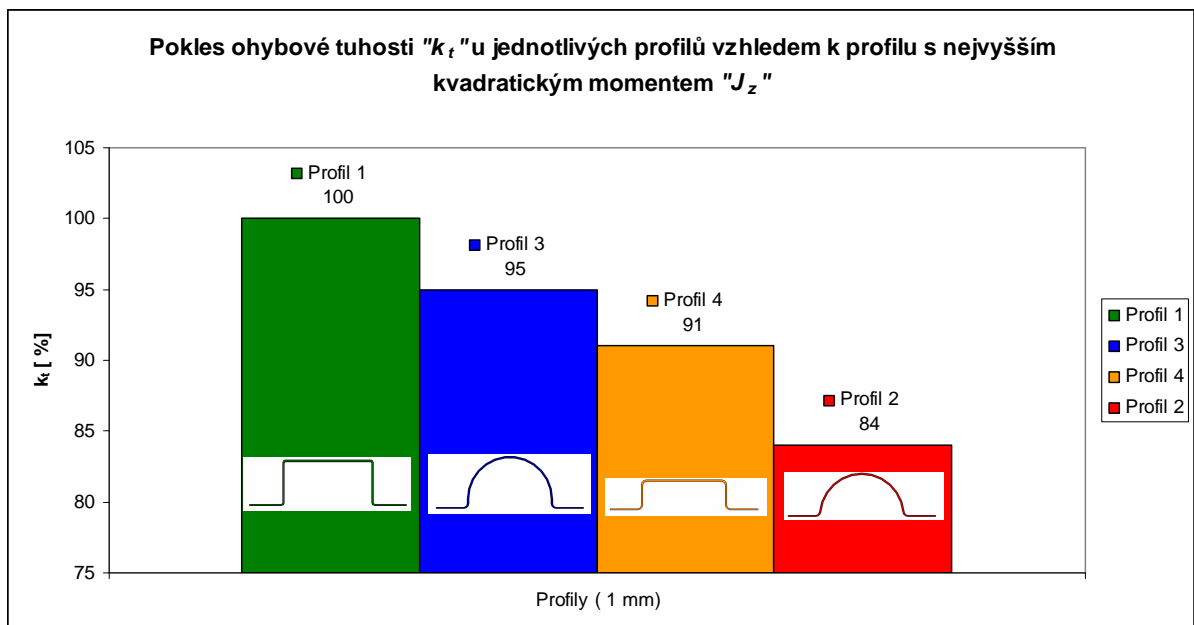
V tabulce (Tab.45) vidíme srovnání poměrných (teoretických) ohybových tuhostí profilů vzhledem k profilu s největším kvadratickým momentem, což je **Profil č.1**.

Je zřejmé, že tuhost **Profilu 3** z hlediska kvadratického momentu je o 5 % (95 ze 100) menší než tuhost **Profilu 1**. Tuhost **Profilu 4** o 9 % a tuhost **Profilu 2** o 16 %. Rozdíly mezi poměrnými tuhostmi se tedy pohybují v rozmezí 5-16 %.

1 mm nahoru	$J_z$ [mm <sup>4</sup> ]	$k_t$ [%]
<b>Profil 1.1</b>	<b>80700</b>	100
<b>Profil 3.1</b>	<b>76690</b>	95
<b>Profil 4.1</b>	<b>73310</b>	91
<b>Profil 2.1</b>	<b>67360</b>	84

Tab. 45. Poměrná ohybová tuhost

(1mm, nahoru)



Obr. 114. Poměrná ohybová tuhost profilů orientovaných dnem nahoru (1 mm)

Dle obrázku (Obr.114) můžeme vidět, že **Profil č.1** nejvíce přispívá na ohybovou tuhost ze všech 4 profilů, jelikož se vyznačuje nejvyšší hodnotou kvadratického momentu  $J_z$ .

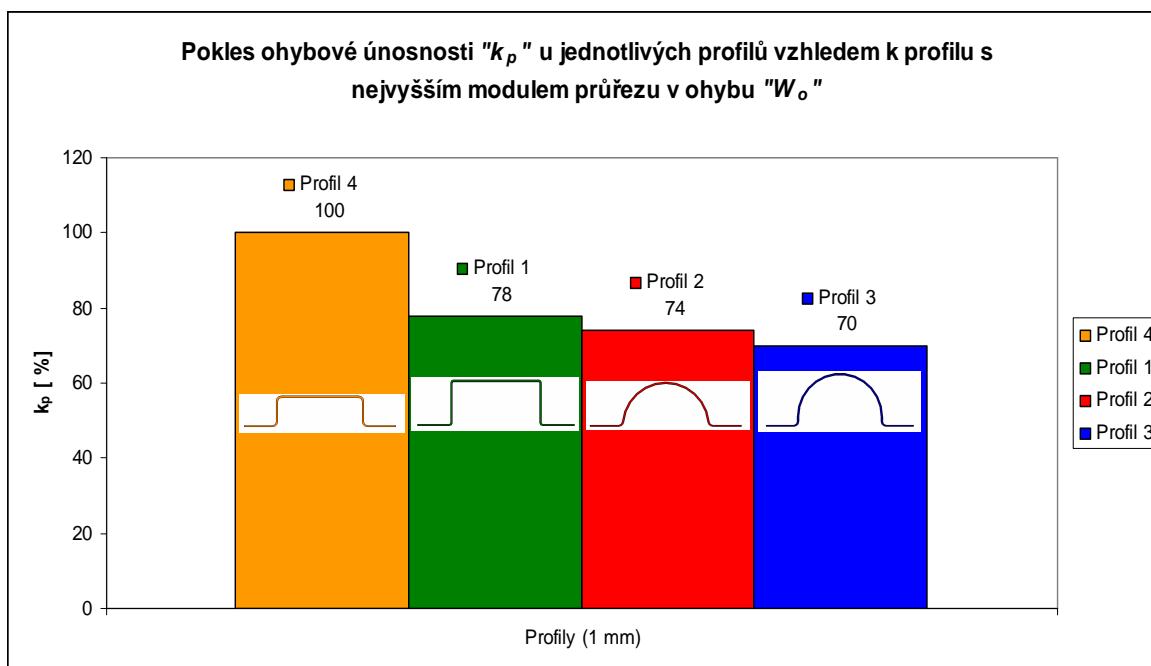
### Poměrná ohybová únosnost „ $k_p$ “

V tabulce (Tab.46) vidíme srovnání poměrných ohybových únosností profilů vzhledem k profilu s největším modulem průřezu v ohybu, což je **Profil č.4**.

Je zřejmé, že únosnost **Profilu 1** z hlediska  $W_o$  je o 22 % (78 ze 100) menší než únosnost **Profilu 4**. Únosnost **Profilu 2** o 24 % a únosnost **Profilu 3** o 30 %. Rozdíly mezi poměrnými únosnostmi se tedy pohybují v rozmezí 22-30 %.

1 mm nahoru	$J_z$ [mm <sup>4</sup> ]	$e_{max}$ [mm]	$W_o$ [mm <sup>3</sup> ]	$k_p$ [%]
<b>Profil 4.1</b>	73310	10,96	<b>6691,31</b>	100
<b>Profil 1.1</b>	80700	15,43	<b>5229,39</b>	78
<b>Profil 2.1</b>	67360	13,65	<b>4934,80</b>	74
<b>Profil 3.1</b>	76690	16,32	<b>4699,72</b>	70

Tab. 46. Poměrná ohybová únosnost (1 mm, nahoru)



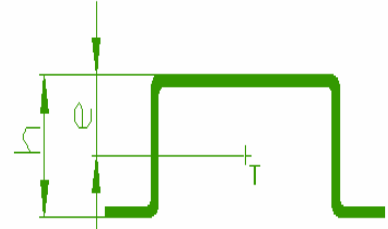
Obr. 115. Poměrná ohybová únosnost profilů orientovaných dnem nahoru (1 mm)

Dle obrázku (Obr.115) vidíme, že nejvyšší ohybovou únosnost má **Profil č.4**, jelikož se vyznačuje nejvyšší hodnotou modulu průřezu v ohybu  $W_o$ . Nejnižší pak **Profil č.3**.

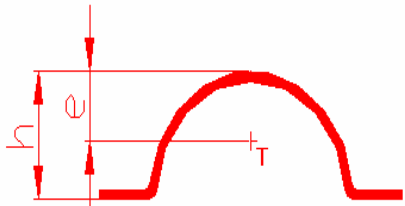
12.2.2 Vliv poměru výšky profilu „h“ a vzdálenosti krajního vlákna profilu „ $e_{max}$ “ na ohybovou tuhost „ $E_{PR} \cdot J_z$ “

Naměřené a vypočtené hodnoty

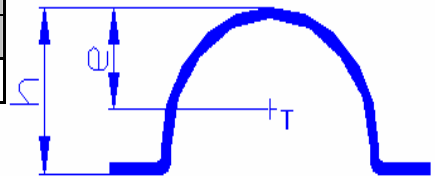
1 mm	$e_{max}$	h	$h/e_{max}$	$E_{PR} \cdot J_z$
nahoru	[mm]	[mm]	[-]	[N.mm <sup>2</sup> ]
<b>Profil 1.1</b>	15,43	26,08	1,69	1735714



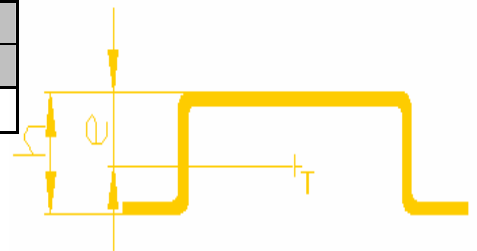
1 mm	$e_{max}$	h	$h/e_{max}$	$E_{PR} \cdot J_z$
nahoru	[mm]	[mm]	[-]	[N.mm <sup>2</sup> ]
<b>Profil 2.1</b>	13,65	26,12	1,91	745568



1 mm	$e_{max}$	h	$h/e_{max}$	$E_{PR} \cdot J_z$
nahoru	[mm]	[mm]	[-]	[N.mm <sup>2</sup> ]
<b>Profil 3.1</b>	16,32	31,95	1,96	717955



1 mm	$e_{max}$	h	$h/e_{max}$	$E_{PR} \cdot J_z$
nahoru	[mm]	[mm]	[-]	[N.mm <sup>2</sup> ]
<b>Profil 4.1</b>	10,96	18,16	1,66	1822500



Seřazení poměrů „ $h/e_{max}$ “ od nejmenšího po největší:

1 mm	$e_{max}$	h	$h/e_{max}$
nahoru	[mm]	[mm]	[-]
<b>Profil 4.1</b>	10,96	18,16	<b>1,66</b>
<b>Profil 1.1</b>	15,43	26,08	<b>1,69</b>
<b>Profil 2.1</b>	13,65	26,12	<b>1,91</b>
<b>Profil 3.1</b>	16,32	31,95	<b>1,96</b>

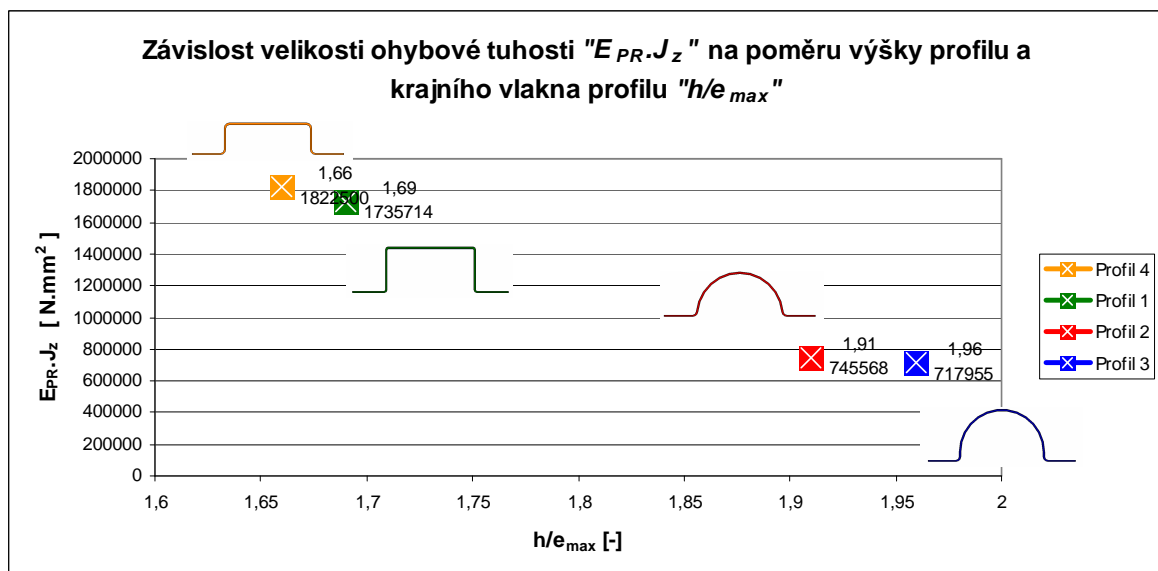
Tab. 47. Seřazení poměrů  $h/e_{max}$  (1 mm)

### Grafické znázornění vypočtených hodnot

Dle tabulky (Tab.48) vidíme, že čím menší je poměr mezi výškou profilu a vzdáleností krajního vlákna profilu, tím ohybová tuhost stoupá (stejně jako u profilů 2 mm).

1 mm	$e_{max}$	h	$h/e_{max}$	$E_{PR} \cdot J_z$
nahoru	[mm]	[mm]	[-]	[N.mm <sup>2</sup> ]
<b>Profil 4.1</b>	10,96	18,16	<b>1,66</b>	<b>1822500</b>
<b>Profil 1.1</b>	15,43	26,08	<b>1,69</b>	<b>1735714</b>
<b>Profil 2.1</b>	13,65	26,12	<b>1,91</b>	<b>745568</b>
<b>Profil 3.1</b>	16,32	31,95	<b>1,96</b>	<b>717955</b>

Tab. 48. Vliv  $h/e_{max}$  na  $E_{PR} \cdot J_z$  (1 mm, nahoru)



Obr. 116. Vliv  $h/e_{max}$  na  $E_{PR} \cdot J_z$  profilů orientovaných dnem nahoru (1 mm)

Dle obrázku (Obr.116) můžeme vidět, že poměr  $h/e_{max}$  má pravděpodobně vliv na ohybovou tuhost stejně jako u profilů tloušťky 2 mm. Se zvyšujícím se poměrem ohybová tuhost klesá, profil ztrácí rychleji stabilitu a rychleji se otvírá. Se snižujícím poměrem ohybová tuhost stoupá, profil je více tuhý a více stabilní, pomaleji se otvírá (bortí).

### 12.3 Srovnání tvarových modulů profilů s orientací dnem dolů (1mm)

1 mm dolů	$e_{\max}$ [mm]	$J_z$ [mm <sup>4</sup> ]	L [mm]	F [N]	y [mm]	$E_{PR} \cdot J_z$ [N.mm <sup>2</sup> ]	$E_{PR}$ [MPa]
<b>Profil 4.2</b>	10,96	73310	180	16	1,42	1369014	<b>18,67</b>
<b>Profil 1.2</b>	15,43	80700	180	14	1,3	1308462	<b>16,21</b>
<b>Profil 2.2</b>	13,65	67360	180	17	2,13	969718	<b>14,40</b>
<b>Profil 3.2</b>	16,32	76690	180	10	1,55	783871	<b>10,22</b>

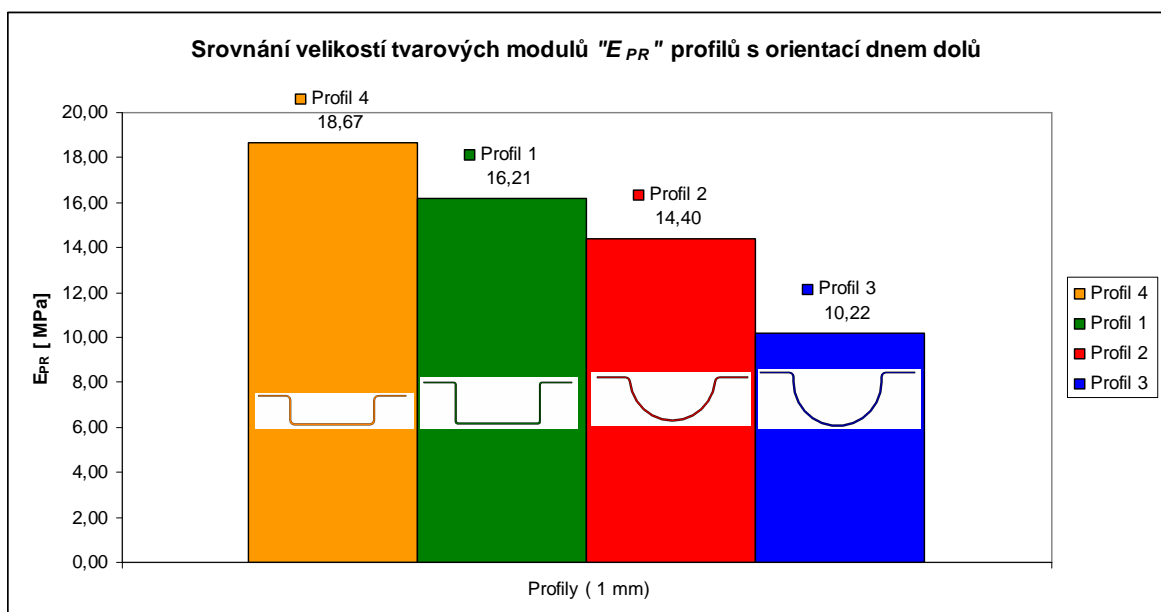
Tab. 49. Srovnání tvarových modulů profilů s orientací dnem dolů (1 mm)

V tabulce (Tab.49) vidíme, že **Profil č.4** má nejvyšší tvarový modul. Nejnižší modul má **Profil č.3**. Rozdíly mezi těmito profily vzhledem k profilu s nejvyšším tvarovým modulem, což je **Profilu č.4** si můžeme lépe přestavit v procentech.

1 mm dolů	$E_{PR}$ [MPa]	$E_{PR}$ [%]
<b>Profil 4.2</b>	18,67	<b>0</b>
<b>Profil 1.2</b>	16,21	<b>13,17</b>
<b>Profil 2.2</b>	14,40	<b>22,87</b>
<b>Profil 3.2</b>	10,22	<b>45,25</b>

Tab. 50. Rozdíl  $E_{PR}$  v % (1 mm, dolů)

Rozdíl v modulech můžeme také znázornit graficky.



Obr. 117. Rozdíl tvarových modulů profilů s orientací dnem dolů (1mm)

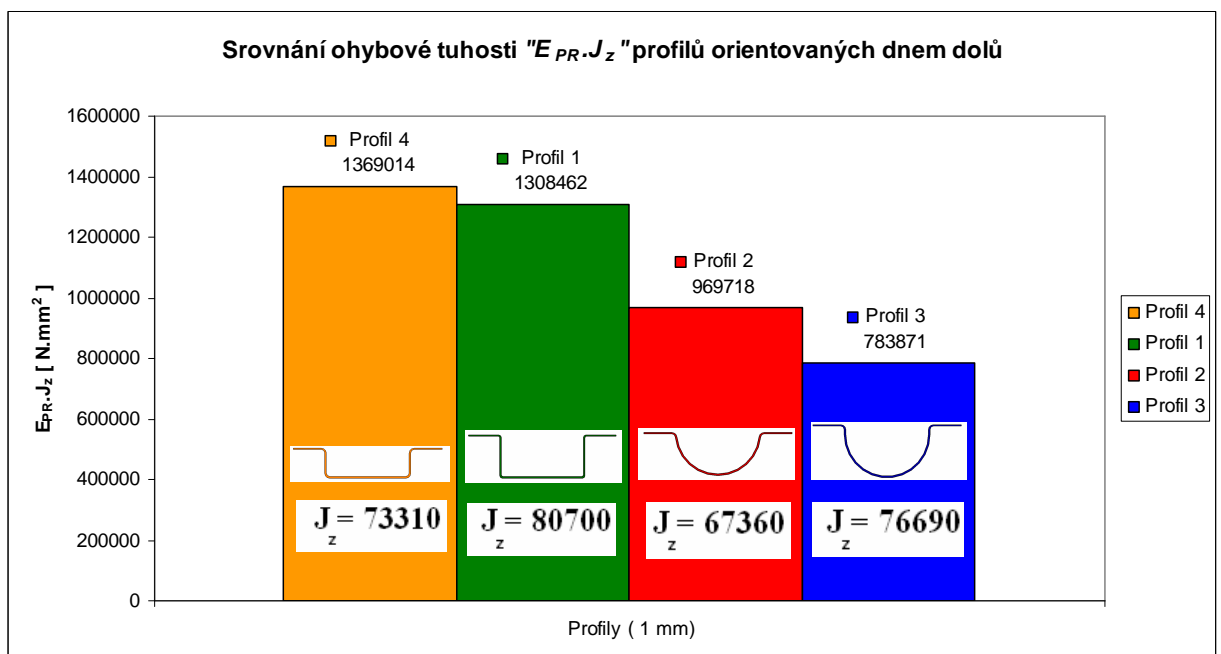


### 12.3.1 Vliv geometrie průřezu profilů na poměrné zvýšení ohybové tuhosti a únosnosti profilů orientovaných dnem dolů (1mm)

V tabulce (Tab.51) můžeme vidět seřazení profilů s nejvyšším kvadratickým momentem po nejmenší a jejich hodnoty tvarových modulů, jak v konečném důsledku ovlivnili příslušnou ohybovou tuhost.

1 mm dolů	$J_z$ [mm <sup>4</sup> ]	$E_{PR}$ [MPa]	$E_{PR} \cdot J_z$ [N.mm <sup>2</sup> ]
<b>Profil 1.2</b>	80700	16,21	<b>1308462</b>
<b>Profil 3.2</b>	76690	10,22	<b>783871</b>
<b>Profil 4.2</b>	73310	18,67	<b>1369014</b>
<b>Profil 2.2</b>	67360	14,40	<b>969718</b>

Tab. 51. Vliv  $J_z$  na  $E_{PR} \cdot J_z$  (1 mm, dolů)



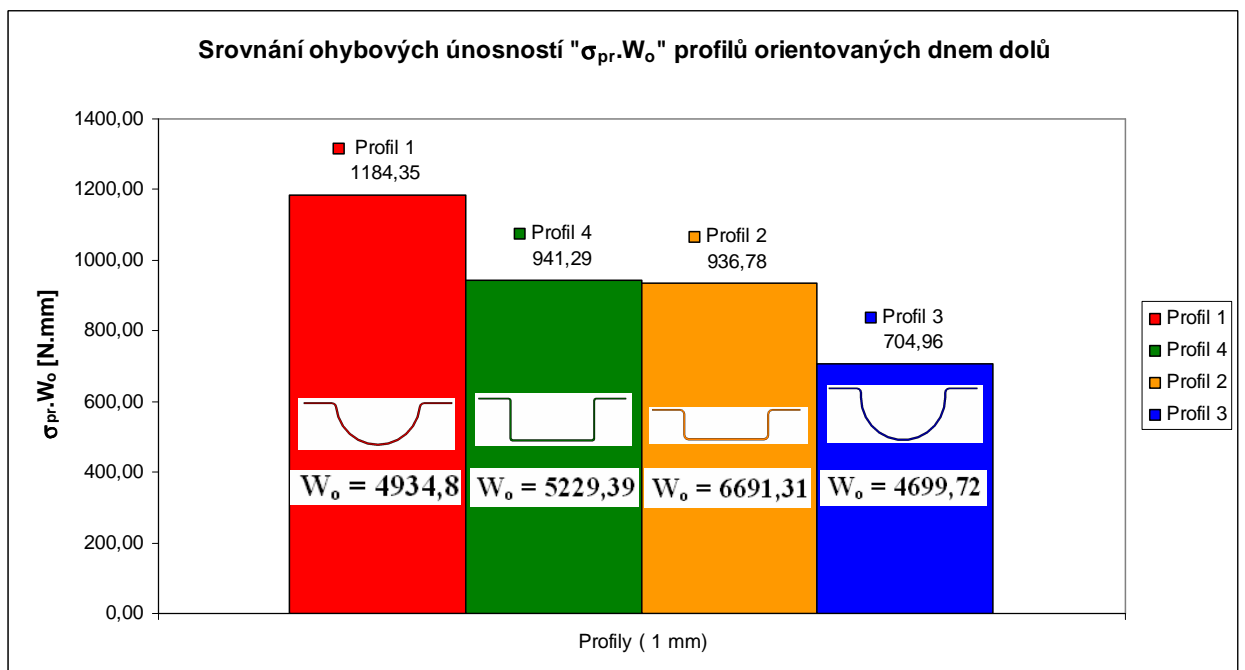
Obr. 118. Srovnání ohybové tuhosti profilů orientovaných dnem dolů (1 mm)

Na obrázku (Obr.118) vidíme, že profil s nejvyšším kvadratickým momentem (**Profil č.1**) ve skutečnosti nevykazuje nejvyšší ohybovou tuhost. Nejvyšší ohybovou tuhost vykazuje **Profil č.4**.

V tabulce (Tab.52) vidíme srovnání profilů od největšího modulu průřezu v ohybu po nejmenší a jejich hodnoty meze pevnosti, jak v konečném důsledku ovlivnily ohybovou únosnost.

1 mm dolů	$\sigma_p$ [ MPa]	$W_o$ [mm <sup>3</sup> ]	$\sigma_p \cdot W_o$ [ N.mm]
<b>Profil 4.2</b>	0,14	6691,31	<b>936,78</b>
<b>Profil 1.2</b>	0,18	5229,39	<b>941,29</b>
<b>Profil 2.2</b>	0,24	4934,8	<b>1184,35</b>
<b>Profil 3.2</b>	0,15	4699,72	<b>704,96</b>

Tab. 52. Ohybová únosnost profilů (1 mm, dolů)



Obr. 119. Srovnání ohybové únosnosti profilů orientovaných dnem dolů (1 mm)

Dle obrázku (Obr.119) můžeme vidět, že profil s nejvyšším modulem průřezu v ohybu (**Profil č.4**) nevykazuje nejvyšší ohybovou únosnost. Nejvyšší únosnost má **Profil č.2**.

Tyto výsledky se od všech ostatních výsledků liší nejvíce. Poprvé nám vyšlo, že **Profil č.2** je nejvíce pevný a **Profil č.4** je až na 3. místě. Může to být opět způsobeno kvalitou vytvářených profilů.

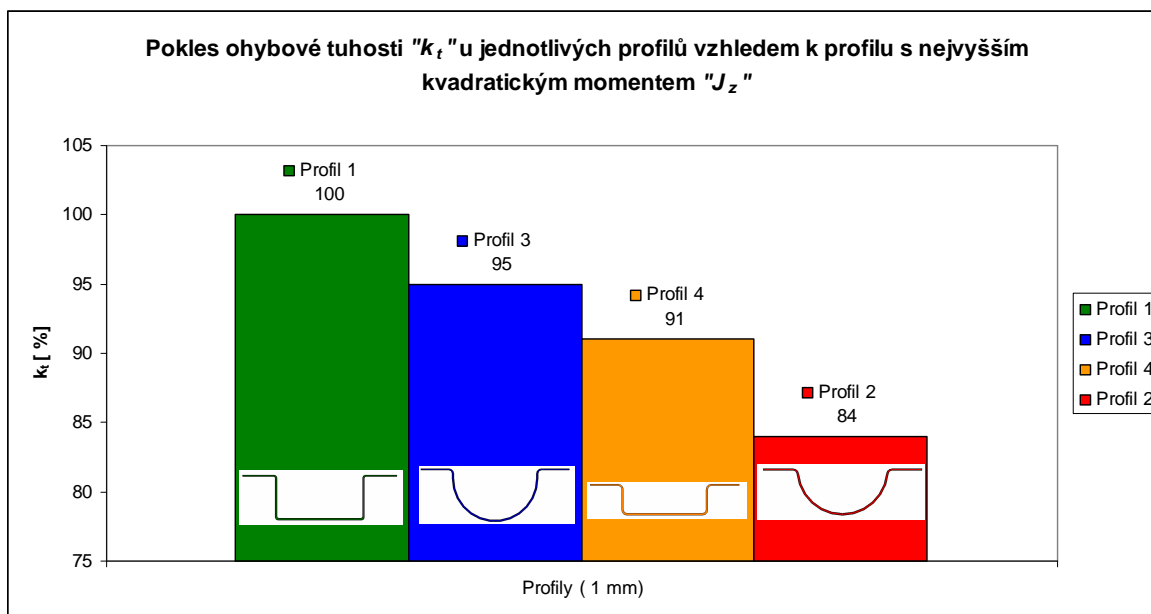
### Poměrná (teoretická) ohybová tuhost „ $k_t$ “

V tabulce (Tab.53) vidíme srovnání poměrných ohybových tuhostí profilů vzhledem k profilu s největším kvadratickým momentem, což je **Profil č.1**.

Je zřejmé, že tuhost **Profilu 3** z hlediska kvadratického momentu je o 5 % (95 ze 100) menší než tuhost **Profilu 1**. Tuhost **Profilu 4** o 9 % a tuhost **Profilu 2** o 16 %. Rozdíly mezi poměrnými tuhostmi se tedy pohybují v rozmezí 5-16 %.

1 mm dolů	$J_z$ [mm <sup>4</sup> ]	$k_t$ [%]
<b>Profil 1.2</b>	<b>80700</b>	100
<b>Profil 3.2</b>	<b>76690</b>	95
<b>Profil 4.2</b>	<b>73310</b>	91
<b>Profil 2.2</b>	<b>67360</b>	84

Tab. 53. Poměrná ohybová tuhost (1 mm, dolů)



Obr. 120. Poměrná ohybová tuhost profilů orientovaných dnem dolů (1 mm)

Dle obrázku (Obr.120) můžeme vidět, že **Profil č.1** má nejvyšší kvadratický moment a tudíž nejvíce přispívá na ohybovou tuhost ze všech 4 profilů stejně jako u profilů orientovaných dnem nahoru. Je to dáno tím, že orientace profilů (dnem nahoru nebo dnem dolů) nemá vliv na velikost kvadratických momentů. Hodnoty poměrných ohybových tuhostí profilů orientovaných dnem dolů se shodují s hodnotami poměrných ohybových tuhostí profilů orientovaných dnem nahoru.

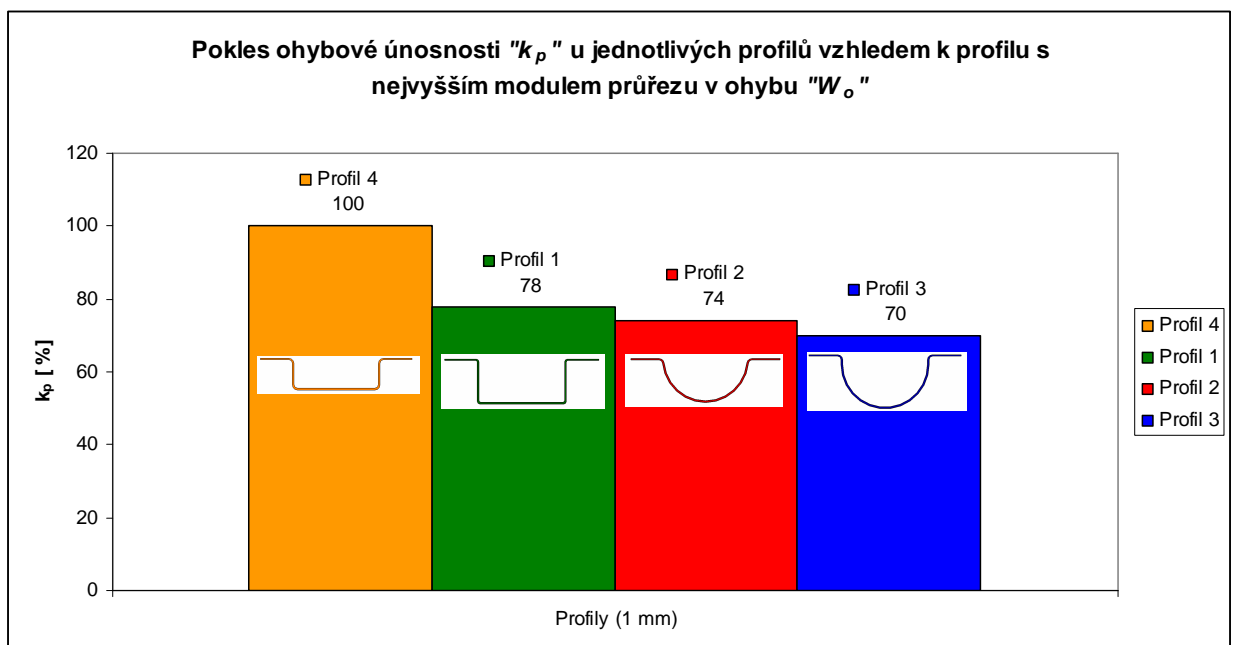
### Poměrná (teoretická) ohybová únosnost „ $k_p$ “

V tabulce (Tab.54) vidíme srovnání poměrných ohybových únosností profilů vzhledem k profilu s největším modulem průřezu v ohybu, což je **Profil č.4**.

Je zřejmé, že únosnost **Profilu 1** z hlediska  $W_o$  je o 22 % (78 ze 100) menší než únosnost **Profilu 4**. Únosnost **Profilu 2** o 24 % a únosnost **Profilu 3** o 30 %. Rozdíly mezi poměrnými únosnostmi se tedy pohybují v rozmezí 22-30 %.

1 mm dolů	$J_z$ [mm <sup>4</sup> ]	$e_{max}$ [mm]	$W_o$ [mm <sup>3</sup> ]	$k_p$ [%]
<b>Profil 4.2</b>	73310	10,96	<b>6691,31</b>	100
<b>Profil 1.2</b>	80700	15,43	<b>5229,39</b>	78
<b>Profil 2.2</b>	67360	13,65	<b>4934,80</b>	74
<b>Profil 3.2</b>	76690	16,32	<b>4699,72</b>	70

Tab. 54. Poměrná ohybová únosnost (1 mm, dolů)



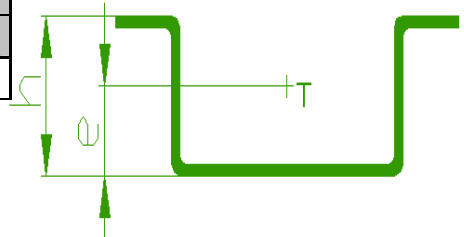
Obr. 121. Poměrná ohybová únosnost profilů orientovaných dnem dolů (1 mm)

Dle obrázku (Obr.121) můžeme vidět, že **Profil č.4** má nejvyšší ohybovou únosnost. Nejnižší pak **Profil č.3**. Dle výpočtů je tedy zřejmé, že také hodnoty poměrných únosností profilů orientovaných dnem dolů jsou shodné s hodnotami poměrných únosností profilů orientovaných dnem nahoru. I zde tedy orientace profilů (dnem nahoru nebo dnem dolů) nemá vliv, jelikož hodnoty  $J_z$  a  $e_{max}$  neboli tedy ( $W_o$ ) se nemění s orientací profilů.

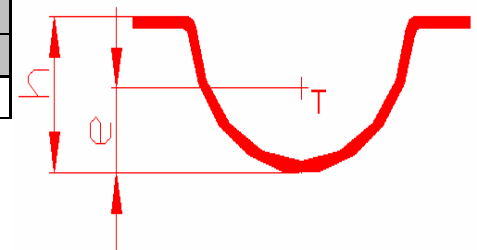
12.3.2 Vliv poměru výšky profilu „h“ a vzdálenosti krajního vlákna profilu „ $e_{max}$ “ na ohybovou tuhost  $E_{PR} \cdot J_z$

Naměřené a vypočtené hodnoty

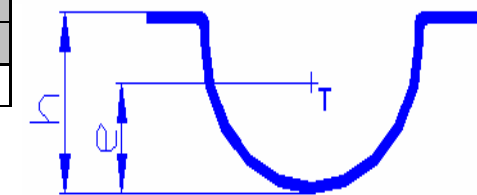
1 mm	$e_{max}$	h	$h/e_{max}$	$E_{PR} \cdot J_z$
dolů	[mm]	[mm]	[-]	[N.mm <sup>2</sup> ]
<b>Profil 1.2</b>	15,43	26,08	1,69	1308462



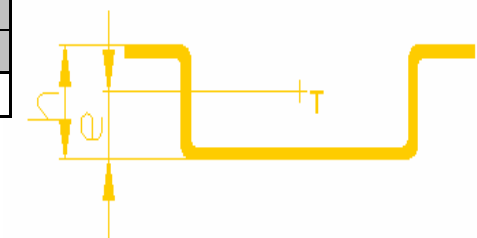
1 mm	$e_{max}$	h	$h/e_{max}$	$E_{PR} \cdot J_z$
dolů	[mm]	[mm]	[-]	[N.mm <sup>2</sup> ]
<b>Profil 2.2</b>	13,65	26,12	1,91	969718



1 mm	$e_{max}$	h	$h/e_{max}$	$E_{PR} \cdot J_z$
dolů	[mm]	[mm]	[-]	[N.mm <sup>2</sup> ]
<b>Profil 3.2</b>	16,32	31,95	1,96	783871



1 mm	$e_{max}$	h	$h/e_{max}$	$E_{PR} \cdot J_z$
dolů	[mm]	[mm]	[-]	[N.mm <sup>2</sup> ]
<b>Profil 4.2</b>	10,96	18,16	1,66	1369014



Seřazení poměrů „ $h/e_{max}$ “ od nejmenšího po největší:

1 mm	$e_{max}$	h	$h/e_{max}$
dolů	[mm]	[mm]	[-]
<b>Profil 4.2</b>	10,96	18,16	<b>1,66</b>
<b>Profil 1.2</b>	15,43	26,08	<b>1,69</b>
<b>Profil 2.2</b>	13,65	26,12	<b>1,91</b>
<b>Profil 3.2</b>	16,32	31,95	<b>1,96</b>

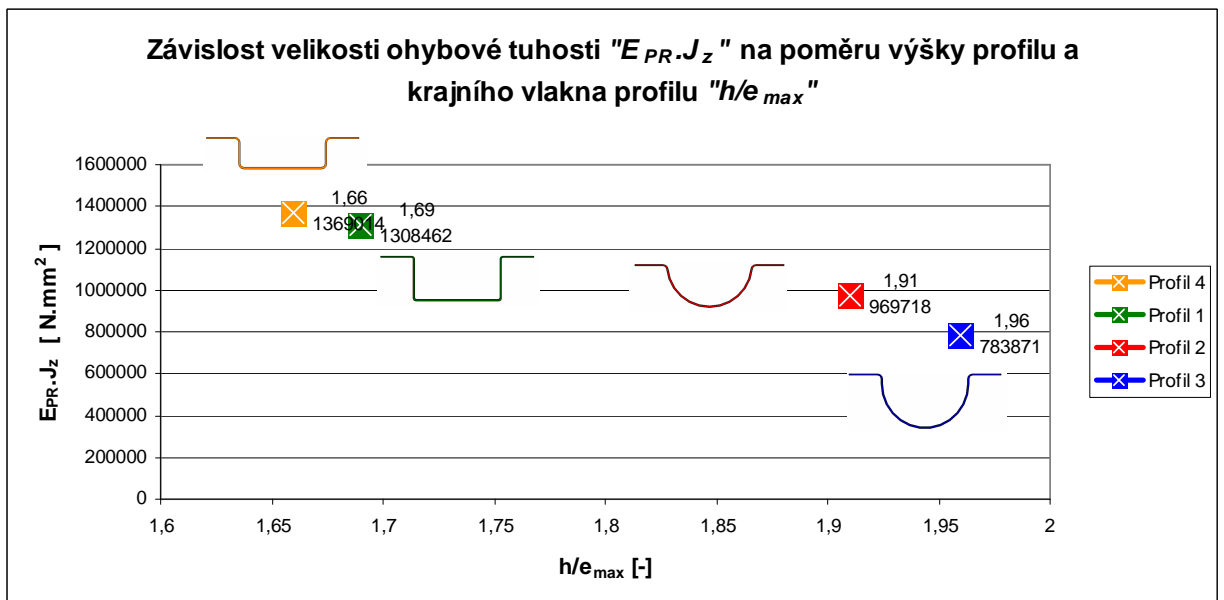
Tab. 55. Seřazení poměrů  $h/e_{max}$  (1 mm)

### Grafické znázornění vypočtených hodnot

Dle tabulky (Tab.56) vidíme, že čím menší je poměr mezi výškou profilu a vzdáleností krajního vlákna profilu, tím ohybová tuhost stoupá, stejně jako ve všech předchozích případech.

1 mm dolů	$e_{max}$ [mm]	$h$ [mm]	$h/e_{max}$ [-]	$E_{PR.J_z}$ [N.mm <sup>2</sup> ]
<b>Profil 4.2</b>	10,96	18,16	<b>1,66</b>	<b>1369014</b>
<b>Profil 1.2</b>	15,43	26,08	<b>1,69</b>	<b>1308462</b>
<b>Profil 2.2</b>	13,65	26,12	<b>1,91</b>	<b>969718</b>
<b>Profil 3.2</b>	16,32	31,95	<b>1,96</b>	<b>783871</b>

Tab. 56. Vliv  $h/e_{max}$  na  $E_{PR.J_z}$  (1 mm, dolů)



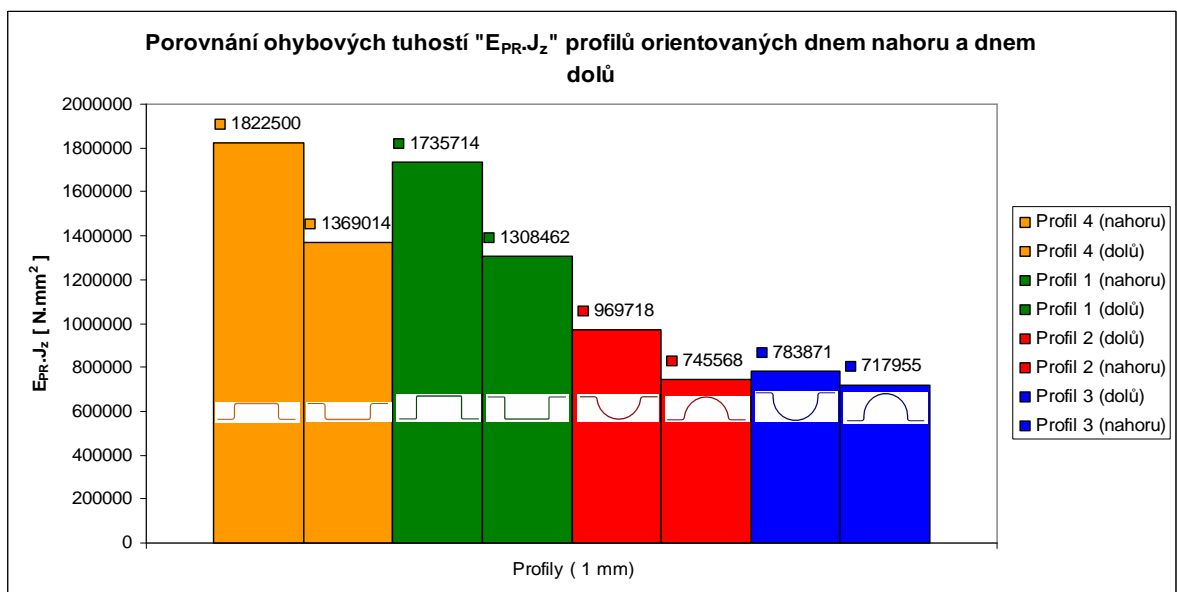
Obr. 122. Vliv  $h/e_{max}$  na  $E_{PR.J_z}$  profilů orientovaných dnem dolů (1 mm)

Dle obrázku (Obr.122) můžeme vidět, že poměr  $h/e_{max}$  má pravděpodobně vliv na ohybovou tuhost stejně jako u profilů s orientací dnem nahoru a u profilů tloušťky 2 mm. Se zvyšujícím se poměrem ohybová tuhost klesá, profil ztrácí rychle stabilitu a rychle se otvírá. Se snižujícím poměrem ohybová tuhost stoupá, profil je více tuhý a více stabilní, pomaleji se otvírá (bortí).

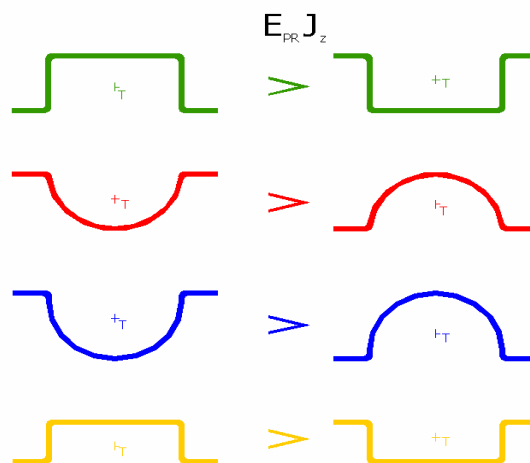
### 13 SHRNUŤÍ A VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ PROFILŮ TLOUŠŤKY 1 MM

#### 13.1 Srovnání ohybové tuhosti mezi profily orientovanými dnem nahoru a dnem dolů (1 mm)

V následujícím obrázku (Obr.123) můžeme vidět, že výsledky se nám liší od výsledků u profilů tloušťky 2 mm. Zde nejsou výsledky jednoznačné. Ve dvou případech jsou profily vyšší tuhosti s orientací dnem dolů (tj. *Profil 2 a Profil 3*) a ve dvou dalších případech s orientací dnem nahoru (tj. *Profil 1 a Profil 4*).



Obr. 123. Srovnání  $E_{PR-J_z}$  dnem nahoru a dnem dolů (1 mm)

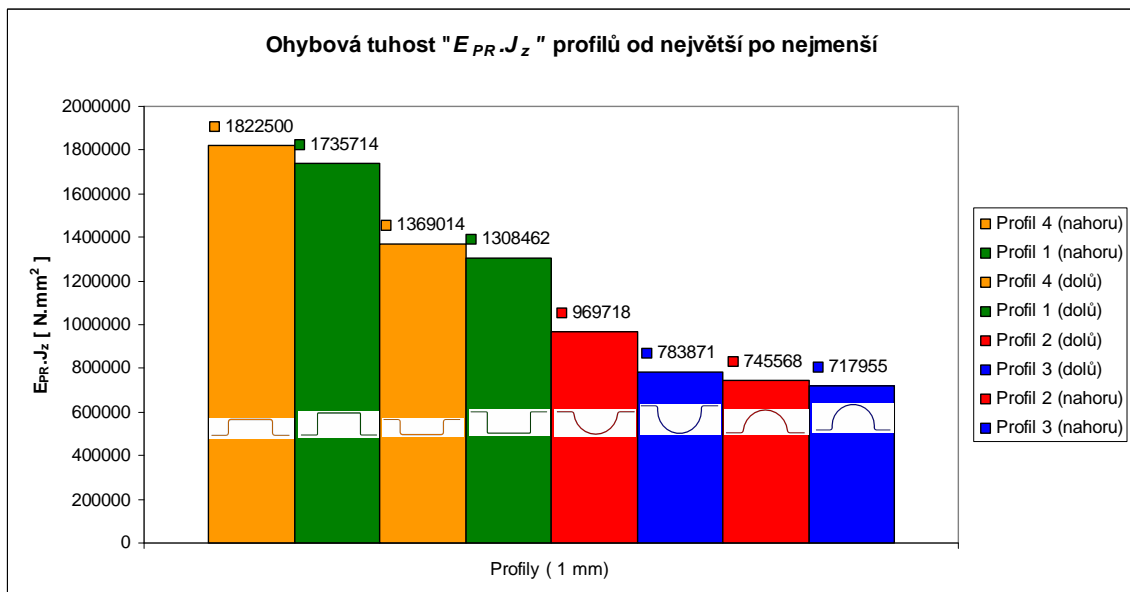


Obr. 124. Srovnání  $E_{PR-J_z}$  dnem nahoru a dnem dolů (1 mm)

V tabulce (Tab.57) vidíme seřazení  $E_{PR}\cdot J_z$  od největší hodnoty po nejmenší.

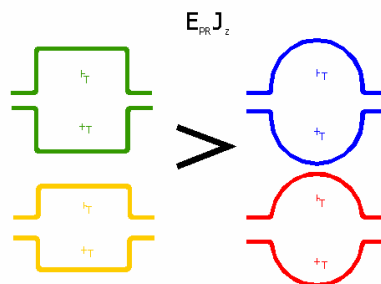
	1 mm	$E_{PR}\cdot J_z$
	Profil	[N.mm <sup>2</sup> ]
1	Profil 4.1	1822500
2	Profil 1.1	1735714
3	Profil 4.2	1369014
4	Profil 1.2	1308462
5	Profil 2.2	969718
6	Profil 3.2	783871
7	Profil 2.1	745568
8	Profil 3.1	717955

Tab. 57.  $E_{PR}\cdot J_z$  od největší po nejmenší (1 mm)



Obr. 125.  $E_{PR}\cdot J_z$  od největší po nejmenší (1 mm)

Z obrázku (Obr.126) je zřejmé, že **Profil č.4.a Profil č.1** jsou více tuhé než **Profil č.2** a **Profil č.3** a to, jak orientací dnem nahoru, tak orientací dnem dolů, jako u profilů 2 mm.

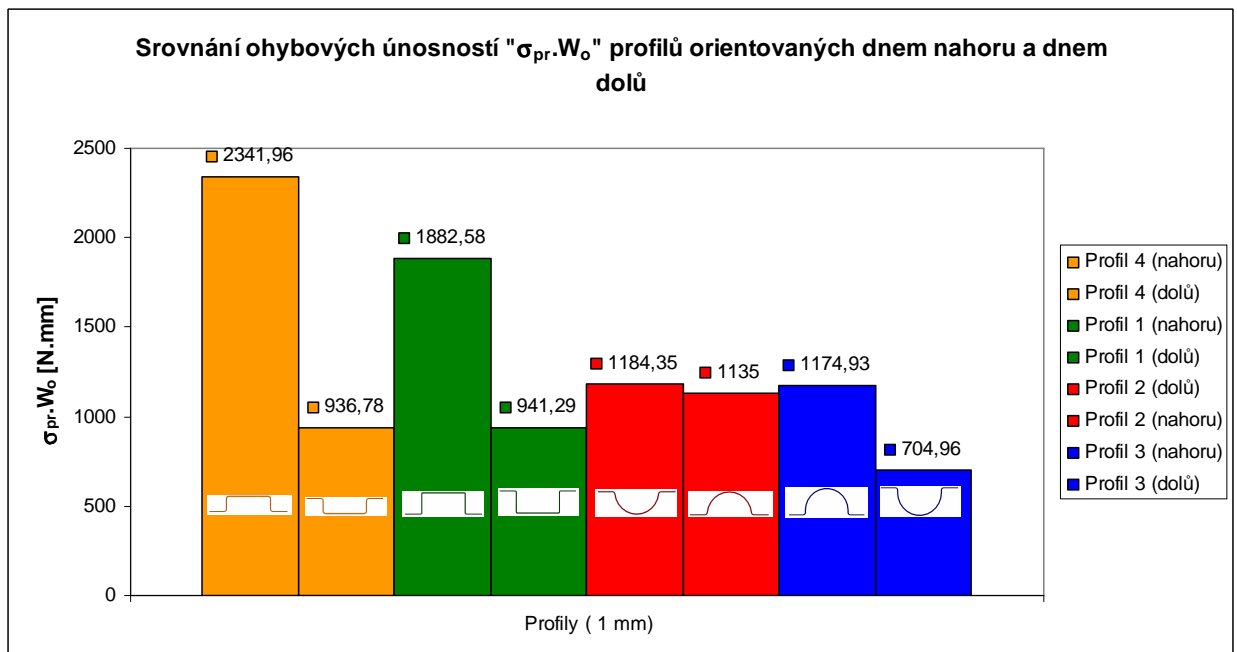


Obr. 126. Srovnání  $E_{PR}\cdot J_z$  (1 mm)

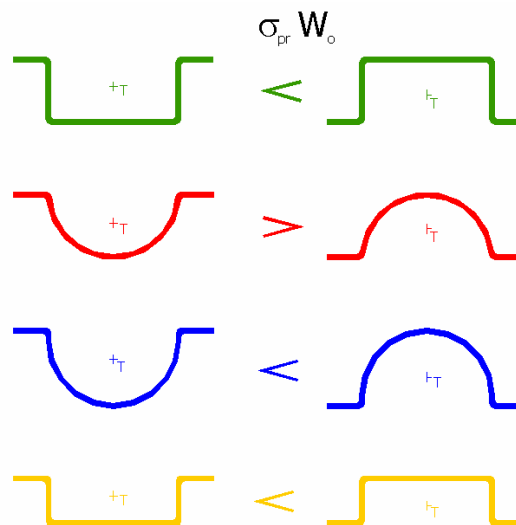


### 13.2 Srovnání ohybové únosnosti mezi profily orientovanými dnem nahoru a dnem dolů (1 mm)

Na obrázku (Obr.127) vidíme, že profily s orientací dnem nahoru se vyznačují vyšší ohybovou únosností než profily orientované dnem dolů, kromě jednoho případu, kterým je **Profil č.2**. Zde je hodnota ohybové únosnosti větší při orientaci dnem dolů. Můžeme si všimnout, že výsledky ohybové únosnosti u profilů tloušťek 1 mm jsou hodně chaotické a méně přesné.



Obr. 127. Srovnání  $\sigma_{pr} \cdot W_o$  dnem nahoru a dnem dolů pro profily tloušťky 1 mm

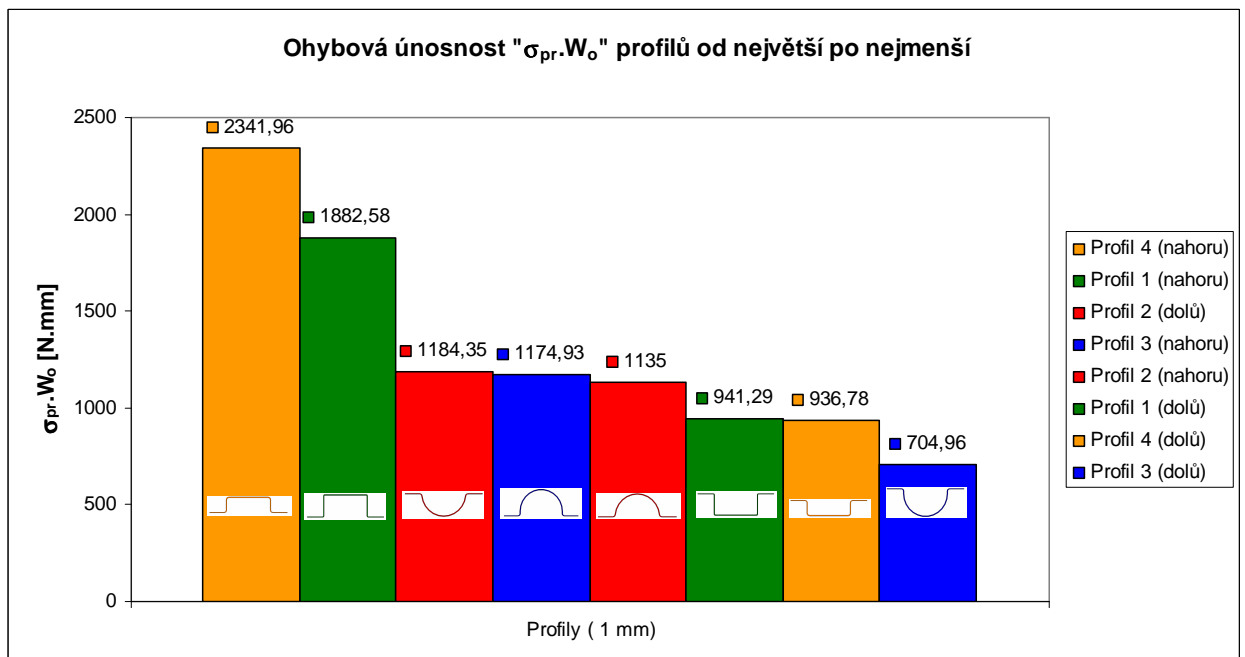


Tab. 58. Srovnání  $\sigma_{pr} \cdot W_o$  dnem nahoru a dnem dolů (1mm)

V tabulce (Tab.59) vidíme srovnání ohybové únosnosti profilů o největší po nejmenší.

	1 mm	$\sigma_{pr} \cdot W_o$
	Profil	[ N.mm ]
1	Profil 4.1	2341,96
2	Profil 1.1	1882,58
3	Profil 2.2	1184,35
4	Profil 3.1	1174,93
5	Profil 2.1	1135
6	Profil 1.2	941,29
7	Profil 4.2	936,78
8	Profil 3.2	704,96

Tab. 59.  $\sigma_{pr} \cdot W_o$  od největší po nejmenší (1 mm)



Obr. 128.  $\sigma_{pr} \cdot W_o$  od největší po nejmenší (1 mm)

Na obrázku (Obr.128) vidíme seřazení ohybových únosností profilů od největší po nejmenší. Jak už bylo řečeno, výsledky profilů tloušťky 1 mm jsou hodně proměnlivé, a proto se podle nich nelze moc řídit. Souvisí to s jejich tloušťkou, která je malá, a proto se může stát, že jednotlivé tvary profilů už nemají takový vliv na pevnost a některé měření mohou být zkresleny popř. jsou náhodné.

### 13.3 Srovnání teoretické ohybové tuhosti a únosnosti profilů orientovaných dnem nahoru a dnem dolů (1 mm)

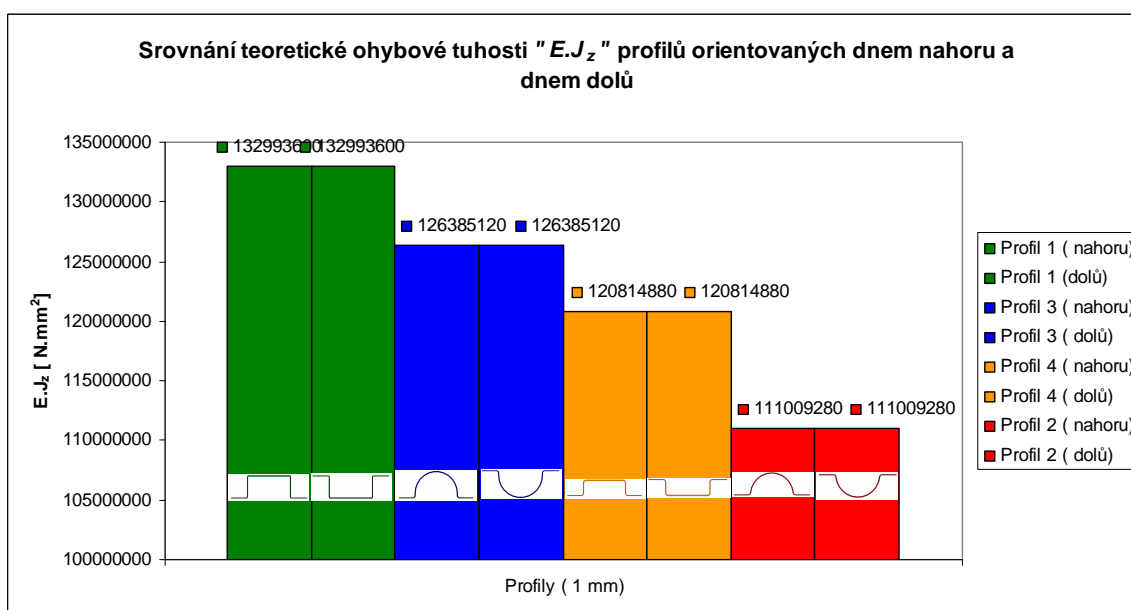
#### 13.3.1 Teoretická ohybová tuhost profilů (1mm)

Dle obrázku (Obr.129) můžeme vidět, že nejvyšší ohybové tuhosti je dosaženo u **Profilu č.1**, jelikož se vyznačuje nejvyšší hodnotou kvadratického momentu průřezu plochy. Jako ohybovou tuhost by jsme mohli vyhodnocovat pouze kvadratický moment profilů, jelikož modul pružnosti materiálu  $E$  je pro všechny profily stejný (nemusíme ho tedy uvažovat). Můžeme tedy vidět, že hodnoty teoretických ohybových tuhostí profilů se nemění s orientací profilů tzn. dnem nahoru nebo dnem dolů.

V tabulce (Tab.60) můžeme vidět seřazení teoretických ohybových tuhostí profilů od největší tuhosti po nejmenší.

	1 mm	$J_z$	$E$	$E \cdot J_z$
		[mm <sup>4</sup> ]	[MPa]	[N.mm <sup>2</sup> ]
1	Profil 1	80700	1648	132993600
2	Profil 3	76690	1648	126385120
3	Profil 4	73310	1648	120814880
4	Profil 2	67360	1648	111009280

Tab. 60. Srovnání  $E \cdot J_z$  profilů dnem nahoru a dolů (1 mm)



Obr. 129. Srovnání  $E \cdot J_z$  orientovaných dnem nahoru a dnem dolů (1 mm)

### 13.3.2 Teoretická ohybová únosnost profilů (1 mm)

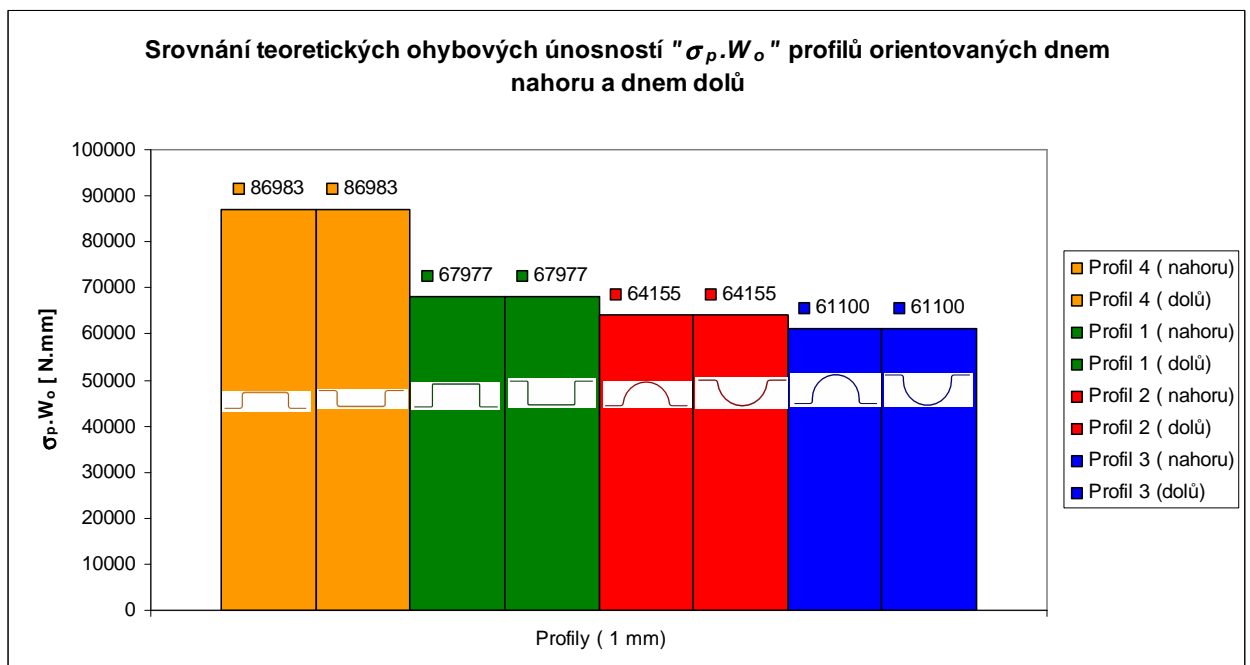
Dle obrázku (Obr.130) můžeme vidět, že nejvyšší ohybové únosnosti je dosaženo u **Profilu č.4**. I zde můžeme vidět, že orientace profilů (dnem nahoru nebo dnem dolů) teoreticky nemá vliv na hodnotu ohybové únosnosti profilů.

V tabulce (Tab.61) můžeme vidět seřazení ohybových únosností profilů od největšího modulu průřezu v ohybu po nejmenší. Mez pevnosti materiálu je pro všechny profily stejná (stejný materiál).

Je tedy zřejmé, že **Profil č.4** se vyznačuje největší odolností proti ohybu a tedy také největší pevností, stejně jako tomu bylo u profilů 2 tloušťky mm.

	1 mm	$W_o$ [mm <sup>3</sup> ]	$\sigma_p$ [MPa]	$\sigma_p \cdot W_o$ [N.mm]
1	Profil 4	6691	13	86983
2	Profil 1	5229	13	67977
3	Profil 2	4935	13	64155
4	Profil 3	4700	13	61100

Tab. 61. Srovnání  $\sigma_p \cdot W_o$  profilů dnem nahoru a dolů (1 mm)

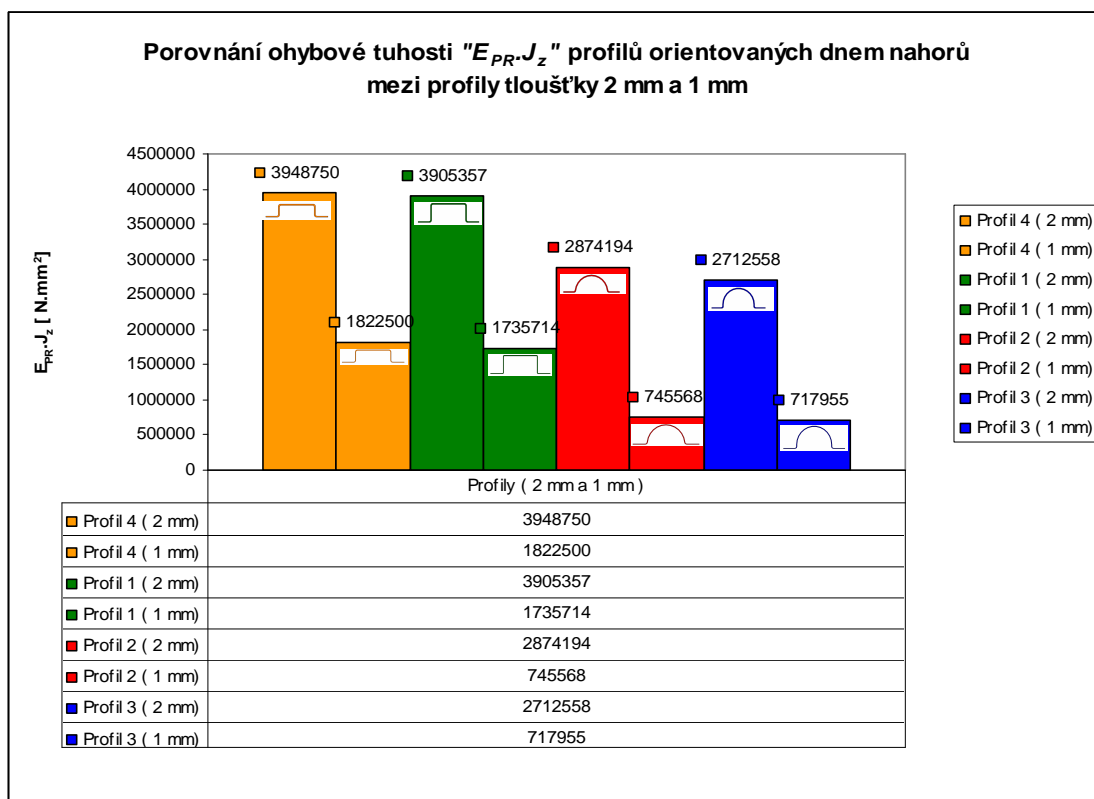


Obr. 130. Srovnání  $\sigma_p \cdot W_o$  profilů orientovaných dnem nahoru a dnem dolů (1 mm)

## 14 SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ PROFILŮ TLOUŠŤEK 1 MM A 2 MM

### 14.1 Srovnání ohybové tuhosti profilů orientovaných dnem nahoru

Na obrázku (Obr.131) můžeme vidět srovnání ohybových tuhostí mezi profily tloušťky 1 a 2 mm orientovaných dnem nahoru. Pro lepší představu o kolik se liší ohybová tuhostí profilů tloušťky 2 mm od profilů tloušťky 1 mm uvádíme v násobku v tabulce (Tab.62).



Obr. 131. Rozdíl  $E_{PR.J_z}$  mezi profily 1 a 2 mm orientovaných dnem nahoru

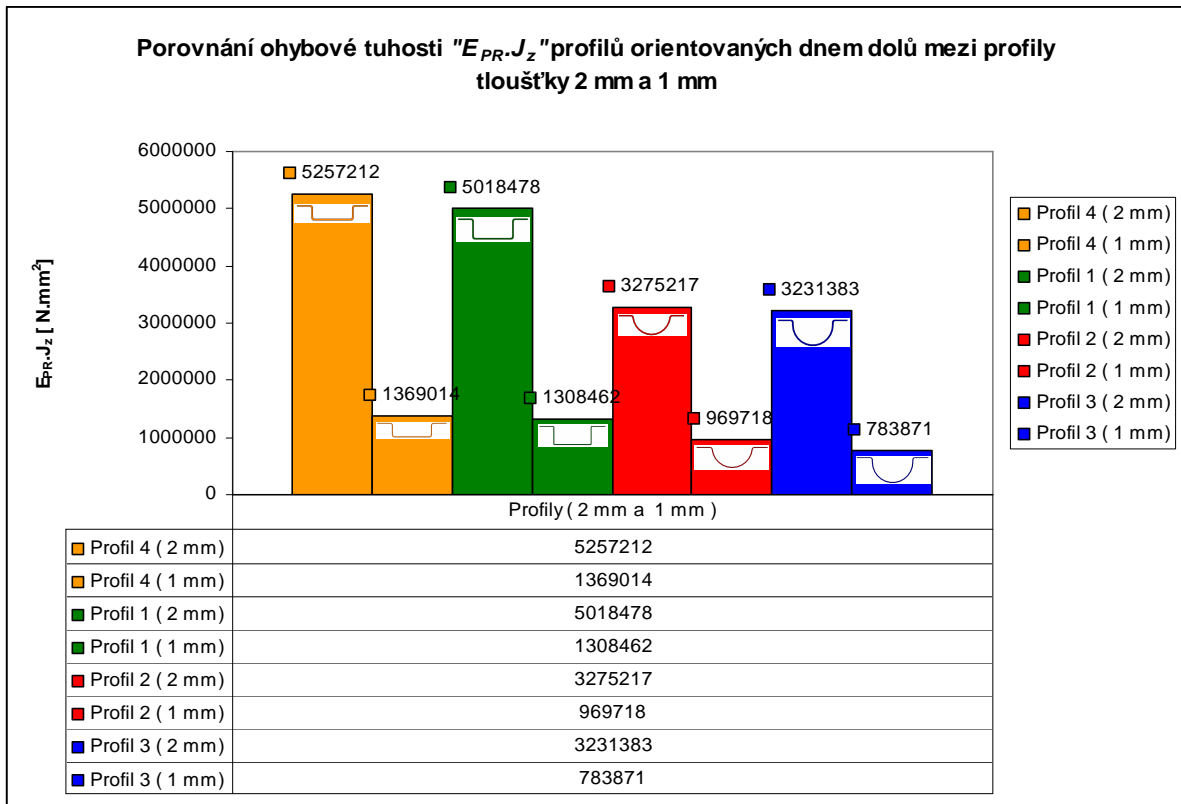
Profily	$E_{PR.J_z}$	$E_{PR.J_z}$	Rozdíl	Násobek
nahoru	2 [mm]	1 [mm]	[%]	[x]
<b>Profil 4.1</b>	3948750	1822500	54	2,16
<b>Profil 1.1</b>	3905357	1735714	55	2,25
<b>Profil 2.1</b>	2874194	745568	74	3,85
<b>Profil 3.1</b>	2712558	717955	73	3,77

Tab. 62. Rozdíl  $E_{PR.J_z}$  mezi profily 1 a 2 mm (nahoru)

Dle tabulky (Tab.62) jasně vidíme, že profily z tloušťky 2 mm se vyznačují podstatně větší ohybovou tuhostí než profily tloušťky 1 mm. Jejich procentuální rozdíl se pohybuje mezi 54- 74 % a násobek mezi 2,14 – 3,77krát větší ve prospěch profilů tloušťky 2 mm.

## 14.2 Srovnání ohybové tuhosti profilů orientovaných dnem dolů

Na obrázku (Obr.132) můžeme vidět srovnání ohybových tuhostí mezi profily tloušťky 1 a 2 mm orientovaných dnem dolů. Pro lepší představu o kolik se liší ohybová tuhost profilů tloušťky 2 mm od profilů tloušťky 1 mm uvádíme v násobku v tabulce (Tab.63).



Obr. 132. Rozdíl  $E_{PR-J_z}$  mezi profily 1 a 2 mm orientovaných dnem dolů

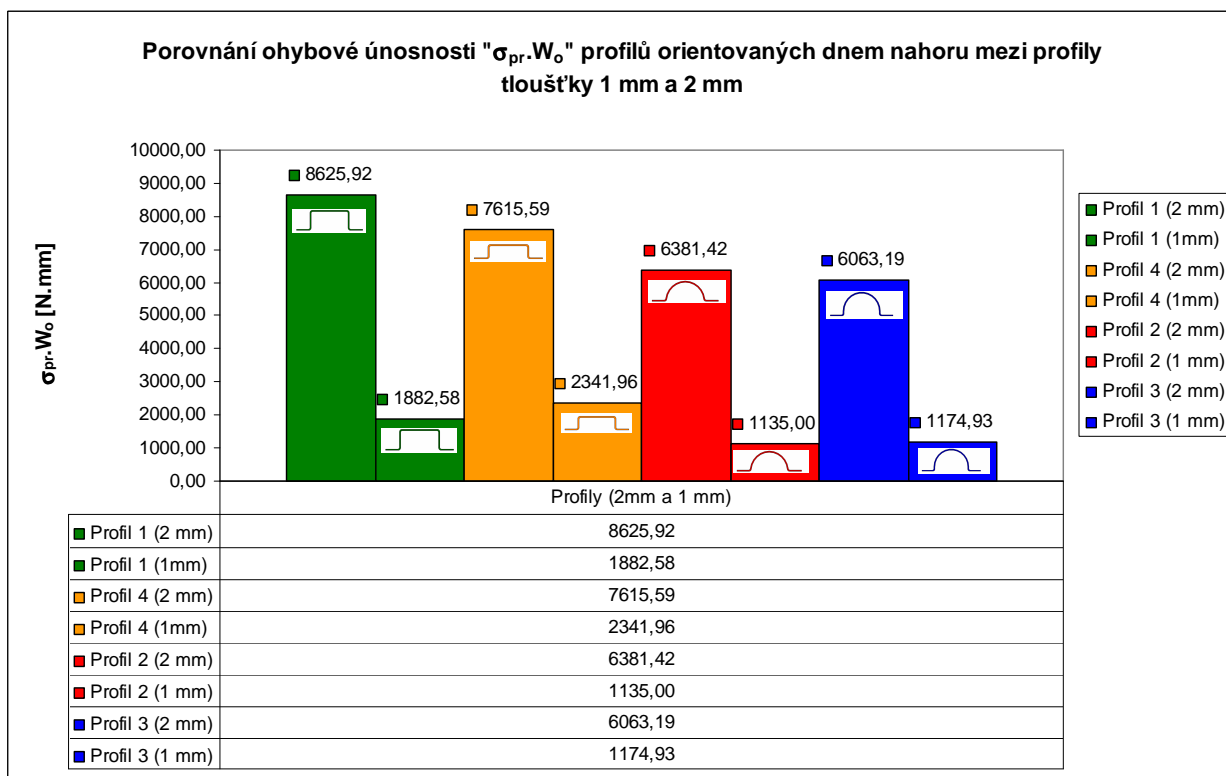
Profily	$E_{PR-J_z}$	$E_{PR-J_z}$	Rozdíl	Násobek
dolů	2 [mm]	1 [mm]	[%]	[x]
<b>Profil 4.2</b>	5257212	1369014	74	3,84
<b>Profil 1.2</b>	5018478	1308462	74	3,83
<b>Profil 2.2</b>	3275217	969718	70	3,37
<b>Profil 3.2</b>	3231383	783871	76	4,12

Tab. 63. Rozdíl  $E_{PR-J_z}$  mezi profily 1 a 2 mm (dolů)

Dle tabulky (Tab.63) opět jasně vidíme, že profily z tloušťky 2 mm se vyznačují podstatně větší ohybovou tuhostí než profily tloušťky 1 mm. Jejich procentuální rozdíl se pohybuje mezi 70-76 % a násobek mezi 3,37 – 4,12krát větší ve prospěch profilů tloušťky 2 mm.

### 14.3 Srovnání ohybové únosnosti profilů orientovaných dnem nahoru

Na obrázku (Obr.133) můžeme vidět srovnání ohybových únosností mezi profily tloušťky 1 a 2 mm orientovaných dnem nahoru. Pro lepší představu o kolik se liší ohybová únosnost profilů tloušťky 2 mm od profilů tloušťky 1 mm uvádíme v násobku v tabulce (Tab.64).



Obr. 133. Rozdíl  $\sigma_{pr} \cdot W_o$  mezi profily tloušťky 1 a 2 mm orientovaných dnem nahoru

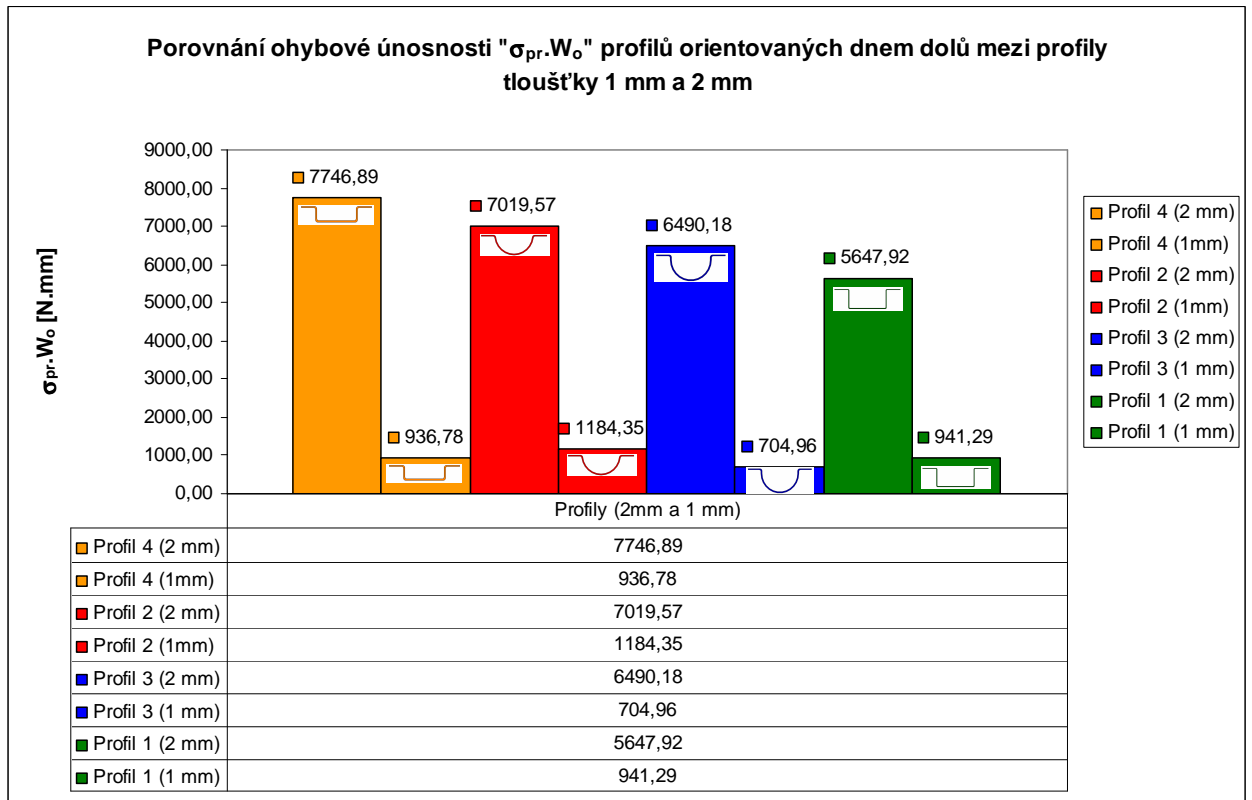
Profily	$\sigma_{pr} \cdot W_o$	$\sigma_{pr} \cdot W_o$	Rozdíl	Násobek
nahoru	2 [mm]	1 [mm]	[%]	[x]
<b>Profil 4.1</b>	7615,59	2341,96	69	3,25
<b>Profil 1.1</b>	8625,92	1882,58	78	4,58
<b>Profil 2.1</b>	6381,42	1135,00	82	5,62
<b>Profil 3.1</b>	6063,19	1174,93	81	5,16

Tab. 64. Rozdíl  $\sigma_{pr} \cdot W_o$  mezi profily tloušťky 1 a 2 mm (nahoru)

Dle tabulky (Tab.64) vidíme, že profily z tloušťky 2 mm se vyznačují podstatně větší ohybovou únosností než profily tloušťky 1 mm. Jejich procentuální rozdíl se pohybuje mezi 69-82 % a násobek mezi 3,25 – 5,62krát větší ve prospěch profilů tloušťky 2 mm.

### 14.4 Srovnání ohybové únosnosti profilů orientovaných dnem dolů

Na obrázku (Obr.134) můžeme vidět srovnání ohybových únosností mezi profily tloušťky 1 a 2 mm orientovaných dnem dolů. Pro lepší představu o kolik se liší ohybová únosnost profilů tloušťky 2 mm od profilů tloušťky 1 mm uvádíme v násobku v tabulce (Tab.65).



Obr. 134. Rozdíl  $\sigma_{pr} \cdot W_o$  mezi profily tloušťky 1 a 2 mm orientovaných dnem dolů

Profily	$\sigma_{pr} \cdot W_o$	$\sigma_{pr} \cdot W_o$	Rozdíl	Násobek
dolů	2 [mm]	1 [mm]	[%]	[x]
<b>Profil 4.2</b>	7746,89	936,78	88	8,27
<b>Profil 1.2</b>	5647,92	941,29	83	6,00
<b>Profil 2.2</b>	7019,57	1184,35	83	5,93
<b>Profil 3.2</b>	6490,18	704,96	89	9,21

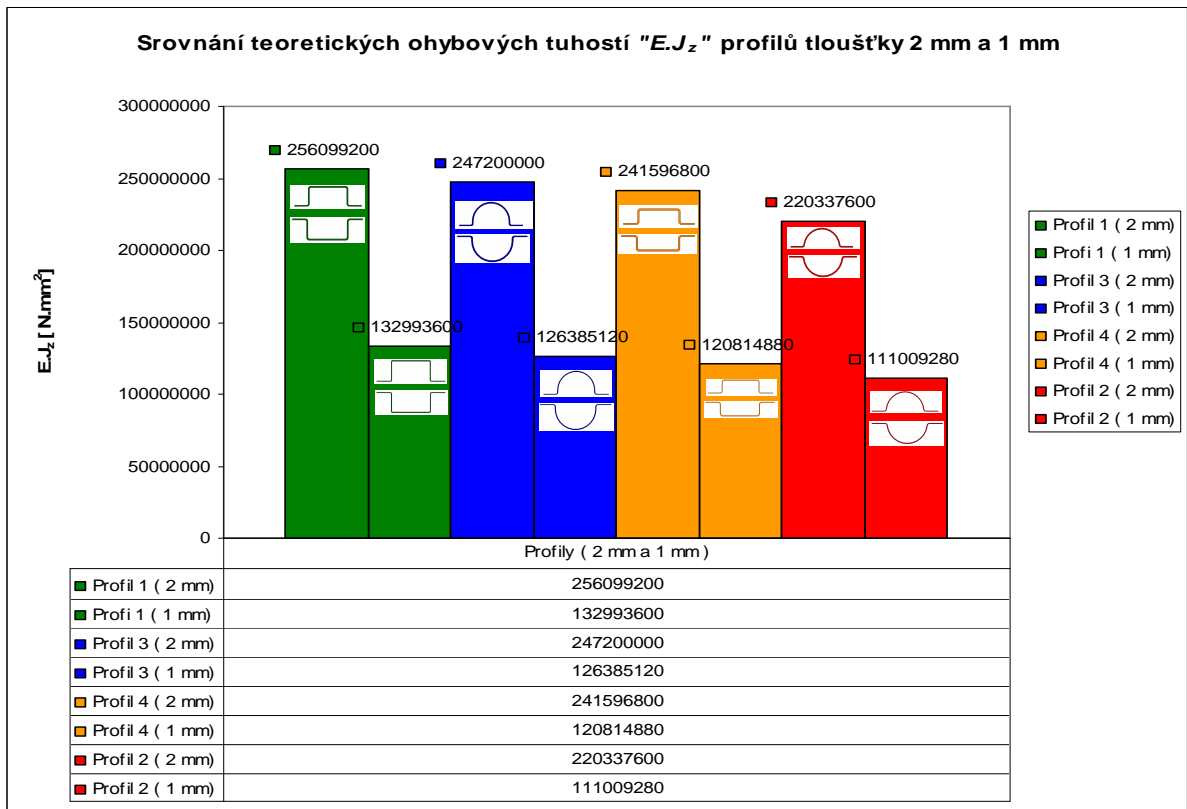
Tab. 65. Rozdíl  $\sigma_{pr} \cdot W_o$  mezi profily tloušťky 1 a 2 mm (dolů)

Dle tabulky (Tab.65) vidíme, že profily z tloušťky 2 mm se vyznačují podstatně větší ohybovou únosností než profily tloušťky 1 mm. Jejich procentuální rozdíl se pohybuje mezi 83-89 % a násobek mezi 5,93 – 9,21krát větší ve prospěch profilů tloušťky 2 mm.



### 14.5 Srovnání teoretických ohybových tuhostí profilů tloušťky 2 mm a 1 mm

Na obrázku (Obr.135) můžeme vidět srovnání teoretických ohybových tuhostí mezi profily tloušťky 1 a 2 mm. Pro lepší představu o kolik se liší teoretická ohybová tuhost profilů tloušťky 2 mm od profilů tloušťky 1 mm uvádíme v násobku v tabulce (Tab.66).



Obr. 135. Rozdíl E.J<sub>z</sub> mezi profily 1 a 2 mm

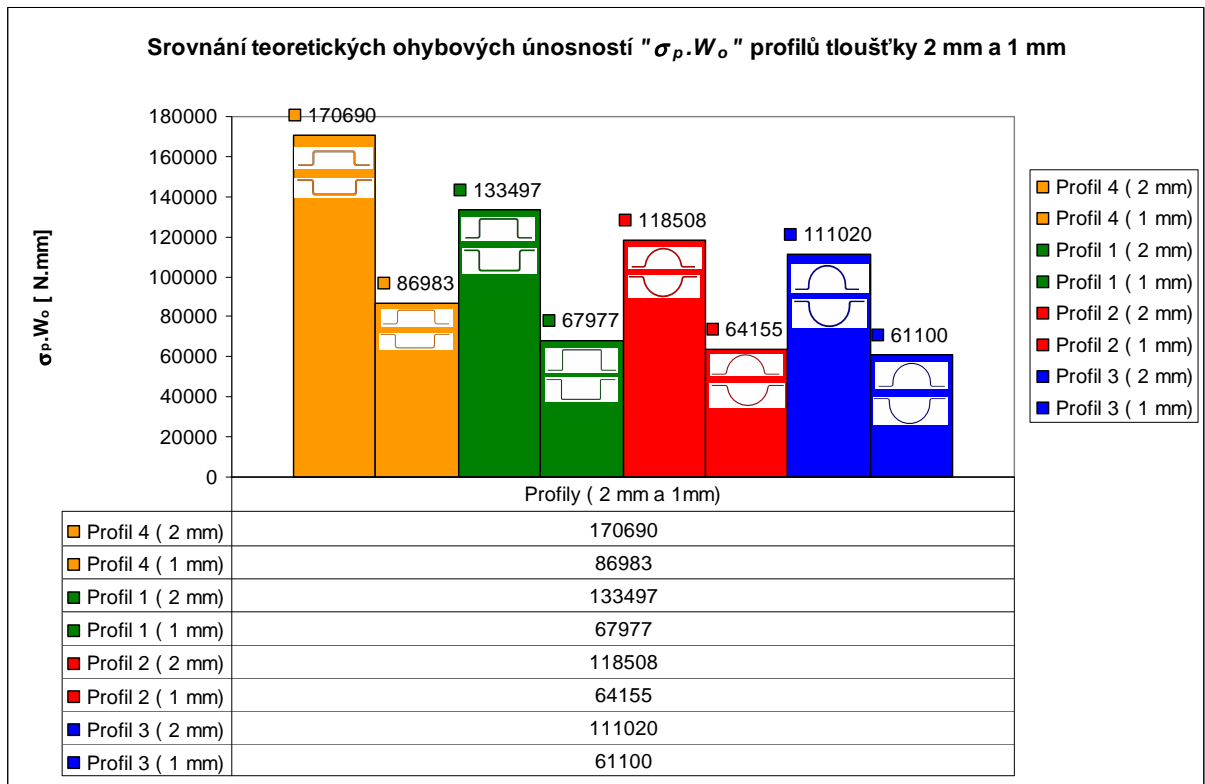
Profily	E.Jz 2 [mm]	E.Jz 1 [mm]	Rozdíl [%]	Násobek [x]
<b>Profil 1</b>	256099200	132993600	48	1,93
<b>Profil 3</b>	247200000	126385120	49	1,96
<b>Profil 4</b>	241596800	120814880	50	2,00
<b>Profil 2</b>	220337600	111009280	49	1,98

Tab. 66. Rozdíl E.J<sub>z</sub> mezi profily 1 a 2 mm

Dle tabulky (Tab.66) vidíme, že profily z tloušťky 2 mm se vyznačují podstatně větší ohybovou tuhostí než profily tloušťky 1 mm. Jejich procentuální rozdíl se pohybuje mezi 48-50 % a násobek mezi 1,93 – 2krát větší ve prospěch profilů tloušťky 2 mm.

## 14.6 Srovnání teoretických ohybových únosností profilů tloušťky 2 mm a 1 mm

Na obrázku (Obr.136) můžeme vidět srovnání ohybových únosností mezi profily tloušťky 1 a 2 mm. Pro lepší představu o kolik se liší ohybová únosnost profilů tloušťky 2 mm od profilů tloušťky 1 mm uvádíme v násobku v tabulce (Tab.67).



Obr. 136. Rozdíl  $\sigma_p \cdot W_o$  mezi profily 1 a 2 mm

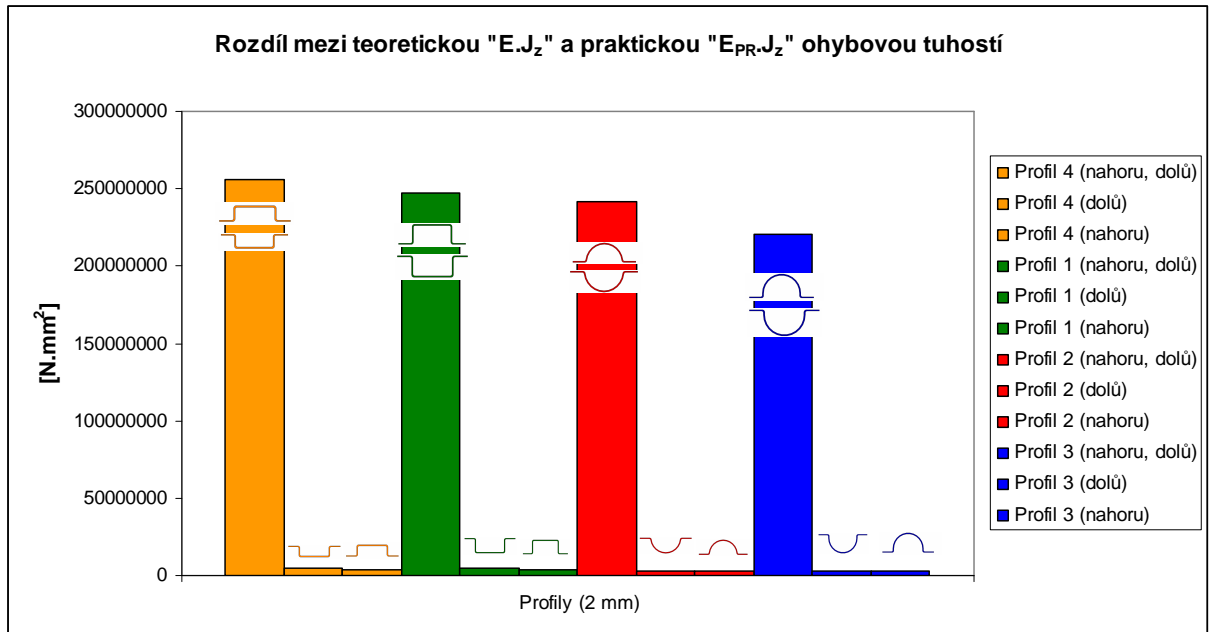
Profily	$\sigma_p \cdot W_o$	$\sigma_p \cdot W_o$	Rozdíl	Násobek
	2 [mm]	1 [mm]		
<b>Profil 4</b>	170690	86983	49	1,96
<b>Profil 1</b>	133497	67977	49	1,96
<b>Profil 2</b>	118508	64155	46	1,85
<b>Profil 3</b>	111020	61100	45	1,82

Tab. 67. Rozdíl  $\sigma_p \cdot W_o$  mezi profily 1 a 2 mm

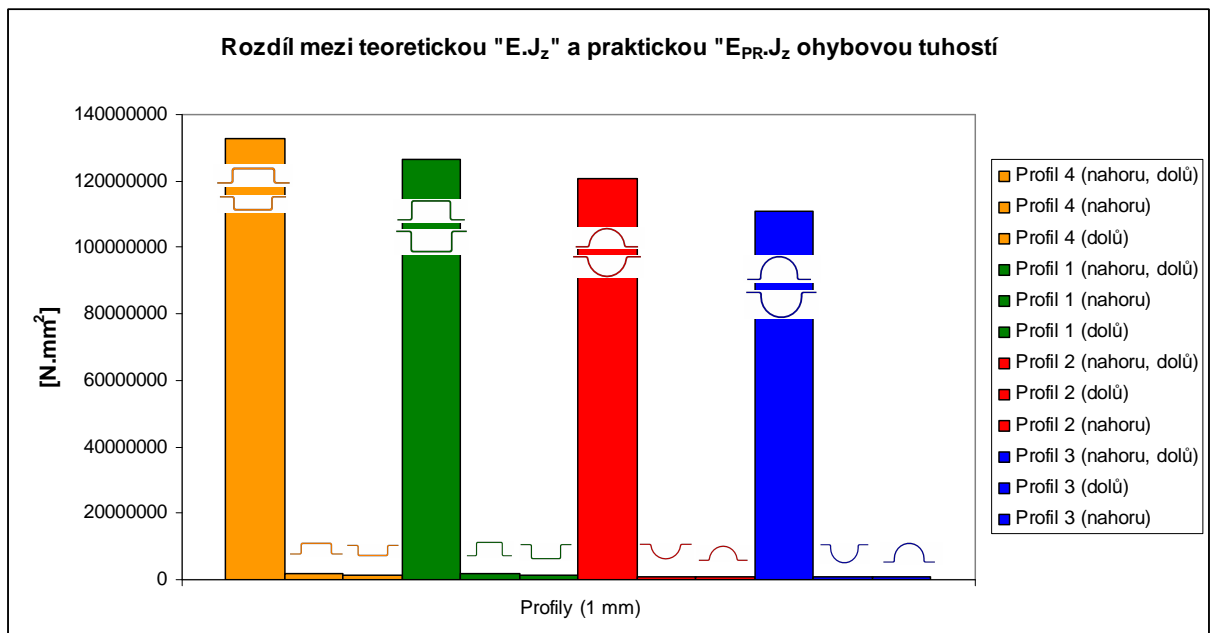
Dle tabulky (Tab.67) vidíme, že profily z tloušťky 2 mm se vyznačují podstatně větší ohybovou únosností než profily tloušťky 1 mm. Jejich procentuální rozdíl se pohybuje mezi 45-49 % a násobek mezi 1,82 – 1,96krát větší ve prospěch profilů tloušťky 2 mm.

## 15 GRAFICKÉ SROVNÁNÍ TEORETICKÉ A PRAKTICKÉ OHYBOVÉ TUHOSTI A OHYBOVÉ ÚNOSNOSTI

### 15.1 Teoretická a praktická ohybová tuhost

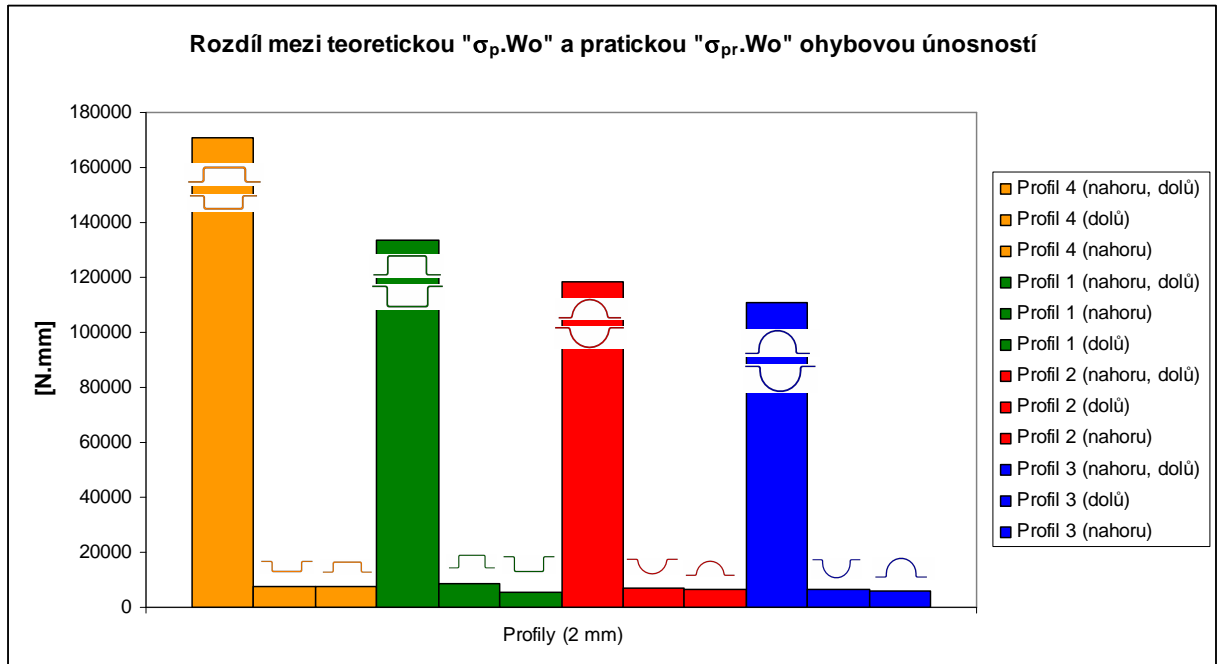


Obr. 137. Rozdíl mezi  $E \cdot J_z$  a  $E_{PR} \cdot J_z$  (2 mm)

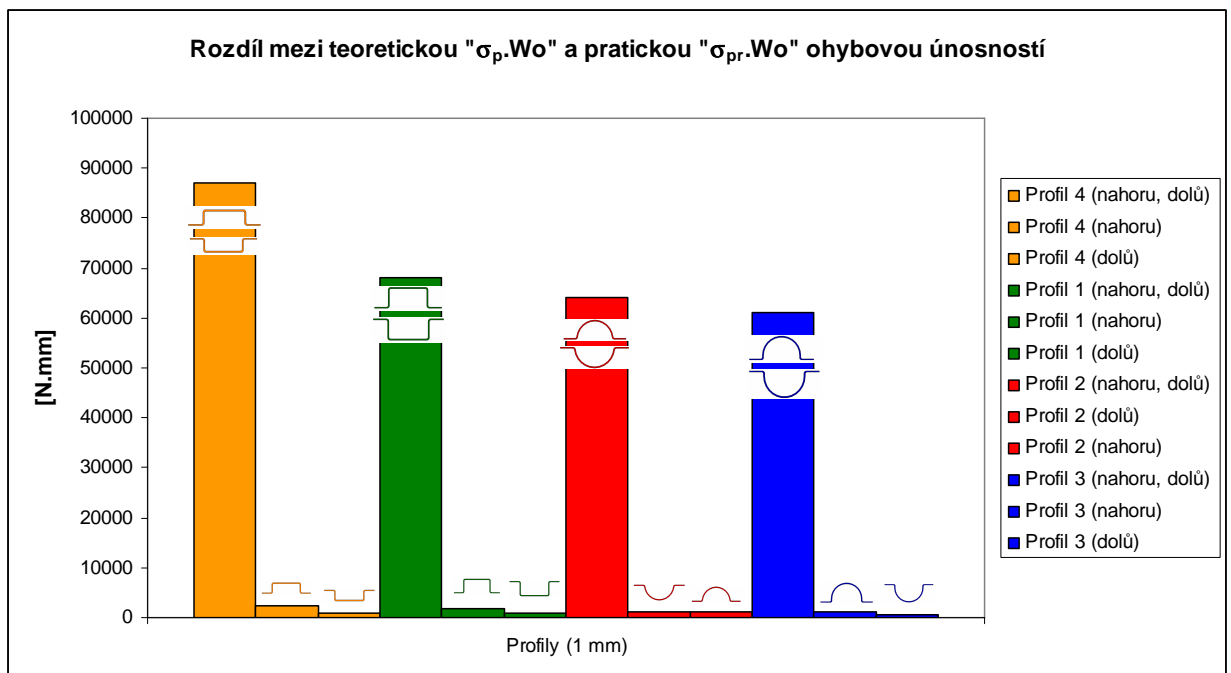


Obr. 138. Rozdíl mezi  $E \cdot J_z$  a  $E_{PR} \cdot J_z$  (1 mm)

### 15.2 Teoretická a praktická ohybová únosnost



Obr. 139. Rozdíl mezi  $\sigma_p \cdot W_o$  a  $\sigma_{pr} \cdot W_o$  (2 mm)

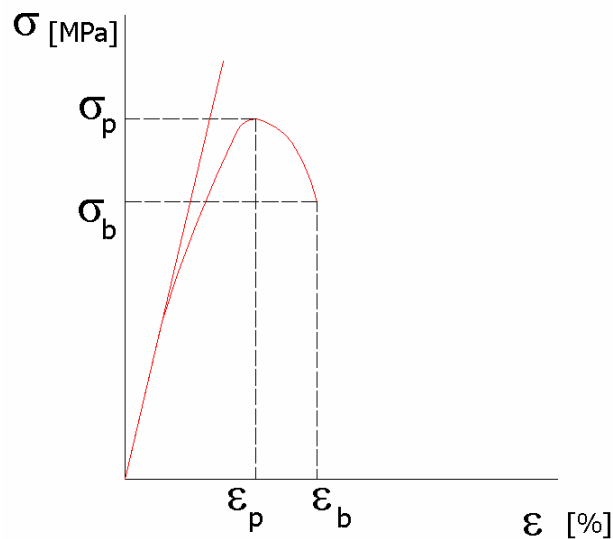


Obr. 140. Rozdíl mezi  $\sigma_p \cdot W_o$  a  $\sigma_{pr} \cdot W_o$  (1 mm)

Můžeme vidět, že jak hodnoty teoretické a praktické ohybové tuhosti, tak také hodnoty teoretické a praktické ohybové únosnosti se výrazně liší. Teoretická ohybová tuhost a teoretická ohybová únosnost nejsou závislé na otočení profilů (dnem nahoru, dnem dolů).

## 16 TAHOVÁ ZKOUŠKA PRO ZJISTĚNÍ MODULU PRUŽNOSTI MATERIÁLU

Pro zjištění modulu pružnosti  $E$  materiálu použitého na vytvarování profilů jsme provedli tahovou zkoušku z materiálu tloušťky 1 mm a z materiálu tloušťky 2 mm. Tyto hodnoty jsem následně porovnal a určili přibližný modul pružnosti použitého materiálu. Z ohybové zkoušky modul pružnosti nemohl být zjištěn kvůli nevyhovujícímu programu pro zadání geometrických charakteristik nutných pro správný výpočet modulu.



Obr. 141. Schéma vyhodnocených parametrů tahové zkoušky

**Základní vztahy tahové zkoušky:**

*Napětí při tahu:*

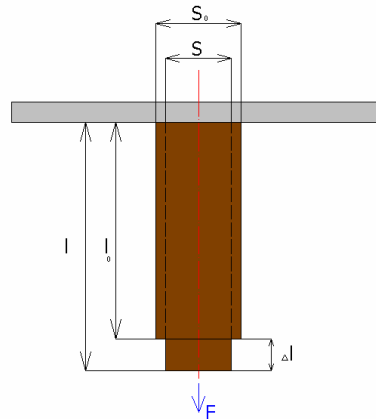
$$\sigma = \frac{F}{S_o} = \frac{F}{a.b} \text{ [MPa]} \quad (78)$$

*Poměrná deformace (prodloužení):*

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_o} = \frac{l - l_o}{l_o} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (79)$$

*Modul pružnosti:*

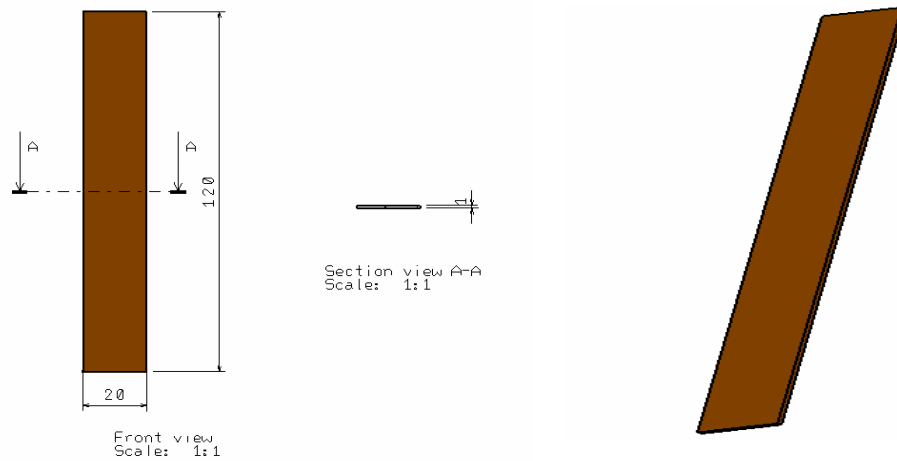
$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \text{ [MPa]} \quad (80)$$



Obr. 142. Schéma tahové zkoušky

## 16.1 Materiál PS (1 mm)

### 1. Rozměry zkušební tělesa

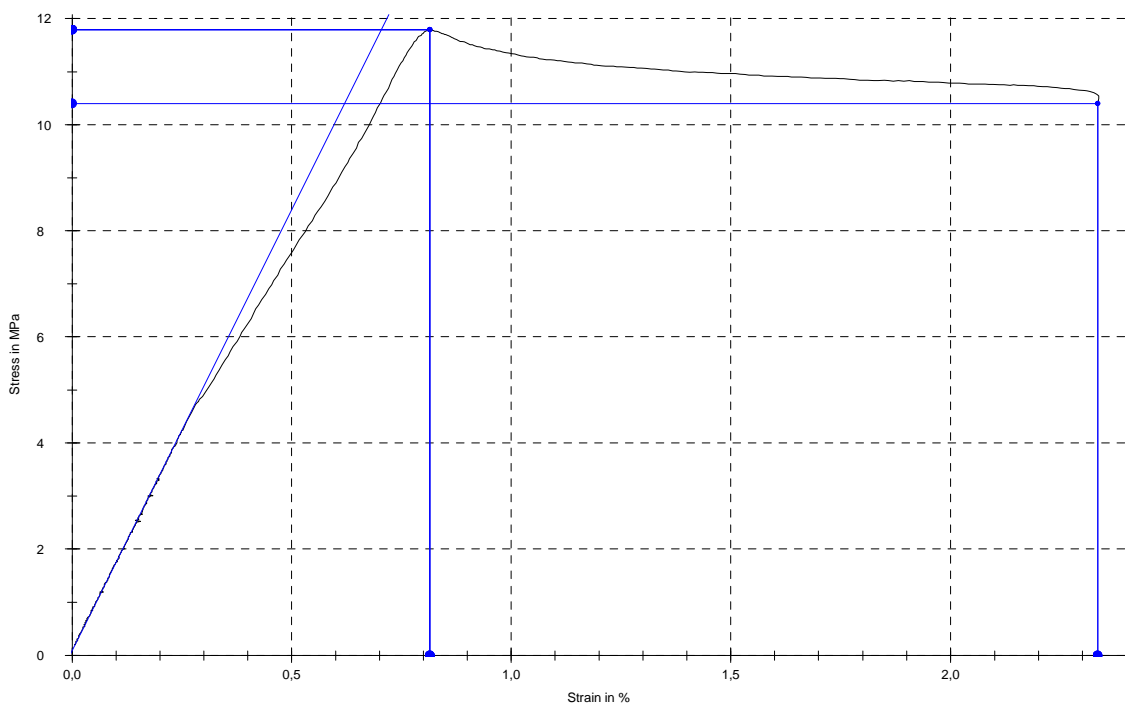


Obr. 143. Zkušební těleso tloušťky 1 mm

### 2. Naměřené a vypočtené hodnoty zkušební tělesa

1 mm	a	b	$\sigma_p$	$\sigma_b$	E	$\epsilon_p$	$\epsilon_b$
	[mm]	[mm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]
<b>1</b>	<b>1</b>	<b>20</b>	<b>11,79</b>	<b>10,4</b>	<b>1662,51</b>	<b>0,81</b>	<b>2,34</b>
2	1	20	11,2	6,62	1295,6	6,12	8,31
3	0,98	19,99	14,19	10,3	1844,32	0,79	0,91
4	0,98	19,99	14,07	10,44	1677,42	0,87	3,54
5	1,05	20,05	13,24	6,45	1669,1	0,79	0,3
6	1,05	20,05	13	10,42	1684,5	0,76	0,68
$\mu$	<b>1,01</b>	<b>20,01</b>	<b>12,92</b>	<b>9,10</b>	<b>1638,91</b>	<b>1,69</b>	<b>2,68</b>
$\sigma$	<b>0,03</b>	<b>0,03</b>	<b>1,21</b>	<b>1,99</b>	<b>181,71</b>	<b>2,17</b>	<b>3,01</b>
$s_e$	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,49</b>	<b>0,81</b>	<b>74,18</b>	<b>0,89</b>	<b>1,23</b>

Tab. 68. Tahová zkouška (1 mm)

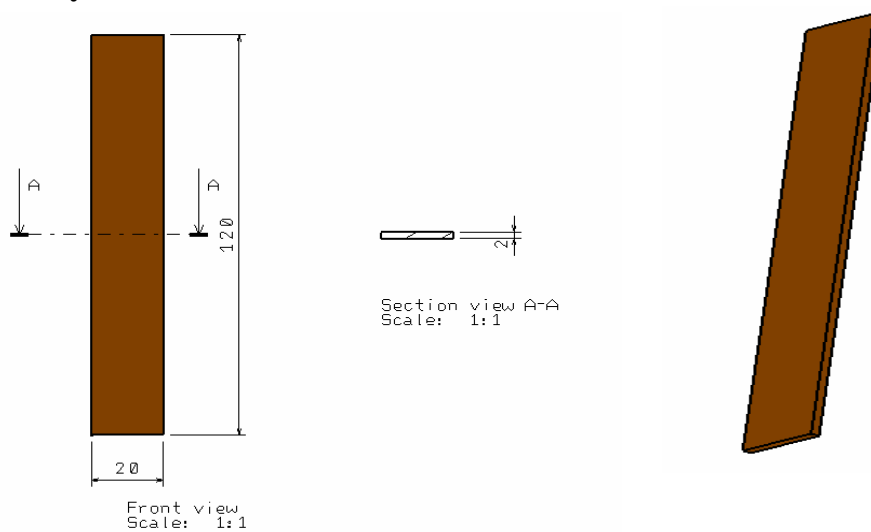


Obr. 144. Tahová zkouška ( 1mm)

Na obrázku (Obr.144) je graf jedné z tahové zkoušky materiálu tloušťky 1 mm, který odpovídá 1.měření, jak je v tabulce (Tab.68) naznačeno tučným písmem.

## 16.2 Materiál PS (2 mm)

### 1.Rozměry zkušební tělesa

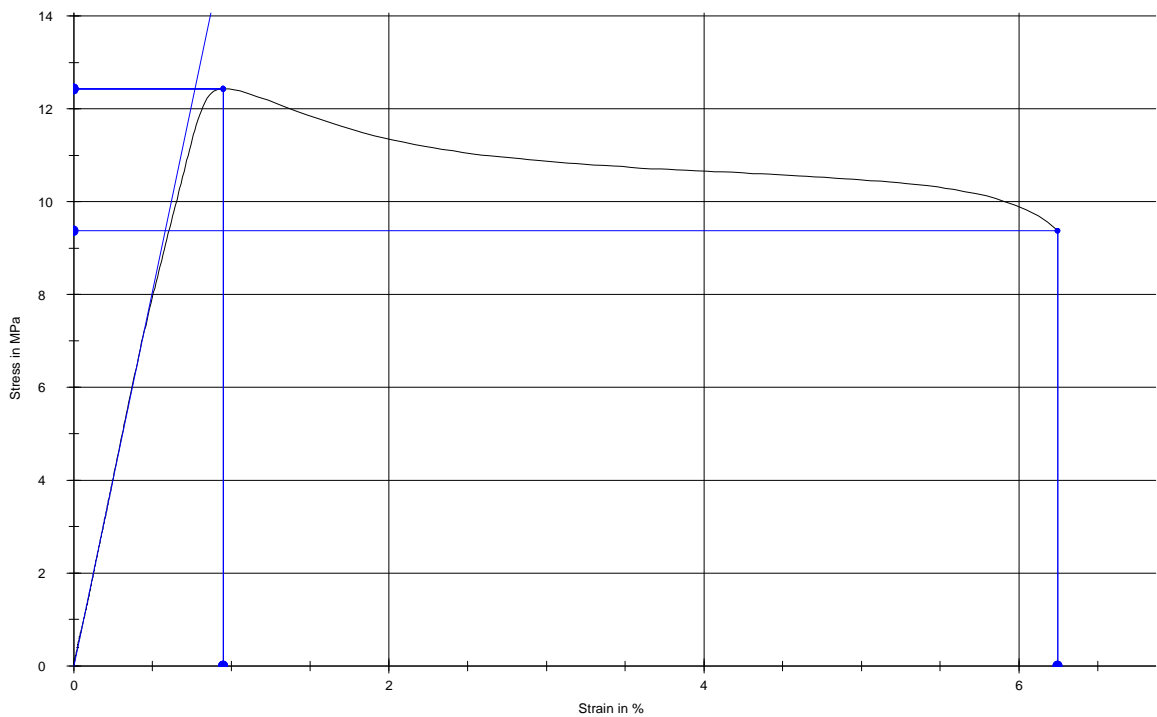


Obr. 145. Zkušební těleso tloušťky 2 mm

## 2. Naměřené a vypočtené hodnoty zkušební tělesa

2 mm	a	b	$\sigma_p$	$\sigma_b$	E	$\varepsilon_p$	$\varepsilon_b$
	[mm]	[mm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]
<b>1</b>	2,00	19,90	14,11	9,21	1686,36	1,74	3,44
<b>2</b>	1,95	19,90	13,76	9,49	1725,20	1,73	3,59
<b>3</b>	1,95	19,80	13,28	10,20	1712,37	0,78	0,63
<b>4</b>	<b>2,00</b>	<b>20,10</b>	<b>12,43</b>	<b>9,37</b>	<b>1616,06</b>	<b>0,95</b>	<b>6,25</b>
<b>5</b>	2,10	20,15	13,07	9,22	1544,91	0,84	0,64
<b>6</b>	2,00	20,00	12,88	9,32	1652,54	0,80	0,64
$\mu$	<b>2,00</b>	<b>19,98</b>	<b>13,26</b>	<b>9,47</b>	<b>1656,24</b>	<b>1,14</b>	<b>2,53</b>
$\sigma$	<b>0,05</b>	<b>0,13</b>	<b>0,61</b>	<b>0,37</b>	<b>67,58</b>	<b>0,46</b>	<b>2,30</b>
$s_e$	<b>0,02</b>	<b>0,05</b>	<b>0,25</b>	<b>0,15</b>	<b>27,59</b>	<b>0,19</b>	<b>0,94</b>

Tab. 69. Tahová zkouška (2 mm)



Obr. 146. Tahová zkouška (2 mm)

Na obrázku (Obr.146) je graf jedné z tahové zkoušky materiálu tloušťky 2 mm, který odpovídá 4.měření, jak je v tabulce (Tab.69) naznačeno tučným písmem.



### 16.3 Hodnota Modulu pružnosti „E“

Přibližnou hodnotu modulu pružnosti materiálu jsme tedy určili tak, že jsme spočítali aritmetický průměr ze všech spočtených modulů pružnosti měření tahových zkoušek programem Test Expert. Bylo provedeno 6 měření pro materiál tloušťky 1 mm a 6 měření pro materiál tloušťky 2 mm, jak je uvedeno v tabulkách (Tab.68) a (Tab.69). Celkově bylo tedy 12 tahových zkoušek.

V níže uvedené tabulce (Tab.70) můžeme vidět celkový výsledek modulu pružnosti z tahových zkoušek z materiálu tloušťek 1mm a 2 mm.

1 mm	E	2 mm	E	
	[MPa]		[MPa]	
<b>1</b>	1662,51	<b>1</b>	1686,36	
<b>2</b>	1295,6	<b>2</b>	1725,20	
<b>3</b>	1844,32	<b>3</b>	1712,37	<b>E</b>
<b>4</b>	1677,42	<b>4</b>	1616,06	<b>[MPa]</b>
<b>5</b>	1669,1	<b>5</b>	1544,91	<b>1648</b>
<b>6</b>	1684,5	<b>6</b>	1652,54	
<b><math>\mu</math></b>	<b>1639</b>	<b><math>\mu</math></b>	<b>1656</b>	
<b><math>\sigma</math></b>	<b>182</b>	<b><math>\sigma</math></b>	<b>68</b>	
<b><math>s_e</math></b>	<b>74,18</b>	<b><math>s_e</math></b>	<b>27,59</b>	

Tab. 70. Hodnota modulu pružnosti

Přibližná hodnota **modulu pružnosti  $E = 1648 \text{ MPa}$** .

Směrodatná odchylka ukazuje hodnotu **182** u zkušebního tělesa tloušťky 1 mm a hodnotu **68** u zkušebního tělesa tloušťky 2 mm, což ukazuje na to, že rozdíly mezi některými měřeními jsou poněkud vyšší. Tyto rozdíly mezi hodnotami mohou být zapříčiněny pravděpodobně nestejnými rozměry zkušebních těles, kvalitou materiálu (není zcela homogenní ve všech místech), popř. poruchami ve struktuře materiálu.

Je také zřejmé, že zkušební tělesa tloušťky 1 mm nejsou tak přesné a vykazují větší rozdíly mezi naměřenými hodnotami než zkušební tělesa tloušťky 2 mm.

Proto pro přesnější měření a přesnější určení modulu pružnosti by bylo zapotřebí podstatně většího množství zkušebních těles a pochopitelně také podstatně většího množství provedených tahových zkoušek.

## ZÁVĚR

V této diplomové práci jsme posuzovali vliv geometrie otevřených tenkostěnných plastových profilů na mechanické chování v ohybu.

Teoretická část se zabývá přehledem základních druhů plastových materiálů s možností jejich aplikací v technickém průmyslu. Jsou zde také uvedeny způsoby zpracování polymerních materiálů technologií tvarování. V následujících kapitolách jsou popsány mechanické vlastnosti polymerních materiálů, jejich navrhování z hlediska tuhosti a pevnosti a mechanická dvouosá napjatost tenkých desek a skořepin.

V praktické části byly nejdříve vyrobeny 4 typy tenkostěnných plastových profilů technologií podtlakového tvarování o tloušťce materiálu 1 mm a 2 mm. Každý typ profilu měl 12 zkušebních těles, z nichž 6 bylo ohýbáno dnem nahoru a 6 dnem dolů. Celkově tedy bylo provedeno 48 ohybových zkoušek pro dvoumilimetrové profily a 48 ohybových zkoušek pro jednomilimetrové profily. Z důvodů velké odlišnosti byly některé ohybové zkoušky vyřazeny (tzn. místo 6 ohybových zkoušek bylo započítáno do vyhodnocení pouze 5 ohybových zkoušek).

Z dvoumilimetrových profilů orientovaných dnem nahoru při ohybu dosáhl nejvyšší ohybové tuhosti **Profil 4**, následoval **Profil 1**, **Profil 2** a nejnižší ohybovou tuhost vykazal **Profil 3**.

Z dvoumilimetrových profilů orientovaných dnem nahoru při ohybu dosáhl nejvyšší ohybové únosnosti **Profil 1**, následoval **Profil 4**, **Profil 2** a nejnižší ohybovou únosnost vykázal **Profil 3**.

Při výpočtu teoretické ohybové tuhosti je pořadí následující: Nejvyšší ohybovou tuhost měl **Profil 1**, dále **Profil 3**, **Profil 4** a **Profil 2**.

Při výpočtu teoretické ohybové únosnosti zaznamenal nejvyšší ohybovou únosnost **Profil 4**, následoval **Profil 1**, **Profil 2** a nejnižší ohybovou únosnost měl **Profil 3**.

Na základě vypočtených hodnot jsme si všimli skutečnosti, že profily, jejichž poměr výšky  $h$  a vzdálenosti krajního vlákna  $e_{\max}$  je nejmenší, vykazují nejvyšší ohybovou tuhost. Je tedy zřejmé, že zde dochází vlivem geometrie k menšímu stlačování popř.roztahování materiálu.

Z dvoumilimetrových profilů orientovaných dnem dolů je v případě ohybové tuhosti, teoretické ohybové tuhosti a teoretické ohybové únosnosti seřazení profilů stejné. Liší se pouze číselnými hodnotami.

V případě ohybové únosnosti (praktické), má nejvyšší ohybovou únosnost **Profil 4**, dále **Profil 2**, **Profil 3** a nakonec **Profil 1**.

Profily orientované dnem dolů se vyznačují vyšší ohybovou únosností než profily orientované dnem nahoru, kromě **Profilu 1**, který má únosnost vyšší dnem nahoru (viz.str.104).

Profily orientované dnem dolů se vyznačují vyšší ohybovou tuhostí než profily orientované dnem nahoru (viz.str.102).

Profily, které mají „půlkruhovou“ geometrii (**Profil 2**, **Profil 3**), jsou méně tuhé než profily s geometrií ve tvaru „U“ (**Profil 1**, **Profil 4**). Tyto profily rychleji ztrácejí stabilitu a bortí se. Může to být způsobeno tím, že oproti „U“ profilům nemají svislou stěnu, ve které by vnitřní síly působily kolmo proti působícímu zatížení a tím by se pomaleji bortily jako je to právě u profilů ve tvaru „U“. Také to pravděpodobně souvisí s poměrem  $h/e_{\max}$ , který „půlkruhové“ profily mají vyšší než profily ve tvaru „U“, a proto se rychleji bortí. Jak jsme již ukázali, vyšší poměr  $h/e_{\max}$  způsoboval menší tuhost profilu.

Je také pravděpodobné, že pevnost (únosnost) **Profilu 1** a **Profilu 4** je vyšší než **Profilu 2** a **Profilu 3**, přestože nám v jednom případě vyšel **Profil 1** jako nejméně pevný, což bude asi způsobeno horší kvalitou vytvarovaných vzorků.

Z jednomilimetrových profilů orientovaných dnem nahoru při ohybu dosáhl nejvyšší ohybové tuhosti **Profil 4**, následoval **Profil 1**, **Profil 2** a nejnižší ohybovou tuhost vykazal **Profil 3**.

Z jednomilimetrových profilů orientovaných dnem nahoru při ohybu dosáhl nejvyšší ohybové únosnosti **Profil 4**, následoval **Profil 1**, **Profil 3** a nejnižší ohybovou únosnost vykázal **Profil 2**.

Při výpočtu teoretické ohybové tuhosti je pořadí následující: Nejvyšší ohybovou tuhost měl **Profil 1**, dále **Profil 3**, **Profil 4** a **Profil 2**.

Při výpočtu teoretické ohybové únosnosti zaznamenal nejvyšší ohybovou únosnost **Profil 4**, následoval **Profil 1**, **Profil 2** a nejnižší ohybovou únosnost měl **Profil 3**.

Na základě vypočtených hodnot se i tady, stejně jak u dvoumilimetrových profilů prokázala skutečnost, že profily, jejichž poměr výšky  $h$  a vzdálenosti krajního vlákna  $e_{\max}$  je nejmenší, vykazují nejvyšší ohybovou tuhost. Je tedy zřejmé, že zde dochází vlivem geometrie k menšímu stlačování popř. roztahování materiálu, stejně jak u dvoumilimetrových profilů.

Z jednomilimetrových profilů orientovaných dnem dolů je v případě ohybové tuhosti, teoretické ohybové tuhosti a teoretické ohybové únosnosti seřazení profilů stejné. Liší se pouze číselnými hodnotami.

V případě ohybové únosnosti (praktické) má nejvyšší ohybovou únosnost **Profil 2**, dále **Profil 1**, **Profil 4** a nakonec **Profil 3**.

Profily orientované dnem nahoru se vyznačují vyšší ohybovou únosností než profily orientované dnem dolů, kromě **Profilu 2**, který má únosnost vyšší dnem dolů (viz.str.125). Tyto výsledky se nejvíce liší od ostatních.

Profily orientované dnem dolů se z 50% vyznačují vyšší ohybovou tuhostí než profily orientované dnem nahoru (viz.str.123). Jsou to **Profil 2** a **Profil 3**.

**Profil 1** a **Profil 4** mají vyšší ohybovou tuhost s orientací dnem nahoru.

Zde výsledky nejsou jednoznačné, což může být způsobeno tím, že tloušťka profilů je příliš tenká. Je pravděpodobné, že dosažené výsledky ohybových zkoušek u profilů tloušťek 1 mm mohou být zkresleny.

V samotném závěru práce jsme porovnávali rozdíly výsledků ohybových zkoušek mezi profily jednomilimetrovými a dvoumilimetrovými.

Profily tloušťky 2 mm se vyznačovaly podstatně vyšší ohybovou tuhostí než profily o tloušťce 1 mm, ať už orientací dnem nahoru (viz str.129 – Tab.62) nebo dnem dolů (viz str.130 – Tab.63).

Profily tloušťky 2 mm se vyznačovaly podstatně vyšší ohybovou únosností než profily o tloušťce 1 mm, ať už orientací dnem nahoru (viz str.131 – Tab.64) nebo dnem dolů ( viz str.132 – Tab.65).

Profily s tloušťkou 2 mm se vyznačují vyššími hodnotami teoretické ohybové tuhosti (viz str.133 – Tab.66) a také vyššími hodnotami ohybové únosnosti (viz str.134 – Tab.67) v porovnání s profily tloušťky 1 mm.

Je zřejmé, že tloušťka stěny profilu má velký vliv na tuhost a pevnost profilu při ohybu.

Pro zjištění modulu pružnosti materiálu byla provedena tahová zkouška zkušebních těles o tloušťce 1 mm a tloušťce 2 mm. Z nich byla vypočtena průměrná hodnota modulu pružnosti.

Pro praktické účely bychom doporučovali profily tvaru „U“ tzn. **Profil 1** popř. **Profil 4**. Z těchto profilů bychom upřednostnili **Profil 4**.

Závěrem lze konstatovat, že cíl diplomové práce byl splněn, ale zároveň je nutné brát v úvahu, že provedených měření na jednotlivých typech profilů byl malý počet, tudíž některé výsledky mohou být zkresleny a lze je tak brát jako orientační.

Také bych rád zdůraznil, že téma diplomové práce bylo zajímavé a poučné. Velkým přínosem pro mě byla část praktická, ve které jsem získal další zkušenosti pro mou budoucí praxi.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] Šuba, O.,: Dimenzování navrhování výrobků z polymerů, UTB ve Zlíně, fakulta technologická Zlín, 2007 ISBN 978-80-7318-431-5
- [2] Šuba, O.,: Mechanické chování těles, UTB ve Zlíně, fakulta technologická Zlín, 2006 ISBN 80-7318-484-2
- [3] Šuba, O.,: Přednášky z předmětu Mechanika polymerů a kompozitů, 2008
- [4] 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)
- [5] 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)
- [6] Volek, F.,: Základy pružnosti a pevnosti, UTB ve Zlíně, fakulta technologická Zlín, 2002
- [7] Maňas, M., Staněk, M., Maňas, D.,: Výrobní stroje a zařízení II, UTB ve Zlíně, fakulta technologická Zlín, 2007, ISBN 978-80-7318-596-1
- [8] Zetík, F., Rulík, F.,: Bakalářská práce ( Vliv vyztužení okrajů otevřených tenkostěnných plastových profilů na mechanické chování v ohybu), UTB ve Zlíně, fakulta technologická Zlín, 2008,
- [9] Gottfried, W.Ehrenstein .,: Polymerní kompozitní materiály, Nakladatelství SCIENTIA, spol.s.r.o., Praha 5, 2009, ISBN 978-80-86960-29-6
- [10] Mleziva, J., Šňupárek, J.,: Polymery, Nakladatelství SOBOTÁLES, Brno, 2000, ISBN 80-85920-72-7
- [11] Kopačková, D., Záboj, T., Hartl, M.,: Potrubí z plastů, Nakladatelství INFORMATORIUM spol.s.r.o, Praha 4, 1999, ISBN 80-86073-43-2
- [12] Meduna, F.,: Polymery ( Plasty pro strojaře), dostupný z WWW.
- [13] Molliková, E.,: Polymery , PowerPoint prezentace, dostupná z WWW.

[14] Plasty a jejich vlastnosti, dostupný z WWW:

<http://www.ateam.zcu.cz/download/plasty.pdf>

[15] Stoklasa, K.,: Zpracovatelské inženýrství-I (Základy gumárenské a plastikářské technologie), UTB ve Zlíně, fakulta technologická Zlín, 2007

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

$E$	Modul pružnosti [ MPa]
$\sigma$	Napětí od zatížení [ MPa]
$\varepsilon$	Poměrné prodloužení [ %]
$\sigma_p$	Mez pevnosti daného materiálu [ MPa]
$\sigma_e$	Mez kluzu daného materiálu [ MPa]
$\sigma_d$	Mez pevnosti v tlaku daného materiálu [ MPa]
$\sigma_D$	Dovolené napětí daného materiálu [ MPa]
$k_{e,p}$	Koeficienty bezpečnosti pro daný druh materiálu
$A$	Tažnost [ %]
$M$	Ohybový moment [ N.mm]
$\varepsilon^T$	Poměrné prodloužení vlivem teploty (dilatace) [ %]
$\alpha$	Koeficient teplotní roztažnosti [ K <sup>-1</sup> ]
$\Delta T$	Rozdíl teplot (T <sub>o</sub> -T <sub>m</sub> ) [ °C]
$T_o$	Teplota okolí (20°) [ °C]
$T_m$	Teplota montážní (zvýšená teplota) [ °C]
$E_t(t)$	Creepový modul (modul tečení) [ MPa]
$E_R(t)$	Relaxační modul [ MPa]
$J_z$	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> ]
$k_t$	Poměrná ohybová tuhost
$k_p$	Poměrná ohybová únosnost
$J_o$	Kvadratický moment nevyztužené stěny [ mm <sup>4</sup> ]
$J$	Kvadratický moment vyztužené stěny [ mm <sup>4</sup> ]
$W_o$	Modul průřezu v ohybu nevyztužené stěny [ mm <sup>3</sup> ]
$W$	Modul průřezu v ohybu vyztužené stěny [ mm <sup>3</sup> ]
$s_{OT}$	Ekvivalentní tloušťka stěny vzhledem k tuhosti [ mm]
$s_{OP}$	Ekvivalentní tloušťka stěny vzhledem k únosnosti [ mm]
$\tau_{xy}$	Smykové napětí [ MPa]
$\nu$	Poissonovo číslo (kontrakce) [ 0,35-0,50]
$G$	Modul pružnosti ve smyku [ MPa]
$\gamma$	Smyková deformace (zkos pravého úhlu) [°]
[C]	Matice poddajnosti
[S]	Matice tuhosti
$E^{**}$	Válcový (cylindrický) modul pružnosti [ MPa]
$E^*$	Kulový (sférický) modul pružnosti [ MPa]
$\varepsilon_{i,j}$	Poměrná membránová deformace v daném směru [ %]
$\varepsilon_{i,j}^o$	Poměrná ohybová deformace v daném směru [ %]
$m_{x,z}$	Ohybový moment v daném směru [ N.mm]

---

$M_{\text{omax}}$	Maximální ohybový moment [ N.mm]
$y$	Průhyb nosníku ( profilu) [ mm]
$\sigma_{\text{omax}}$	Maximální ohybové napětí [ MPa]
$F_{\text{max}}$	Maximální síla při ohybu [ N]
$y_{F\text{max}}$	Průhyb profilu při maximální síle [ mm]
$W_{F\text{max}}$	Dosažená práce při maximální síle [ N.mm]
$y_E$	Elastická deformace (průhyb) [ mm]
$y_P$	Plastická deformace (průhyb) [ mm]
$E.J_z$	Teoretická ohybová tuhost [ N.mm <sup>2</sup> ]
$E_{PR}.J_z$	Ohybová tuhost [ N.mm <sup>2</sup> ]
$E_{PR}$	Tvarový modul pružnosti [ MPa]
$F$	Síla úměrná deformaci ( průhybu)
$e_{\text{max}}$	Vzdálenost nejkrajnějšího vlákna profilu [ mm]
$L$	Vzdálenost podpěr při ohybu [ mm]
$h$	Výška profilu [ mm]
$\sigma_b$	Napětí při porušení vzorku ( mez stříhu) [ MPa]
$\varepsilon_p$	Poměrná deformace zkušebního vzorku při mezi pevnosti [ %]
$\varepsilon_b$	Poměrná deformace zkušebního vzorku při mezi stříhu [ %]
$a$	Tloušťka zkušebního vzorku [ mm]
$b$	Délka zkušebního vzorku [ mm]
$S_o$	Počáteční průřez vzorku [ mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_{pr}$	Mez pevnosti tvaru profilu [ MPa]
$\sigma_{pr}.W_o$	Ohybová únosnost profilů [ N.mm]

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Příklady aplikace plastů z praxe .....</i>	17
<i>Obr. 2. Mechanické tvarování .....</i>	19
<i>Obr. 3. Tvarovací lis .....</i>	20
<i>Obr. 4. Tvarování fólií – cyklické .....</i>	20
<i>Obr. 5. Tvarování fólií - kontinuální.....</i>	21
<i>Obr. 6. Dvojitý podtlakový tvarovací stroj na desky .....</i>	22
<i>Obr. 7. Rotační tvarovací stroj .....</i>	22
<i>Obr. 8. Negativní pneumatické tvarování .....</i>	23
<i>Obr. 9. Pozitivní pneumatické tvarování .....</i>	24
<i>Obr. 10. Ukázky různých tvarovacích strojů .....</i>	26
<i>Obr. 11. Porovnání modulů pružnosti některých termoplastů.....</i>	27
<i>Obr. 12. Obecný tvar závislosti funkce <math>\sigma ( \varepsilon )</math>.....</i>	28
<i>Obr. 13. Diagram četnosti .....</i>	29
<i>Obr. 14. Pružně plastický stav .....</i>	30
<i>Obr. 15. Závislost meze pevnosti na teplotě .....</i>	31
<i>Obr. 16. Závislost modulů pružnosti na teplotě.....</i>	32
<i>Obr. 17. Závislost koeficientu teplotní roztažnosti .....</i>	32
<i>Obr. 18. Závislost kontrakce na teplotě.....</i>	32
<i>Obr. 19. Creepový modul.....</i>	33
<i>Obr. 20. Relaxační modul .....</i>	34
<i>Obr. 21. Hodnoty časových pevností (trubka z PP-H).....</i>	34
<i>Obr. 22. Lineární moment průřezu plochy .....</i>	35
<i>Obr. 23. Kvadratický moment průřezu obdélníka.....</i>	36
<i>Obr. 24. Kvadratický moment průřezu kruhu .....</i>	37
<i>Obr. 25. Kvadratický moment průřezu plochy k mimotěžišťové ose.....</i>	38
<i>Obr. 26. Deviační moment tělesa.....</i>	39
<i>Obr. 27. Jednoduchá stěna vs.sendvičová stěna.....</i>	41
<i>Obr. 28. 3D pohled na sendvičovou stěnu .....</i>	41
<i>Obr. 29. Jednostranné vyztužení žebry .....</i>	42
<i>Obr. 30. 3D pohled na žebrovanou desku.....</i>	42
<i>Obr. 31. 3D pohled na symetrickou plošnou výztuž.....</i>	42

<i>Obr. 32. Otevřené profily</i> .....	43
<i>Obr. 33. Plastové tenkostěnné hračky</i> .....	43
<i>Obr. 34. Hladká stěna a T-profil</i> .....	44
<i>Obr. 35. Diagramy ohybové tuhosti a únosnosti</i> .....	45
<i>Obr. 36. Rovinná napjatost</i> .....	46
<i>Obr. 37. Schéma normálových napjatostí</i> .....	47
<i>Obr. 38. Schéma smykové napjatosti</i> .....	49
<i>Obr. 39. Deska vyztužená žebry</i> .....	50
<i>Obr. 40. Membránová napjatost</i> .....	50
<i>Obr. 41. Čistý Kirchhoffův ohyb</i> .....	52
<i>Obr. 42. Nosník při ohybu do válcové plochy</i> .....	54
<i>Obr. 43. Dřevěná šablona ,vytvarovaná deska a plastový profil číslo 1</i> .....	59
<i>Obr. 44. Dřevěná šablona ,vytvarovaná deska a plastový profil číslo 2</i> .....	60
<i>Obr. 45. Dřevěná šablona ,vytvarovaná deska a plastový profil číslo 3</i> .....	60
<i>Obr. 46. Dřevěná šablona ,vytvarovaná deska a plastový profil číslo 4</i> .....	60
<i>Obr. 47. Pohled na tvarovací stroj Formech 300X z jeho horní a přední části</i> .....	61
<i>Obr. 48. Dřevěné šablony Profilu 1 a Profilu 2</i> .....	61
<i>Obr. 49. Dřevěné šablony Profilu 3 a Profilu 4</i> .....	61
<i>Obr. 50. Schéma 3-bodové ohybové zkoušky</i> .....	62
<i>Obr. 51. 3-bodový ohyb</i> .....	62
<i>Obr. 52. Schéma provedení ohybových zkoušek</i> .....	63
<i>Obr. 53. Délka profilu a schéma ohybu</i> .....	64
<i>Obr. 54. Zleva série 1 a série 2</i> .....	64
<i>Obr. 55. Rozměry profilu 1 (2 mm)</i> .....	65
<i>Obr. 56. Profil 1 (2mm) nahoru</i> .....	65
<i>Obr. 57. Profil 1 (2mm) dolů</i> .....	66
<i>Obr. 58. Rozměry profilu 1 (1 mm)</i> .....	67
<i>Obr. 59. Profil 1 (1mm) nahoru</i> .....	67
<i>Obr. 60. Profil 1 (1mm) dolů</i> .....	68
<i>Obr. 61. Délka profilu a schéma ohybu</i> .....	69
<i>Obr. 62. Zleva série 1 a série 2</i> .....	69
<i>Obr. 63. Rozměry profilu 2 ( 2 mm)</i> .....	70
<i>Obr. 64. Profil 2 (2mm) nahoru</i> .....	70

<i>Obr. 65. Profil 2 (2mm) dolů</i> .....	71
<i>Obr. 66. Rozměry profilu 2 (1mm)</i> .....	72
<i>Obr. 67. Profil 2 (1mm) nahoru</i> .....	72
<i>Obr. 68. Profil 2 (1mm) dolů</i> .....	73
<i>Obr. 69. Délka profilu a schéma ohybu</i> .....	74
<i>Obr. 70. Zleva série 1 a série 2</i> .....	74
<i>Obr. 71. Rozměry profilu 3 ( 2mm)</i> .....	75
<i>Obr. 72. Profil 3 (2mm) nahoru</i> .....	75
<i>Obr. 73. Profil 3 (2mm) dolů</i> .....	76
<i>Obr. 74. Rozměry profilu 3 ( 1mm)</i> .....	77
<i>Obr. 75. Profil 3 (1mm) nahoru</i> .....	77
<i>Obr. 76. Profil 3 (1mm) dolů</i> .....	78
<i>Obr. 77. Délka profilu a schéma ohybu</i> .....	79
<i>Obr. 78. Zleva série 1 a série 2</i> .....	79
<i>Obr. 79. Rozměry profilu 4 ( 2 mm)</i> .....	80
<i>Obr. 80. Profil 4 (2mm) nahoru</i> .....	80
<i>Obr. 81. Profil 4 (2mm) dolů</i> .....	81
<i>Obr. 82. Rozměry profilu 4 ( 1mm)</i> .....	82
<i>Obr. 83. Profil 4 (1mm) nahoru</i> .....	82
<i>Obr. 84. Profil 4 (1mm) dolů</i> .....	83
<i>Obr. 85. Ohyb Profilu 3 (1mm) na trhacím stroji Zwick</i> .....	84
<i>Obr. 86. Ohyb Profilu 1 (1mm) na trhacím stroji Zwick</i> .....	84
<i>Obr. 87. Program Test Expert a graf závislosti y na F</i> .....	84
<i>Obr. 88. Závislost „ y na F“</i> .....	85
<i>Obr. 89. Orientace profilů</i> .....	86
<i>Obr. 90. Rozdíl tvarových modulů profilů s orientací dnem nahoru (2 mm)</i> .....	88
<i>Obr. 91. Srovnání ohybové tuhosti profilů orientovaných dnem nahoru (2mm)</i> .....	89
<i>Obr. 92. Srovnání ohybových únosností profilů orientovaných dnem nahoru (2 mm)</i> .....	90
<i>Obr. 93. Poměrná ohybová tuhost profilů orientovaných dnem nahoru (2 mm)</i> .....	91
<i>Obr. 94. Poměrná ohybová únosnost profilů orientovaných dnem nahoru (2 mm)</i> .....	92
<i>Obr. 95. Vliv <math>h/e_{max}</math> na <math>E_{PR}\cdot J_z</math></i> .....	94
<i>Obr. 96. Rozdíl tvarových modulů profilů s orientací dnem nahoru (2 mm)</i> .....	95
<i>Obr. 97. Srovnání ohybové tuhosti profilů orientovaných dnem dolů (2 mm)</i> .....	96

<i>Obr. 98. Srovnání ohybové únosnosti profilů orientovaných dnem dolů (2 mm).....</i>	<i>97</i>
<i>Obr. 99. Poměrná ohybová tuhost profilů orientovaných dnem dolů (2 mm).....</i>	<i>98</i>
<i>Obr. 100. Poměrná ohybová únosnost profilů orientovaných dnem dolů (2 mm).....</i>	<i>99</i>
<i>Obr. 101. Vliv <math>h/e_{max}</math> na <math>E_{PR}\cdot J_z</math> profilů orientovaných dnem dolů (2 mm).....</i>	<i>101</i>
<i>Obr. 102. Srovnání <math>E_{PR}\cdot J_z</math> dnem nahoru a dnem dolů (2 mm).....</i>	<i>102</i>
<i>Obr. 103. Srovnání <math>E_{PR}\cdot J_z</math> dnem nahoru a dnem dolů (2 mm).....</i>	<i>102</i>
<i>Obr. 104. <math>E_{PR}\cdot J_z</math> od největší po nejmenší pro profily 2 mm.....</i>	<i>103</i>
<i>Obr. 105. Srovnání <math>E_{PR}\cdot J_z</math> (2 mm).....</i>	<i>103</i>
<i>Obr. 106. Srovnání <math>\sigma_{pr}\cdot W_o</math> dnem nahoru a dnem dolů pro profily tloušťky 2 mm.....</i>	<i>104</i>
<i>Obr. 107. Srovnání <math>\sigma_{pr}\cdot W_o</math> dnem nahoru a dnem dolů (2 mm).....</i>	<i>104</i>
<i>Obr. 108. <math>\sigma_{pr}\cdot W_o</math> od největší po nejmenší pro profily tloušťky 2 mm.....</i>	<i>105</i>
<i>Obr. 109. Srovnání <math>E\cdot J_z</math> orientovaných dnem nahoru a dnem dolů (2 mm).....</i>	<i>106</i>
<i>Obr. 110. Srovnání <math>\sigma_p\cdot W_o</math> profilů orientovaných dnem nahoru a dnem dolů (2 mm).....</i>	<i>107</i>
<i>Obr. 111. Rozdíl tvarových modulů profilů s orientací dnem nahoru (1mm).....</i>	<i>109</i>
<i>Obr. 112. Srovnání ohybové tuhosti profilů orientovaných dnem nahoru (1 mm).....</i>	<i>110</i>
<i>Obr. 113. Srovnání ohybové únosnosti profilů orientovaných dnem nahoru (1 mm).....</i>	<i>111</i>
<i>Obr. 114. Poměrná ohybová tuhost profilů orientovaných dnem nahoru (1 mm).....</i>	<i>112</i>
<i>Obr. 115. Poměrná ohybová únosnost profilů orientovaných dnem nahoru (1 mm).....</i>	<i>113</i>
<i>Obr. 116. Vliv <math>h/e_{max}</math> na <math>E_{PR}\cdot J_z</math> profilů orientovaných dnem nahoru (1 mm).....</i>	<i>115</i>
<i>Obr. 117. Rozdíl tvarových modulů profilů s orientací dnem dolů (1mm).....</i>	<i>116</i>
<i>Obr. 118. Srovnání ohybové tuhosti profilů orientovaných dnem dolů (1 mm).....</i>	<i>117</i>
<i>Obr. 119. Srovnání ohybové únosnosti profilů orientovaných dnem dolů (1 mm).....</i>	<i>118</i>
<i>Obr. 120. Poměrná ohybová tuhost profilů orientovaných dnem dolů (1 mm).....</i>	<i>119</i>
<i>Obr. 121. Poměrná ohybová únosnost profilů orientovaných dnem dolů (1 mm).....</i>	<i>120</i>
<i>Obr. 122. Vliv <math>h/e_{max}</math> na <math>E_{PR}\cdot J_z</math> profilů orientovaných dnem dolů (1 mm).....</i>	<i>122</i>
<i>Obr. 123. Srovnání <math>E_{PR}\cdot J_z</math> dnem nahoru a dnem dolů (1 mm).....</i>	<i>123</i>
<i>Obr. 124. Srovnání <math>E_{PR}\cdot J_z</math> dnem nahoru a dnem dolů (1 mm).....</i>	<i>123</i>
<i>Obr. 125. <math>E_{PR}\cdot J_z</math> od největší po nejmenší (1 mm).....</i>	<i>124</i>
<i>Obr. 126. Srovnání <math>E_{PR}\cdot J_z</math> (1 mm).....</i>	<i>124</i>
<i>Obr. 127. Srovnání <math>\sigma_{pr}\cdot W_o</math> dnem nahoru a dnem dolů pro profily tloušťky 1 mm.....</i>	<i>125</i>
<i>Obr. 128. <math>\sigma_{pr}\cdot W_o</math> od největší po nejmenší (1 mm).....</i>	<i>126</i>
<i>Obr. 129. Srovnání <math>E\cdot J_z</math> orientovaných dnem nahoru a dnem dolů (1 mm).....</i>	<i>127</i>
<i>Obr. 130. Srovnání <math>\sigma_p\cdot W_o</math> profilů orientovaných dnem nahoru a dnem dolů (1 mm).....</i>	<i>128</i>

<i>Obr. 131. Rozdíl <math>E_{PR} \cdot J_z</math> mezi profily 1 a 2 mm orientovaných dnem nahoru .....</i>	129
<i>Obr. 132. Rozdíl <math>E_{PR} \cdot J_z</math> mezi profily 1 a 2 mm orientovaných dnem dolů.....</i>	130
<i>Obr. 133. Rozdíl <math>\sigma_{pr} \cdot W_o</math> mezi profily tloušťky 1 a 2 mm orientovaných dnem nahoru .....</i>	131
<i>Obr. 134. Rozdíl <math>\sigma_{pr} \cdot W_o</math> mezi profily tloušťky 1 a 2 mm orientovaných dnem dolů.....</i>	132
<i>Obr. 135. Rozdíl <math>E \cdot J_z</math> mezi profily 1 a 2 mm.....</i>	133
<i>Obr. 136. Rozdíl <math>\sigma_p \cdot W_o</math> mezi profily 1 a 2 mm .....</i>	134
<i>Obr. 137. Rozdíl mezi <math>E \cdot J_z</math> a <math>E_{PR} \cdot J_z</math> (2 mm).....</i>	135
<i>Obr. 138. Rozdíl mezi <math>E \cdot J_z</math> a <math>E_{PR} \cdot J_z</math> (1 mm).....</i>	135
<i>Obr. 139. Rozdíl mezi <math>\sigma_p \cdot W_o</math> a <math>\sigma_{pr} \cdot W_o</math> (2 mm) .....</i>	136
<i>Obr. 140. Rozdíl mezi <math>\sigma_p \cdot W_o</math> a <math>\sigma_{pr} \cdot W_o</math> (1 mm) .....</i>	136
<i>Obr. 141. Schéma vyhodnocených parametrů tahové zkoušky .....</i>	137
<i>Obr. 142. Schéma tahové zkoušky.....</i>	138
<i>Obr. 143. Zkušební těleso tloušťky 1 mm.....</i>	138
<i>Obr. 144. Tahová zkouška ( 1mm).....</i>	139
<i>Obr. 145. Zkušební těleso tloušťky 2 mm.....</i>	139
<i>Obr. 146. Tahová zkouška ( 2mm).....</i>	140

## SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Naměřené hodnoty profilu 1 (2mm) nahoru</i> .....	65
<i>Tab. 2. Naměřené hodnoty profilu 1 (2mm) dolů</i> .....	66
<i>Tab. 3. Naměřené hodnoty profilu 1 (1mm) nahoru</i> .....	67
<i>Tab. 4. Naměřené hodnoty profilu 1 (1mm) dolů</i> .....	68
<i>Tab. 5. Naměřené hodnoty profilu 2 (2mm) nahoru</i> .....	70
<i>Tab. 6. Naměřené hodnoty profilu 2 (2mm) dolů</i> .....	71
<i>Tab. 7. Naměřené hodnoty profilu 2 (1mm) nahoru</i> .....	72
<i>Tab. 8. Naměřené hodnoty profilu 2 (1mm) dolů</i> .....	73
<i>Tab. 9. Naměřené hodnoty profilu 3 (2mm) nahoru</i> .....	75
<i>Tab. 10. Naměřené hodnoty profilu 3 (2mm) dolů</i> .....	76
<i>Tab. 11. Naměřené hodnoty profilu 3 (1mm) nahoru</i> .....	77
<i>Tab. 12. Naměřené hodnoty profilu 3 (1mm) dolů</i> .....	78
<i>Tab. 13. Naměřené hodnoty profilu 4 (2mm) nahoru</i> .....	80
<i>Tab. 14. Naměřené hodnoty profilu 4 (2mm) dolů</i> .....	81
<i>Tab. 15. Naměřené hodnoty profilu 4 (1mm) nahoru</i> .....	82
<i>Tab. 16. Naměřené hodnoty profilu 4 (1mm) dolů</i> .....	83
<i>Tab. 17. Vypočtené hodnoty profilů (2mm)</i> .....	87
<i>Tab. 18. Srovnání tvarových modulů profilů (2 mm)</i> .....	87
<i>Tab. 19. Srovnání tvarových modulů profilů s orientací dnem nahoru (2 mm)</i> .....	88
<i>Tab. 20. Rozdíly <math>E_{PR}</math> v % (2 mm, nahoru)</i> .....	88
<i>Tab. 21. Vliv <math>J_z</math> na <math>E_{PR} \cdot J_z</math> (2mm, nahoru)</i> .....	89
<i>Tab. 22. Ohybová únosnost (2mm, nahoru)</i> .....	90
<i>Tab. 23. Poměrná ohybová tuhost</i> .....	91
<i>Tab. 24. Poměrná ohybová únosnost profilu (2 mm, nahoru)</i> .....	92
<i>Tab. 25. Seřazení poměrů <math>h/e_{max}</math> (2mm)</i> .....	93
<i>Tab. 26. Vliv <math>h/e_{max}</math> na <math>E_{PR} \cdot J_z</math></i> .....	94
<i>Tab. 27. Srovnání tvarových modulů profilů s orientací dnem dolů (2 mm)</i> .....	95
<i>Tab. 28. Rozdíly <math>E_{PR}</math> v % (2 mm, dolů)</i> .....	95
<i>Tab. 29. Vliv <math>J_z</math> na <math>E_{PR} \cdot J_z</math> (2 mm, dolů)</i> .....	96
<i>Tab. 30. Ohybová únosnost profilů (2mm, dolů)</i> .....	97
<i>Tab. 31. Poměrná ohybová tuhost</i> .....	98



Tab. 32. Poměrná ohybová únosnost profilů (2 mm, dolů) .....	99
Tab. 33. Seřazení poměrů $h/e_{max}$ (2 mm).....	100
Tab. 34. Vliv $h/e_{max}$ na $E_{PR} \cdot J_z$ (2 mm, dolů) .....	101
Tab. 35. $E_{PR} \cdot J_z$ od největší po nejmenší (2 mm) .....	103
Tab. 36. $\sigma_{pr} \cdot W_o$ od největší po nejmenší (2 mm).....	105
Tab. 37. Srovnání $E \cdot J_z$ profilů (2 mm) .....	106
Tab. 38. Srovnání $\sigma_p \cdot W_o$ profilů (2 mm).....	107
Tab. 39. Vypočtené hodnoty profilů (1 mm) .....	108
Tab. 40. Srovnání tvarových modulů profilů (1mm).....	108
Tab. 41. Srovnání tvarových modulů profilů s orientací dnem nahoru (1 mm).....	109
Tab. 42. Rozdíl $E_{PR}$ v % (1 mm, nahoru) .....	109
Tab. 43. Vliv $J_z$ na $E_{PR} \cdot J_z$ (1mm, nahoru).....	110
Tab. 44. Ohybová únosnost (1 mm, nahoru).....	111
Tab. 45. Poměrná ohybová tuhost .....	112
Tab. 46. Poměrná ohybová únosnost (1 mm, nahoru).....	113
Tab. 47. Seřazení poměrů $h/e_{max}$ (1 mm).....	114
Tab. 48. Vliv $h/e_{max}$ na $E_{PR} \cdot J_z$ (1 mm, nahoru) .....	115
Tab. 49. Srovnání tvarových modulů profilů s orientací dnem dolů (1 mm).....	116
Tab. 50. Rozdíl $E_{PR}$ v % (1 mm, dolů).....	116
Tab. 51. Vliv $J_z$ na $E_{PR} \cdot J_z$ (1 mm, dolů) .....	117
Tab. 52. Ohybová únosnost profilů (1 mm, dolů) .....	118
Tab. 53. Poměrná ohybová tuhost (1 mm, dolů).....	119
Tab. 54. Poměrná ohybová únosnost (1 mm, dolů) .....	120
Tab. 55. Seřazení poměrů $h/e_{max}$ (1 mm).....	121
Tab. 56. Vliv $h/e_{max}$ na $E_{PR} \cdot J_z$ (1 mm, dolů).....	122
Tab. 57. $E_{PR} \cdot J_z$ od největší po nejmenší (1 mm) .....	124
Tab. 58. Srovnání $\sigma_{pr} \cdot W_o$ dnem nahoru a dnem dolů (1mm).....	125
Tab. 59. $\sigma_{pr} \cdot W_o$ od největší po nejmenší (1 mm).....	126
Tab. 60. Srovnání $E \cdot J_z$ profilů dnem nahoru a dolů (1 mm).....	127
Tab. 61. Srovnání $\sigma_p \cdot W_o$ profilů dnem nahoru a dolů (1 mm) .....	128
Tab. 62. Rozdíl $E_{PR} \cdot J_z$ mezi profily 1 a 2 mm (nahoru).....	129
Tab. 63. Rozdíl $E_{PR} \cdot J_z$ mezi profily 1 a 2 mm (dolů).....	130
Tab. 64. Rozdíl $\sigma_{pr} \cdot W_o$ mezi profily tloušťky 1 a 2 mm (nahoru) .....	131

---

Tab. 65. Rozdíl $\sigma_{pr} \cdot W_o$ mezi profily tloušťky 1 a 2 mm (dolů).....	132
Tab. 66. Rozdíl $E \cdot J_z$ mezi profily 1 a 2 mm.....	133
Tab. 67. Rozdíl $\sigma_p \cdot W_o$ mezi profily 1 a 2 mm.....	134
Tab. 68. Tahová zkouška (1 mm).....	138
Tab. 69. Tahová zkouška (2 mm).....	140
Tab. 70. Hodnota modulu pružnosti.....	141

## **SEZNAM PŘÍLOH**

**PŘÍLOHA P I : Ohyb tenkostěnných polymerních prvků (MS EXCEL - výpočty)**

