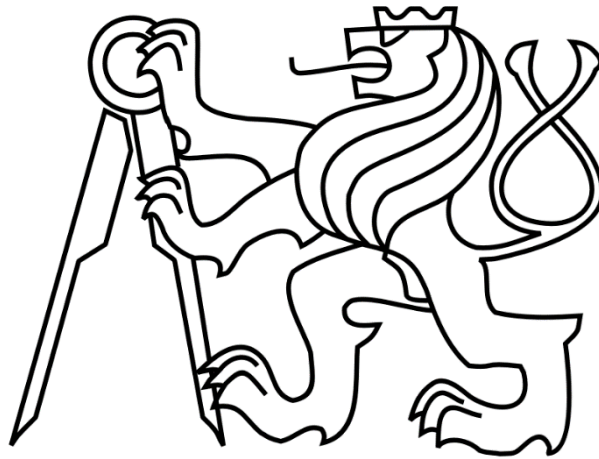


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



# Bakalářská práce

Měření tuhosti výstředníkového lisu LEN 25

2021

Petr Bělka

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Bělka** Jméno: **Petr** Osobní číslo: **482426**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav výrobních strojů a zařízení**  
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Měření tuhosti výstředníkového lisu LEN 25**

Název bakalářské práce anglicky:

**Measurement of static stiffness of the press LEN 25**

Pokyny pro vypracování:

Popis tématu: Jedná se o metodiku měření statické tuhosti mechanických malých a středních lisů. Měří se deformace při jmenovité síle a zjišťuje se vliv excentrického zatížení na velikost možné zatěžující síly. Cíl práce: Navrhnout vyhodnocovací algoritmus pro naměřená data deformací a zjistit vzhledem k jmenovité deformaci stroje velikost zatěžující síly a možné excentricity. Stručná osnova zadání: Navrhněte postup měření statické tuhosti pro lis LEN 25. Proveďte rešerši této problematiky se zaměřením na malé a střední lisy. Vyšetřete v ose tváření maximální deformaci při zatěžování jmenovitou silou 250 kN. Zjistěte vliv excentricity zatěžovací síly na její velikost vzhledem k ose tváření. Naměřené hodnoty zpracujte a navrhněte metodiku pro jejich vyhodnocení. Výsledky porovnejte s analytickým řešením. Rozsah textové části: 40-60 stran.

Seznam doporučené literatury:

RUDOLF, B.; KOPECKÝ, M. A KOL. Tvářecí stroje – Základy stavby a využití. 1.vydání. Praha: SNTL, 1985.  
Bach, P. ; a kol. Laboratorní cvičení z výrobních strojů, ČVUT v Praze, 1992.  
Bach, P. ; Urbánek, S., Testování výrobních strojů, ČVUT v Praze, 1992

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:


**Ing. Tomáš Krannich, Ph.D., ústav výrobních strojů a zařízení FS**


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

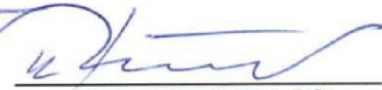
Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **25.07.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2021**

  
Ing. Tomáš Krannich, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

  
Ing. Matěj Sulitka, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

30.4.2021  
Datum převzetí zadání

Bělka  
Podpis studenta

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl v příloženém seznamu veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 23.7.2021



.....  
podpis

# **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu své bakalářské práce, Ing. Tomášovi Krannichovi, Ph.D., za ochotu a cenné rady během tvorby mé bakalářské práce.

## **Anotace**

Autor:	Petr Bělka
Název BP:	Měření tuhosti výstředníkového lisu LEN 25
Rozsah práce:	76 str., 61 obr., 6 tab.
Školní rok vyhotovení:	2021
Škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	Ú12135 – Ústav výrobních strojů a zařízení
Vedoucí bakalářské práce:	Ing. Tomáš Krannich, Ph.D.
Konzultant:	Ing. David Burian, Ph.D.
Zadavatel:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Využití:	Měření statické tuhosti mechanických lisů.
Klíčové slova:	Tuhost, měření statické tuhosti, výpočet tuhosti, deformace, tvářecí stroj, výstředníkový lis
Anotace:	Bakalářská práce se zabývá návrhem vhodného postupu měření statické tuhosti malých mechanických lisů a metodikou vyhodnocení získaných hodnot. Pro potřeby měření je inovována a částečně navržena příslušná aparatura. Z dat naměřených na konkrétním výstředníkovém lisu LEN 25 je určena jeho statická tuhost a sestrojen graf dovoleného excentrického zatěžování tohoto stroje.

## **Annotation**

Author:	Petr Bělka
Title of bachelor dissertation:	Measurement of static stiffness of the press LEN 25
Extent:	76 p., 61 fig., 6 tab.
Academic year:	2021
University:	CTU in Prague – Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Ú12135 – Department of Production Machines and Equipment
Supervisor:	Ing. Tomáš Krannich, Ph.D.
Consultant:	Ing. David Burian, Ph.D.
Submitter of the Theme:	CTU – Faculty of Mechanical Engineering
Application:	Measurement of static stiffness of mechanical presses
Key words:	Stiffness, measurement of static stiffness, calculation of stiffness, deformation, forming machine, eccentric press
Annotation:	The bachelor thesis deals with the suggestion of an appropriate method for measurement of static stiffness of small mechanical presses and with the method of evaluation of the obtained results. The relevant apparatus is innovated and partially designed for measurement purposes. From the data measured on the eccentric press LEN 25, its static stiffness is determined and the graph of permitted loading is constructed.

# Obsah

Obsah .....	7
Přehled použitých veličin a jednotek .....	9
1 Úvod.....	11
2 Cíl práce.....	12
3 Tuhost.....	13
3.1 Tuhost mechanických lisů .....	14
4 Možnosti zjištění deformace .....	20
4.1 Analytická metoda.....	20
4.2 Metoda konečných prvků .....	22
4.3 Měření .....	24
5 Navržené metody měření .....	28
5.1 Původní varianta.....	30
5.2 2. varianta .....	32
5.3 3. a 4. varianta .....	34
6 Způsob vyhodnocení měření.....	36
6.1 Algoritmus pro zpracování hodnot - pracovní prostor .....	36
6.2 Algoritmus pro zpracování hodnot - rám .....	39
7 Měřicí aparatura .....	42
7.1 Aparatura pro přívod tlaku .....	42
7.2 Aparatura pro excentrický posuv .....	45
8 Analytický výpočet lisu LEN 25.....	48
9 Výsledky měření .....	52
9.1 Měření deformace pracovního prostoru .....	53
9.1.1 1. varianta.....	53

---

9.1.2 2. varianta.....	55
9.1.3 3. varianta.....	57
9.1.4 4. varianta.....	58
9.1.5 Porovnání vybraných variant .....	60
9.2 Měření deformace horní části rámu .....	61
9.3 Měření deformace stolu.....	62
9.4 Měření dovolené síly při excentrickém zatěžování.....	66
10 Závěr .....	70
Seznamy.....	72



## Přehled použitých veličin a jednotek

a	[mm]	vzdálenost měřicích sond od hrany beranu v ose x
a <sub>s</sub>	[mm]	vzdálenost měřicích sond od hrany stolu v ose x
a <sub>1-4</sub>	[mm]	rozměry průřezu stojanu
b	[mm]	vzdálenost měřicích sond od hrany beranu v ose y
b <sub>s</sub>	[mm]	vzdálenost měřicích sond od hrany stolu v ose y
b <sub>1-4</sub>	[mm]	rozměry průřezu stojanu
c <sub>c</sub>	[ $\sqrt{MN}/\text{mm}$ ]	konstanta tuhosti
E	[Pa]	modul pružnosti v tahu
F	[N]	zátěžná síla
F <sub>0</sub>	[mm]	počáteční síla, od které byly měřeny deformace
F <sub>j</sub>	[mm]	jmenovitá síla stroje
h	[mm]	y-ový rozměr rámu
J	[mm <sup>4</sup> ]	kvadratický moment průřezu stojiny
k	[N/m]	tuhost v posunutí
k <sub>c</sub>	[N/m]	celková tuhost pracovního prostoru
k <sub>n</sub>	[Nm/rad]	tuhost v natočení
k <sub>m</sub>	[N/m]	tuhost mechanismu
k <sub>r</sub>	[N/m]	tuhost rámu
k <sub>rh</sub>	[N/m]	tuhost horní části rámu
k <sub>rs</sub>	[N/m]	tuhost spodní části rámu
l	[mm]	výška stojiny
M	[Nm]	moment síly
m	[mm]	vzdálenost okraje rámu od osy těžiště
S	[mm <sup>2</sup> ]	plocha průřezu stojiny rámu
X	[mm]	x-ový rozměr beranu
X <sub>s</sub>	[mm]	x-ový rozměr stolu
X <sub>r</sub>	[mm]	x-ový rozměr horní části rámu

$y$	[ $\mu\text{m}$ ]	deformace
$\Delta y_{50}$	[ $\mu\text{m}$ ]	deformace při síle 50 kN
$\Delta y_{250}$	[ $\mu\text{m}$ ]	deformace při jmenovité síle 250 kN
$\Delta y_B$	[ $\mu\text{m}$ ]	deformace uprostřed beranu
$\Delta y_i$	[ $\mu\text{m}$ ]	deformace naměřené úchylkoměry
$\Delta y_{i(50)}$	[ $\mu\text{m}$ ]	deformace naměřená úchylkoměry při síle 50 kN
$\Delta y_{i(250)}$	[ $\mu\text{m}$ ]	deformace naměřená úchylkoměry při jmenovité síle 250 kN
$\Delta y_j$	[ $\mu\text{m}$ ]	jmenovitá deformace
$\Delta y_L$	[ $\mu\text{m}$ ]	deformace levé strany beranu
$\Delta y_{Lrh}$	[ $\mu\text{m}$ ]	deformace levé strany horní části rámu
$\Delta y_P$	[ $\mu\text{m}$ ]	deformace pravé strany beranu
$\Delta y_{Prh}$	[ $\mu\text{m}$ ]	deformace pravé strany horní části rámu
$\Delta y_p$	[ $\mu\text{m}$ ]	deformace přední části beranu
$\Delta y_{ps}$	[ $\mu\text{m}$ ]	deformace přední části stolu
$\Delta y_r$	[ $\mu\text{m}$ ]	deformace rámu
$\Delta y_{rh}$	[ $\mu\text{m}$ ]	deformace horní části rámu
$\Delta y_{rs}$	[ $\mu\text{m}$ ]	deformace spodní části rámu
$\Delta y_z$	[ $\mu\text{m}$ ]	deformace zadní části beranu
$\Delta y_{zs}$	[ $\mu\text{m}$ ]	deformace zadní části stolu
$Y$	[mm]	y-ový rozměr beranu
$Y_s$	[mm]	y-ový rozměr stolu
$\gamma$	[rad]	úhel rozevření
$\delta$	[m/N]	poddajnost
$\delta_{rs}$	[ $^\circ$ ]	úhel natočení stolu lisu
$\xi$	[1]	součinitel tvaru stojanu
$\rho$	[mm]	zakřivení neutrální osy
$\sigma_{1,2}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	ohybové tuhosti
$\sigma_t$	[N/mm <sup>2</sup> ]	napětí v tahu

# 1 Úvod

Tato práce se zabývá metodikou měření statické tuhosti malých a středních mechanických lisů. Hodnota tuhosti se určuje ze závislosti zatěžující síly působící na lis a deformace, kterou tato síla vyvolá. Kromě toho se zjišťuje také vliv excentrického zatížení na velikost dovolené zátěžné síly.

Je třeba zjistit, zda je k získání přesných výsledků dostačující použití stávajících postupů, případně, zda je nutné tyto metody zdokonalit, nebo naopak, zda je možné je v nějakém smyslu zjednodušit. Nejprve je tedy provedeno shrnutí současných způsobů zjišťování tuhosti mechanických lisů a následně je navrženo několik nových variant měření.

K samotnému měření je zapotřebí zvláštní aparatura, skládající se z několika částí – přípravek pro vyvození síly a přípravek pro excentrický posuv, soustava úchylkoměrů, hydraulický obvod pro přívod tlaku. Pro zpřesnění a zefektivnění měření jsou některé prvky této aparatury inovovány, případně navrženy ve zcela novém provedení.

Samotné měření podle zvolených variant je provedeno na výstředníkovém lisu LEN 25. Jelikož vyhodnocení získaných dat může být při komplexnějším měření poněkud zdouhavé, je za tímto účelem navržen výpočtový program použitelný univerzálně pro jakýkoliv z vybraných postupů. Pro úplnost je proveden také analytický výpočet tuhosti daného lisu.

Porovnání výsledků pro každou použitou metodu umožní provést zhodnocení, jakým způsobem je vhodné určovat tuhost lisu LEN 25 a lisů jemu podobných. Poslední výstup v podobě grafu dovoleného zatěžování slouží k posouzení odolnosti lisu proti excentrickému zatěžování, tedy do jaké vzdálenosti od osy je možné stroj zatěžovat jeho jmenovitou silou, aniž by vzniklo riziko poškození vlivem přetížení.

## 2 Cíl práce

Cílem této práce je návrh optimální metodiky měření a vyhodnocení statické tuhosti malých a středních mechanických lisů. Měření je provedeno na výstředníkovém lisu LEN 25 se jmenovitou silou  $F_j = 250$  kN. Pro tento lis je také sestrojen graf dovoleného excentrického zatěžování.

Zadání práce lze rozdělit do několika dílčích úkolů:

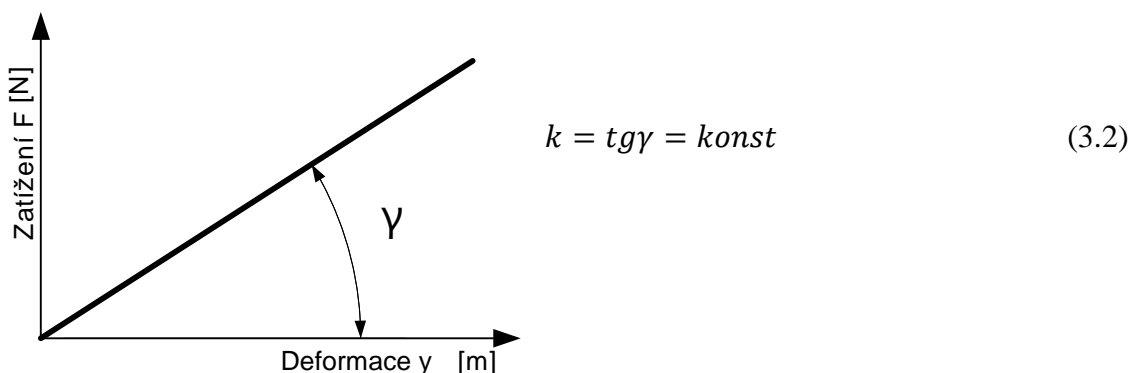
1. Nastudovat problematiku tuhosti a provést rešerši
2. Modifikovat metodiku měření dle zjištěných poznatků
3. Vytvořit algoritmus pro vyhodnocení výsledků měření
4. Sestavit měřicí aparaturu a provést její inovace
5. Provést analytický výpočet tuhosti lisu LEN 25 pro porovnání
6. Provést měření tuhosti výstředníkového lisu LEN 25
7. Provést měření při excentrickém zatěžování
8. Porovnat získané výsledky, provést jejich zhodnocení a sepsat závěr

### 3 Tuhost

[3, 5] Tuhost lze obecně definovat jako schopnost tělesa odolávat pružné deformaci způsobené vnějším silovým zatížením. Matematicky ji lze vyjádřit jako poměr zátěžné síly  $F$  působící na dané těleso a příslušné deformace  $y$  vyvolané touto silou ve směru jejího působení.

$$k = \frac{F}{y} [N \cdot m^{-1}] \quad (3.1)$$

Pokud se pohybujeme v oblasti pružných deformací (a tedy platí Hookův zákon), je tato závislost lineární a tuhost součásti se při změně velikosti zatěžující síly nemění, zůstává konstantní. Vzhledem k této skutečnosti lze pak tuhost vyjádřit také čistě z geometrie zatěžovacího grafu – jako tangens úhlu, který svírá charakteristika statické tuhosti s osou deformace (obrázek 3.1).



Obrázek 3.1: Závislost zatížení a deformace [5]

V teoretickém případě, kdy se neuvažuje např. vymezení vůlí u strojů, vychází tato závislost z počátku souřadného systému. Převrácená hodnota tuhosti se nazývá poddajnost - vyjadřuje schopnost tělesa měnit tvar pod vlivem sil, značí se  $\delta$ .

Tuhost je možné dělit podle několika kritérií. V závislosti na druhu zatížení rozdělujeme tuhost v posunutí, popsanou již zmíněným vztahem (3.1), a tuhost v natočení, kterou lze vyjádřit jako:

$$k_n = \frac{M}{\varphi} [N \cdot m \cdot \text{rad}^{-1}] \quad (3.3)$$

Kde  $M$  [Nm] je zátěžný moment a  $\varphi$  [rad] je velikost odpovídající deformace, vzniklé od tohoto momentu v jeho působišti.

Jiné dělení rozlišuje ještě např. tuhost v tahu/tlaku, ohybu a krutu.

V případě, že se zabýváme určováním tuhosti nějakého složitějšího mechanismu (v této práci tvářecího stroje), jedná se vždy o určitou kombinaci tuhostí jeho součástí. Rozeznáváme tedy tuhosti dílčí a tuhost celkovou. Pro určení celkové tuhosti je vždy nutné vytvořit výpočtový model, kde jsou jednotlivé části nebo konstrukční celky daného zařízení nahrazeny pružinami, řazenými buď sériově, nebo paralelně. Celková tuhost se pak stanoví na základě pravidel pro sčítání dílčích tuhostí pružin:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{k_1} + \dots + \frac{1}{k_n} = \sum \frac{1}{k_i} \quad - \text{ pro sériově řazené pružiny} \quad (3.4)$$

$$k = k_1 + \dots + k_n = \sum k_i \quad - \text{ pro paralelně řazené pružiny} \quad (3.5)$$

Dále je nezbytné uvažovat, k čemu je příslušná deformace součásti vztažena. Pokud je deformace měřena vzhledem k nezávislému rámu, jedná se o tuhost absolutní. Je-li naopak měřena vzhledem k jiné části stejného zařízení, jde o tuhost relativní.

Posledním kritériem je způsob zatěžování, zde je možné rozlišovat tuhost statickou a dynamickou. V této práci, zaměřené na tvářecí stroje, se budu zabývat pouze tuhostí statickou.

### 3.1 Tuhost mechanických lisů

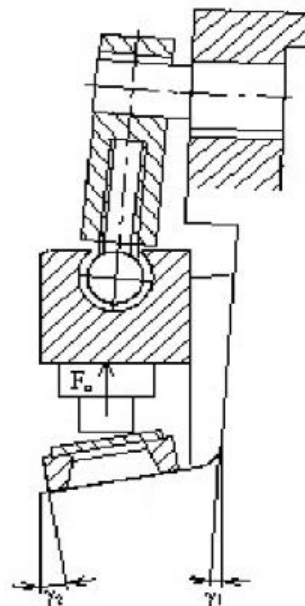
[1, 2, 3, 4, 5, 11, 12] Výše uvedené teoretické poznatky o tuhosti lze pochopitelně uplatnit i pro skupinu tvářecích strojů (tedy i mechanických lisů), neboť i tato zařízení a jejich součásti podléhají při své činnosti větším či menším pružným deformacím. Obecně platí požadavek, aby tuhost tvářecího stroje byla co nejvyšší, neboť nízká tuhost má negativní vliv na přesnost tvářecí operace, zvyšuje opotřebení tvářecích nástrojů i jednotlivých částí lisu a také snižuje účinnost tváření. U málo tuhých strojů může snadno nastat příčení pohyblivých součástí, což má za následek vznik polosuchého až suchého tření mezi jejich plochami, tím se zvětšuje hodnota součinitele tření a vznikají větší energetické ztráty. Přílišná poddajnost také způsobuje prodloužení relativní dráhy výstupního nástroje o deformaci pracovního prostoru, čímž roste ztrátová práce.

Tuhost stroje je možné ovlivnit několika způsoby. V první řadě je to volba vhodného materiálu pro dílčí komponenty stroje. Zde je třeba přihlídnout k materiálovým konstantám, především modulu pružnosti v tahu  $E$  (poměr napětí a jím vyvolané deformace) a Poissonově číslu  $\mu$  (poměr relativního prodloužení namáhané součásti k jejímu relativnímu příčnému zkrácení). Dále je nutné zohlednit některé další veličiny, jako např. mez pevnosti, kluzu a únavy, měrná hmotnost materiálu nebo součinitel teplotní roztažnosti. Svou roli ve výběru však hraje samozřejmě i cena daného materiálu.

Nezanedbatelný vliv na celkovou tuhost stroje má také geometrie jednotlivých součástí, tedy jejich vhodnost k namáhání daným způsobem, jejich uložení v rámci zařízení a také celkové konstrukční řešení stroje – zde je velmi důležité, jestli se jedná o pracovní prostor typu O (uzavřený) nebo typu C (otevřený). Z praxe je známo, že životnost nástrojů při práci na lisech s otevřeným stojanem je přibližně poloviční oproti práci na lisech se stojanem uzavřeným.

I u tvářecích strojů lze zjišťovat buď tuhost celkovou – nazývanou dále jako tuhost pracovního prostoru, nebo se zaměřit na dílčí tuhosti jednotlivých součástí. Jelikož by bylo značně složité zabývat se každým dílem zvlášť, používá se většinou zjednodušené rozdělení stroje na menší počet konstrukčních celků. Pokud se tedy nepotřebujeme přímo zaměřit na určitou součást, postačí uvažovat tuhost pracovního prostoru jako součet tuhosti rámu a tuhosti mechanismu.

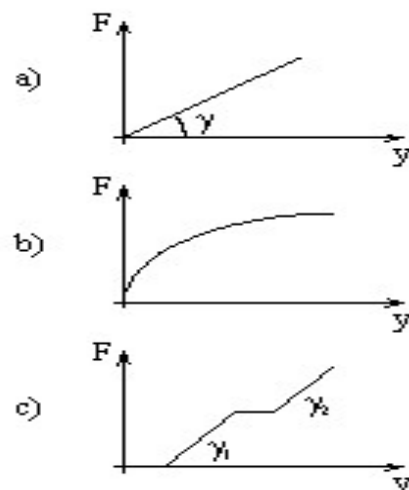
Právě tuhost pracovního prostoru má hlavní vypovídající hodnotu o dovoleném zatěžování stroje. Nejde přitom jen o deformaci v posunutí, projevuje se zde také deformace úhlová, která, především u strojů typu C, způsobuje porušení rovnoběžnosti upínacích ploch (obr. 3.2).



Obrázek 3.2: Natočení upínacích ploch stroje [4]

Jelikož stroj v reálném provozu se od teoretického liší, nemusí ani výsledná charakteristika tuhosti jeho pracovního prostoru vždy zcela odpovídat předpokladu o linearitě.

Na obrázku 3.3 a) je ideální případ, kdy je pracovní prostor dokonale pružný a závislost síly na deformaci je tedy čistě přímková. Obrázek b) popisuje situaci, kdy některé části stroje nesplňují Hookův zákon a vnášejí tak do grafu nelinearitu. Případ c) ukazuje vliv vůlí pohybového mechanismu. Vymezování těchto vůlí způsobuje nespojitý průběh charakteristiky.



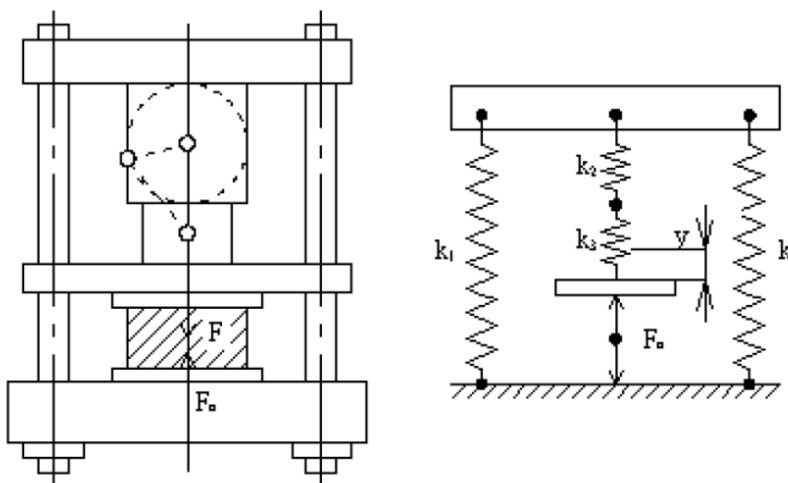
Obrázek 3.3: Příklad charakteristik tuhosti [4]

Jak už bylo řečeno, celková tuhost pracovního prostoru se ve zjednodušeném modelu skládá z dílčích tuhostí rámu a mechanismu.

Platí, že tuhost rámu by měla být větší než tuhost mechanismu a měla by být nezávislá na čase. I při dlouhodobém používání lisu by tedy její hodnota měla zůstat stále stejná.

Naproti tomu tuhost mechanismu v čase postupně klesá, neboť při provozu stroje postupně dochází k opotřebení mechanismu, zvětšování vůlí atd. Měření této tuhosti je značně obtížné, jelikož mechanismus lisu tvoří mnoho dílčích součástí. Proto je nejvýhodnější ji dopočítávat z tuhosti rámu a pracovního prostoru podle dříve uvedené metody, kdy se jednotlivé části stroje nahradí pružinami.

Postup tohoto výpočtu je zde ukázán na obecném mechanickém lisu, jehož výpočtový model je znázorněn na obrázku 3.4.



Obrázek 3.4: Výpočtový model mechanického lisu [4]



Kde  $k_1$  a  $k_4$  představují tuhosti sloupů lisu, celkovou tuhost rámu lze tedy vyjádřit jako:

$$k_r = k_1 + k_4 \text{ [N} \cdot \text{m}^{-1}] \quad (3.6)$$

$k_2$  a  $k_3$  jsou dílčí tuhosti mechanismu stroje, jehož celková tuhost je dána vztahem:

$$\frac{1}{k_m} = \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} \rightarrow k_m = \frac{k_2 \cdot k_3}{k_2 + k_3} \text{ [N} \cdot \text{m}^{-1}] \quad (3.7)$$

Celková tuhost pracovního prostoru potom bude:

$$\frac{1}{k_c} = \frac{1}{k_m} + \frac{1}{k_r} \rightarrow k_c = \frac{k_m \cdot k_r}{k_m + k_r} \text{ [N} \cdot \text{m}^{-1}] \quad (3.8)$$

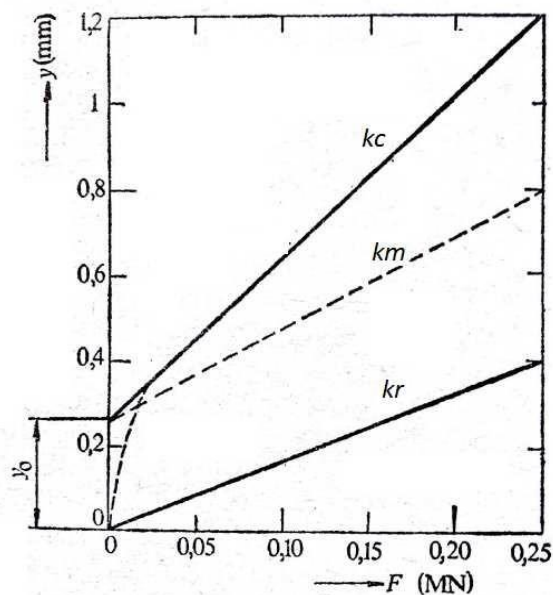
Bez toho, aby se musely měřit zvlášť deformace všech dílčích součástí, lze tuhost mechanismu vyjádřit z těchto vztahů jako:

$$k_m = \frac{k_c \cdot k_r}{k_r - k_c} \text{ [N} \cdot \text{m}^{-1}] \quad (3.9)$$

Zvýšením tuhosti jednotlivých částí stroje lze tedy zvyšovat tuhost stroje jako celku.

Nejjednodušší je zvyšovat dílčí tuhost rámu. Je však třeba najít kompromis mezi požadavkem na tuhost a požadavky ekonomickými. Tuhost rámu má tedy smysl zvyšovat pouze do určité meze.

Rám stroje se např. u klikového lisu podílí na celkové deformaci jednou třetinou (viz obrázek 3.5), zbylé dvě třetiny připadají na deformaci mechanismu. Z klikového mechanismu je nejméně tuhý klikový hřídel, následně ojnice a nejtěžší je beran.



Obrázek 3.5: Charakteristika tuhosti jednotlivých částí stroje [3]

Pro porovnání tvářecích strojů z hlediska tuhosti se pro tuhost pracovního prostoru používá vztah:

$$k_c = c_c \cdot \sqrt{F_j} \quad (3.10)$$

Kde  $F_j$  je jmenovitá síla lisu,  $k_c$  celková tuhost pracovního prostoru a  $c_c$  je tzv. konstanta tuhosti pro daný typ tvářecího stroje. Příklady hodnoty této konstanty pro různé druhy lisů jsou uvedeny v tabulce 3.1.

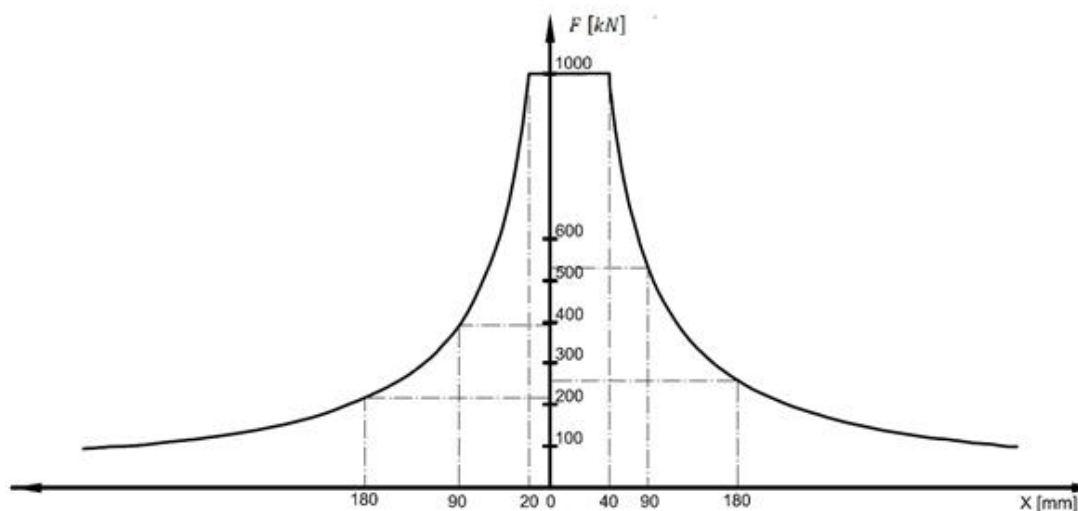
Druh lisu	Tuhost pracovního prostoru $k$ [MN/mm]
Klikové a výstředníkové	$(0,28 \text{ až } 0,8) \cdot \sqrt{F_j}$
Výstředníkové kovací	$(1,60 \text{ až } 1,7) \cdot \sqrt{F_j}$
Razicí	$(1,30 \text{ až } 1,4) \cdot \sqrt{F_j}$

Tabulka 3.1: Volba tuhosti pracovního prostoru [5]

Odolnost lisu proti deformaci (tuhost) předurčuje jeho pracovní možnosti. Pokud dojde u stroje k přetížení, má to za následek opotřebení, snížení přesnosti tvářecí operace a také klesá životnost stroje i nástroje. K přetěžování mechanických i jiných lisu může docházet v zásadě dvěma způsoby. Buď je překročena některá ze zadaných jmenovitých hodnot stroje (síla, práce, energie) nebo může být lis přetěžován nesymetrickým, excentrickým zatížením pracovního prostoru. Působíště tvářecí síly se totiž ne vždy nachází přesně v ose stroje. Poloha působíště se bude lišit pro různé tvářecí nástroje, proto při posuzování odolnosti daného stroje proti deformaci nestačí pouze určit statickou tuhost v ose, ale přísně vzato je třeba pro každý nástroj zjistit, kde se nachází působíště tvářecí síly a ověřit, zda je tento nástroj vhodný pro použití na daném stroji.

Mimoosé působení tvářecí síly se nejčastěji objevuje při postupovém tváření, jelikož postupové nástroje bývají složité a je prakticky nemožné zajistit, aby výslednice všech sil působících při tváření ležela přesně v ose stroje.

To, jak velkou silou je možné stroj zatěžovat v určité vzdálenosti od jeho osy znázorňuje charakteristika dovoleného zatížení. Příklad je znázorněn na obrázku 3.6.



Obrázek 3.6: Charakteristika dovoleného zatěžování stroje LE 100 D [3]

Pro ověření, zda je možné určitý nástroj na stroji bezpečně provozovat, je nutné nejprve najít působiště a velikost výsledné tvářecí síly při použití tohoto nástroje a tuto hodnotu porovnat s maximální dovolenou silou v daném místě pro příslušný stroj. Pokud je zjištěná síla větší než síla dovolená, znamená to, že nástroj není pro provoz na daném stroji vhodný a při dlouhodobém používání by mohl způsobit jeho poškození.

Pro samotné určení dovolené síly v určité vzdálenosti je nejprve třeba zjistit jmenovitou deformaci, kterou vyvolá jmenovitá síla působící v ose tváření. S rostoucí souřadnicí směrem od osy bude hodnota síly potřebná k vytvoření této deformace postupně klesat. To, jak rychlý nebo pozvolný pokles dovolené síly bude, závisí na konstrukčním provedení daného stroje. Zatěžovací charakteristika je tedy pro každý lis specifická.

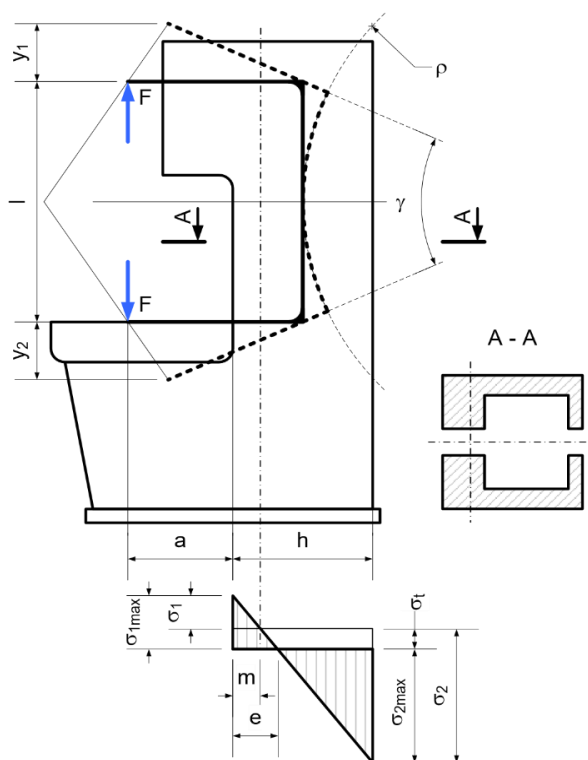
## 4 Možnosti zjištění deformace

Jelikož tuhost je veličina odvozená od síly a deformace, probíhá její určení vždy nepřímou, dopočtením z hodnot těchto dvou veličin. Pro zjištění tuhosti stroje je tedy potřeba ho nejprve zatížit silou (buď reálně, nebo ve výpočtovém modelu) a poté stanovit k zátěžné síle příslušnou deformaci. Tuto deformaci je možné určit několika způsoby. Prvním z nich je metoda analytická, která pracuje se značně zjednodušeným modelem a k určení deformací využívá především poznatky z pružnosti a pevnosti. Další možností je vytvoření 3D modelu stroje a použití metody konečných prvků. Posledním způsobem, na který se tato práce zaměřuje především, je reálné měření deformace na stroji pomocí vhodné měřicí aparatury.

### 4.1 Analytická metoda

[6, 7] Tato metoda využívá k určení deformace teorii přímých a křivých prutů. Uplatňuje se především při návrhu nebo výpočtu parametrů rámu stroje, neboť tato součást nemá příliš složitou geometrii a je možné ji poměrně snadno nahradit zjednodušeným výpočtovým modelem. Analytický postup lze aplikovat na rámy otevřené i uzavřené, včetně jejich různých tvarových modifikací. Většinou se však používá spíše pro rámy otevřené, neboť náročnost výpočtů u uzavřeného rámu je značně větší.

Výhoda analytického výpočtu tedy spočívá v relativně snadném výpočtu, zároveň ale hrozí značná odchylka od skutečnosti v závislosti na míře zjednodušení modelu. Jelikož se metoda omezuje především na rámy typu C s jednoduchou geometrií, je oblast použití poměrně úzká. Zde je postup výpočtu ukázán na rámu typu C s přímou stojinou (obrázek 4.1).



Obrázek 4.1: Otevřený rám s přímou stojinou [6]

Stojina rámu je zatížena ohybem a tahem, nejprve je tedy třeba určit jednotlivá napětí:

$$\sigma_t = \frac{F}{A}; \quad \sigma_1 = \frac{M \cdot m}{J}; \quad \sigma_2 = \frac{M \cdot (h-m)}{J} \quad [N \cdot m^{-2}] \quad (4.1)$$

Kde  $M$  je ohybový moment stojiny k její střednici

$$M = F \cdot (a + m) \quad [N \cdot m] \quad (4.2)$$

$J$  je kvadratický moment průřezu stojiny

Z těchto hodnot a z rozložení napětí v průřezu stojiny na obrázku 4.1 je pak možné dopočítat polohu neutrální osy:

$$e = h \cdot \frac{\sigma_t + \sigma_1}{\sigma_1 + \sigma_2} = h \cdot \frac{\sigma_{1max}}{\sigma_{1max} + \sigma_{2max}} \quad [m] \quad (4.3)$$

Zakřivení neutrální osy bude:

$$\rho = \xi \cdot \frac{E \cdot y}{\sigma} = \xi \cdot \frac{E \cdot y}{\frac{M \cdot y}{J}} = \xi \cdot \frac{E \cdot J}{M} \quad [m] \quad (4.4)$$

Kde  $\xi$  je součinitel tvaru stojanu (0,7 ÷ 1,3)

$y$  je vzdálenost elementu od neutrální osy

Úhel rozevření stojiny je potom:

$$\gamma = \frac{l}{\rho} = \frac{l + y_1 + y_2}{\rho + a + e} \quad [1] \quad (4.5)$$

Celková deformace:

$$y = y_1 + y_2 = \frac{L \cdot (a + e)}{\rho} \quad [m] \quad (4.6)$$

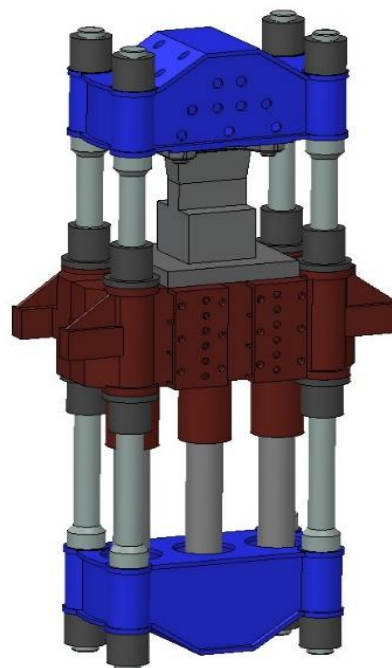
Tuhost rámu se pak vyjádří ze zjištěné deformace jako:

$$k_r = \frac{F}{y} = \frac{F \cdot \rho}{L \cdot (a + e)} = \xi \cdot \frac{E \cdot J}{L \cdot (a + e) \cdot (a + m)} \quad [N \cdot m^{-1}] \quad (4.7)$$

## 4.2 Metoda konečných prvků

[8] Dalším možným způsobem zjišťování deformací silově namáhaného stroje je použití metody konečných prvků v příslušném softwaru. Výhodou této metody je, že umožňuje reálné zobrazení tvaru příslušného stroje nebo jeho součástí. Díky tomu lze, pokud je model dostatečně přesný, získat značně přesnější výsledky než u klasického analytického výpočtu. Také je zde možné sledovat rozložení napětí či deformace v rámci celého stroje nebo jeho částí. MKP tedy umožňuje poměrně komplexní analýzu, na jejímž základě je možné vytyčit kritická místa, kde je stroj nejvíce zatěžován a poté např. navrhnout jiné konstrukční řešení, změnu materiálu součástí atd. Na druhou stranu, spolu s přesností výpočtového modelu výrazně roste náročnost vyhodnocení. Geometrie každého stroje se liší a pro úspěšné zvládnutí výpočtu je třeba velkých zkušeností výpočtáře.

Prvním krokem k sestavení výpočtového modelu je vytvoření 3D modelu, na který se následně aplikuje MKP. Pro konečnoprvkový model je třeba vytvořit vhodnou síť. Volba sítě závisí na konkrétním zadání – na tom, na jaké části stroje se výpočet nejvíce zaměřuje a kde se předpokládá největší zatížení. V těchto místech je pak dobré použít jemnější síť. Dále je třeba stanovit, zda bude úloha lineární či nelineární. Úlohy nelineární zahrnují do výpočtů různé další proměnné (např. vliv teploty, kontaktů, nehomogenity materiálu), zatímco lineární úlohy pracují se značnou idealizací. Dalším krokem je volba, v jaké dimenzi se bude konstrukce analyzovat. Úlohy je možné řešit jako prostorový, plošný nebo jednorozměrný výpočet modelu. Prostorový výpočet počítá s reálným objemem konstrukce modelu. Plošný výpočet pracuje s plochami, které nahrazují objemové prvky konstrukce se zahrnutím tloušťky stěn. Jednorozměrný výpočet pak nahrazuje dlouhé prvky konstrukce přímkou se zahrnutím průřezu daného prvku. Pokud jsou konstrukce stroje a zatížení symetrické, je také možné provést výpočet pouze na části modelu. Všechny tyto možnosti mohou významně zkrátit čas výpočtu, ale zároveň se vždy jedná o jisté zjednodušení, jehož vliv na výsledky je třeba zohledňovat.



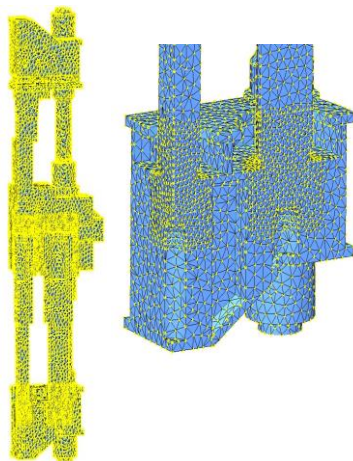
Obrázek 4.2: Model rámu lisu [8]

Posledním krokem při sestavování výpočtového modelu je definování okrajových podmínek, které zahrnují působení sil a uchycení konstrukce v prostoru.

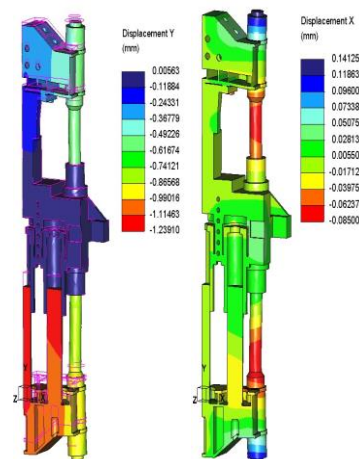
Použití MKP je zde uvedeno na příkladu zjišťování deformací rámu hydraulického lisu se jmenovitou silou 100 tun. Tento postup byl použit v bakalářské práci *Stanovení maximálního zatížení hydraulického lisu, Vít Pagač* - jelikož moje práce se zaměřuje především na praktické měření, je zde tento příklad uveden především pro úplnost při výčtu možných způsobů zjišťování deformace.

Jedná se o rám typu O, tvořeným čtyřmi sloupy, dvěma pohyblivými traverzami a jednou pevnou traverzou. Tváření se realizuje přímočarým pohybem nástroje, zatížení je centrické. 3D model měřeného rámu je znázorněn na obrázku 4.2. Jelikož je rám symetrický podle dvou os, je možné ho rozdělit na čtyři stejné části, do kterých se tvářecí síla rovnoměrně rozdělí. Při výpočtu je pak možné pracovat pouze s jedinou z těchto částí, zatíženou čtvrtinovou silou.

V modelu byla použita trojúhelníková síť s prvky o stejné velikosti. V několika kritických místech, kde je možné předpokládat větší deformace (např. kontaktní plochy), byla síť více zjemněná (obrázek 4.3). Na základě sil působících na rám a jeho ustavení v prostoru byly stanoveny okrajové podmínky pro výpočet.



Obrázek 4.3: Sítovaný výpočtový model [8]



Obrázek 4.4: Rozložení deformací ve směru osy y a x [8]

Výsledné rozložení deformací je znázorněno na obrázku 4.4. Je patrné, že posuvy ve směru působící zátěžné síly (osa y) jsou zhruba o řád větší než posuvy ve směru na tuto sílu kolmém (osa x).

Na základě analýzy MKP si lze udělat poměrně komplexní představu o deformacích a tedy i tuhosti libovolného stroje, u něhož je k dispozici podobný 3D model. Zároveň se však jedná o náročný postup, kdy je navíc třeba vlastnit licenci k příslušnému

výpočtovému programu. Proto je mnohdy méně komplikované získat výsledky reálným měřením na stroji, kterým se tato práce především zabývá.

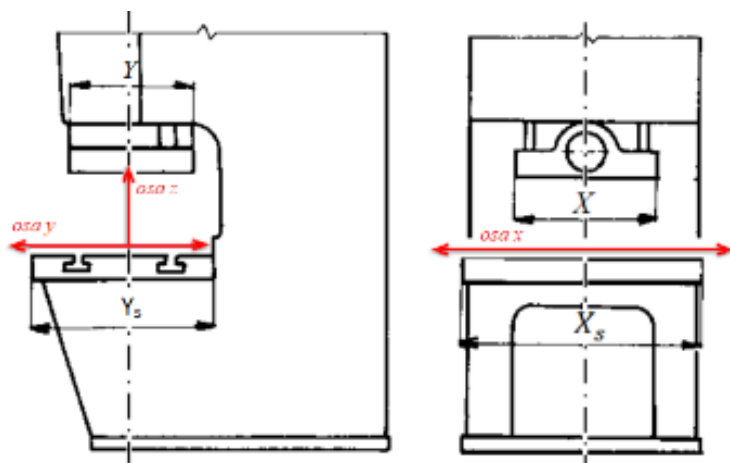
## 4.2 Měření

[1, 2, 3, 10] Dosud popsané metody pracovaly vždy pouze s více či méně přesným výpočtovým modelem. Jakkoliv přesný model stroje však zřejmě nedokáže postihnout všechny faktory, které mohou výpočet ovlivnit, např. geometrickou přesnost jednotlivých součástí, jejich opotřebení, zvětšování vůlí atd. Pokud chceme při analýze stroje tyto vlivy postihnout, je třeba daný stroj reálně při zatížení proměřit.

Přestože metody zkoušek, případně požadovaná přesnost pro různé typy tvářecích strojů jsou uvedeny a popsány v řadě norem (např. ČSN 21 0389 - metody zkoušek výstředníkových lisů do 5000 kN), konkrétní metodika měření tuhosti ani hodnoty tuhosti pro tvářecí stroje v žádné normě předepsány nejsou. Při měření se tedy vychází z prakticky zažitých postupů, které však nejsou přímo normalizovány a mohou se tedy dle potřeb modifikovat. Při návrhu stroje se pak vychází z požadavku na co největší tuhost, zároveň se ale zohledňují požadavky ekonomické a designové.

Měření deformace se může zaměřovat buď na určitou dílčí část stroje, nebo na stroj jako celek. Pokud zjišťujeme celkovou tuhost, obvykle se měření rozděluje na dvě části – měření tuhosti rámu a tuhosti pracovního prostoru, jak už bylo zmíněno v kapitole 3.1. Z těchto dvou výsledků se následně dopočítá tuhost mechanismu.

Cílem měření je zjistit, jakou deformaci vyvolá určitá síla, která působí na stroj v ose tváření. Samotné měření na lisu se provádí tak, že se do pracovního prostoru stroje s vhodně zvolenými souřadnicemi (viz obrázek 4.5) umístí přípravek na vyvození síly a zjišťuje se deformace od této síly v jejím působišti.

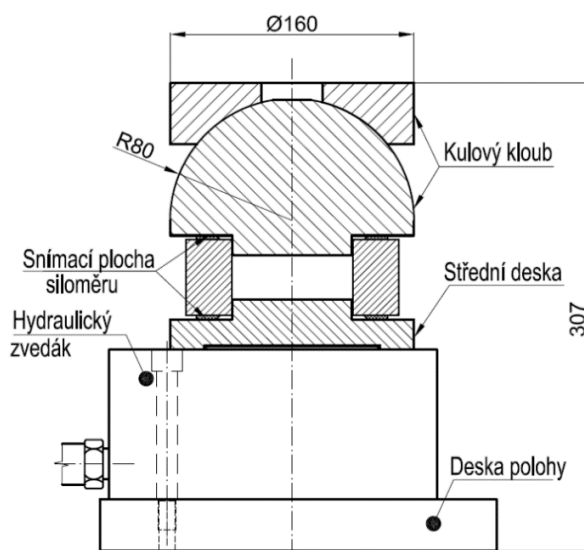


Obrázek 4.5: Souřadný systém měřeného stroje [3]



Příklad takového, již navrženého, přípravku je uveden na obrázku 4.6. Obsahuje několik částí.

K vyvození síly se používá hydraulický válec, který musí být schopen působit na beran dostatečnou silou, při které chceme deformaci zjišťovat. Mechanismus stroje se při tom musí nacházet v horní úvratí při nastavené maximální výšce zdvihu. Na válci je usazen snímač síly, vhodný pro daný rozsah. Přípravek dále obsahuje kulový kloub, který díky sférické vazbě



Obrázek 4.6: Přípravek na vyvození síly [3]

zajišťuje přenos pouze normálové síly. Následně se hydraulickým válcem vyvozuje síla, která působí na beran a simuluje tvářecí sílu při chodu stroje. Při tomto zatěžování se zjišťují hodnoty deformace pro jednotlivé hodnoty působící síly, a to až do velikosti jmenovité síly lisu. Před proměřením je třeba stroj nejprve několikrát předběžně zatížit, aby došlo k vymezení vůli v mechanismu a dosednutí stykových ploch.

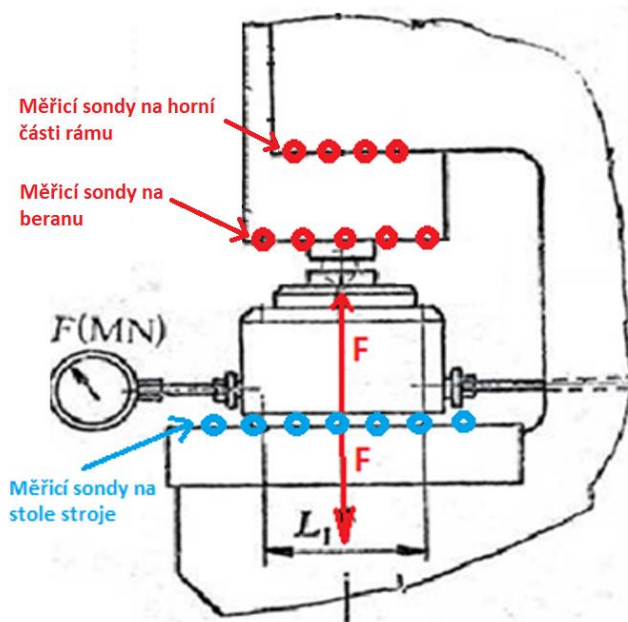
Hodnoty deformací se odečítají z úchylkoměrů umístěných na příslušné části stroje (na stojanu pro měření tuhosti rámu a na beranu pro měření celkové tuhosti pracovního prostoru). Mohou se použít úchylkoměry číslicové nebo digitální. U digitálních přístrojů je výhodou, že mohou být napojeny do počítače a zobrazovat spojitý průběh deformací. U číslicových přístrojů je nutné naměřené hodnoty odečítat ručně a pro získání reálné tuhostní charakteristiky by bylo nutné provést velký počet měření pro více hodnot zátěžné síly. Pro určení pouze jmenovité deformace při jmenovité působící síle jsou však číslicové úchylkoměry dostačující.

Deformace je teoreticky možné zjišťovat buď relativně, nebo absolutně, tedy v závislosti na tom, k čemu jsou vztaženy měřicí sondy. Základna stojánků pro úchylkoměry by se pro absolutní měření umístila na nezávislý rám, pro relativní měření pak přímo na stůl stroje. Vzhledem k vyšší přesnosti výsledků je však vhodné měřit deformace vždy absolutně. Absolutní měření tedy poskytuje spolehlivější hodnoty, zároveň ale obnáší několik komplikací. Především vyžaduje nezávislý rám, který je sám

o sobě dostatečně tuhý a který je umístěný na vhodné, rovněž dostatečně tuhé, podložce. Dále musí být rám vhodně navržen z hlediska rozměrů, neboť by mohl vzniknout problém s nedostatkem prostoru pro měření, pokud by rám nebyl dostatečně skladný.

Obečné rozmístění měřicích sond je naznačeno na obrázku 4.7.

K měření deformace horní části rámu by sloužily úchylkoměry označené červeně (horní řada). Pokud by se měřila deformace celého pracovního prostoru, tak by se sondy umístily na beran (dolní červená řada). Jelikož se měření provádí absolutně, tedy od nezávislého rámu, bylo by nutné k oběma těmto hodnotám ještě přičíst deformaci stolu, kterou by zjišťovaly sondy označené modře, umístěné na spodní části rámu.



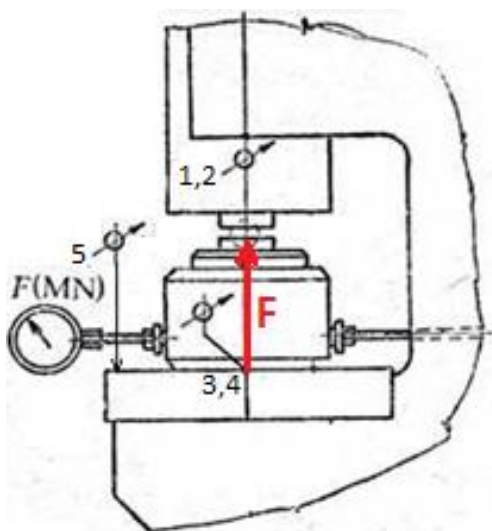
Obrázek 4.7: Obečné rozmístění měřicích sond [10]

Měření je možné provést najednou, ale vzhledem k velkému množství měřicích sond a omezenému prostoru stroje je vhodnější proměřit rám a pracovní prostor zvlášť.

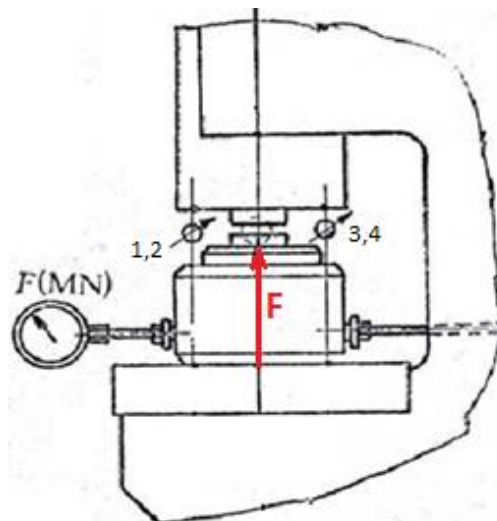
Jak už bylo řečeno, přesný počet, ani poloha úchylkoměrů nejsou ničím předepsány. Konfigurace se tedy může pro jednotlivá měření měnit v závislosti na požadované přesnosti a daných technických možnostech. Např. pro přesnější a spolehlivější měření deformace je vhodné použít více úchylkoměrů. Zjištěné hodnoty deformace je vždy nutné přepočítat do působivé síly, které se nachází v ose tváření.

Tento přepočet je možné provádět ručně po skončení měření, případně by bylo možné sestavit vhodný algoritmus, který by přepočítával naměřené deformace do působivé síly již v průběhu měření. Složitost těchto přepočtů je závislá na počtu použitých měřicích sond a na jejich umístění.

Příklad již použité metody měření deformací je uveden na obrázcích 4.8 a 4.9. Nalezená metodika byla použita v diplomové práci *Určení vhodného mechanického lisu pro postupové lisovací nástroje*, Bc. Kristýna Hochheim, původně vychází ze starých skript *TVÁŘECÍ STROJE - Základy výpočtů a konstrukce* - Rudolf, Kopecký.



Obrázek 4.8: Měření deformace rámu [10]



Obrázek 4.9: Měření deformace pracovního prostoru [10]

Tento způsob měření však nemusí být dostatečně přesný a zdokonalení dané metody je jedním z cílů této práce.

Hlavní problém spočívá v rozmístění měřicích sond. Například pro zjištění deformace pracovního prostoru dle obrázku 4.9 jsou použity čtyři úchylkoměry v rozích beranu. Jelikož cílem je určit deformaci v působišti síly, tedy v tomto případě uprostřed beranu, je nutné přepočítat naměřené hodnoty do tohoto místa.

Tento přístup tedy předpokládá čistě lineární průběh deformace podél stran beranu. To však nemusí odpovídat realitě, ve skutečnosti se může např. v nějaké části beranu objevit větší průhyb a průběh deformací může být složitější. Pro přesnější výsledky by tedy bylo namísto použít měřicí sondy i na jiných místech, aby bylo možné deformační chování pracovního prostoru lépe popsat. V rámci této práce jsou k měření použity nové varianty, které jsou navrženy a popsány v kapitole 5.

## 5 Navržené metody měření

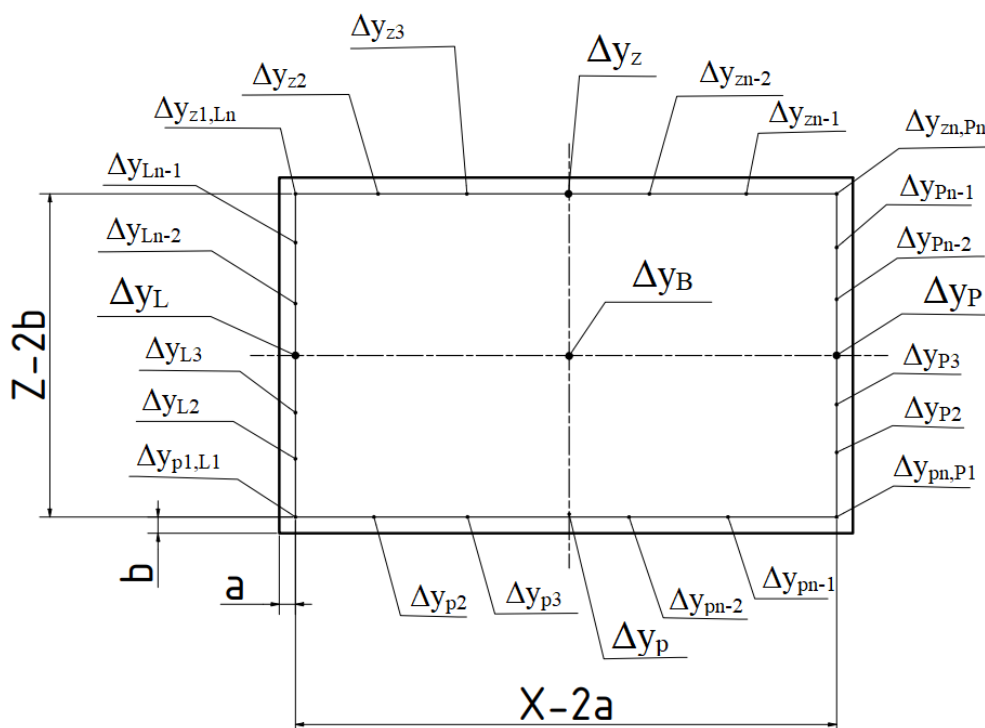
### Obecné rozmístění měřicích sond

Cílem je vždy zjistit hodnotu deformace přepočítanou do působivé síly. V případě měření deformace pracovního prostoru je to hodnota ve středu beranu. Jelikož není možné umístit úchylkoměr přímo doprostřed, umísťují se měřicí sondy podél jednotlivých stran beranu a hodnota uprostřed se následně dopočítá. Celkem jsou tedy použity čtyři řady úchylkoměrů umístěné podél přední, zadní, pravé a levé části beranu

Počet ani poloha sond na jednotlivých stranách nejsou v tomto obecném případě specifikovány. Vyhodnocení probíhá pomocí lineární regrese. Ve všech měřených bodech přední části beranu je zjištěna určitá konkrétní hodnota deformace  $\Delta y_{pi}$ . Tyto hodnoty jsou následně proloženy přímkou a z rovnice této přímky se určí hodnota ve středu přední části beranu  $\Delta y_p$ . Totéž se provede pro část zadní ( $\Delta y_z$ ) a část levou a pravou ( $\Delta y_L$ ,  $\Delta y_P$ ) – obr. 5.1.

Výsledná deformace uprostřed beranu se získá ze vztahu:

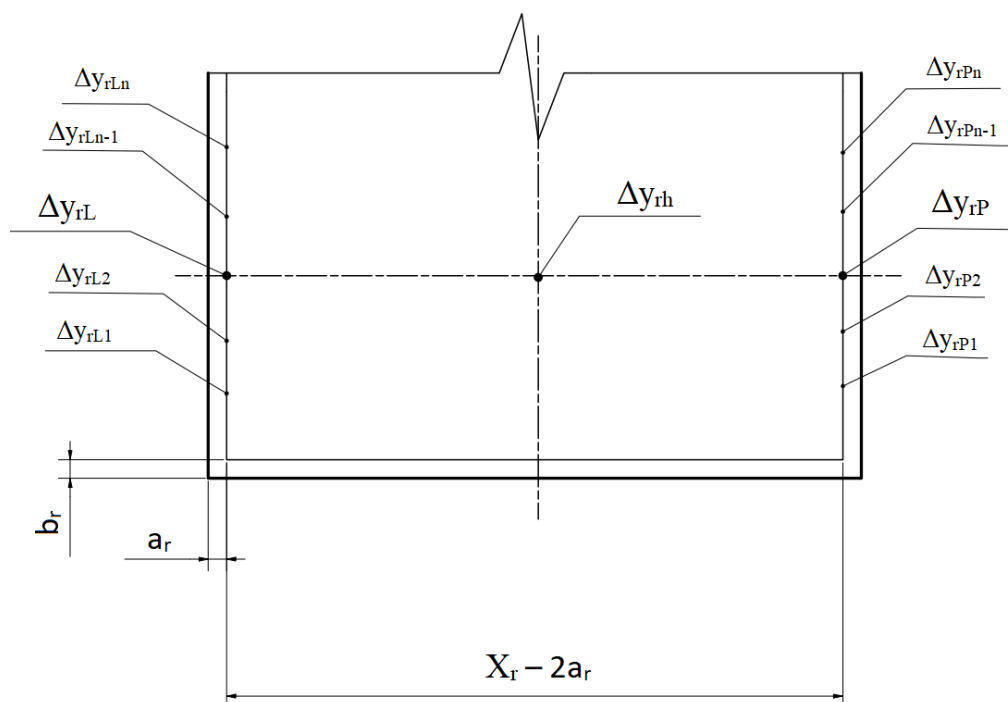
$$\Delta y_B = \frac{\Delta y_p + \Delta y_z + \Delta y_L + \Delta y_P}{4} \quad (5.1)$$



Obrázek 5.1: Umístění úchylkoměrů na beranu

Určení celkové deformace rámu stroje probíhá obdobně. Podél stran horní části rámu se umístí řady úchylkoměrů – obrázek 5.2. Hodnoty deformací zjištěných sondami na každé straně se opět proloží přímkou a z rovnic těchto přímek se vypočtou deformace na levé a na pravé straně ( $\Delta y_L$ ,  $\Delta y_P$ ). Z těchto dvou hodnot se pak určí výsledná deformace horní části rámu podle vztahu:

$$\Delta y_{rh} = \frac{\Delta y_{rL} + \Delta y_{rP}}{2} \quad (5.2)$$



Obrázek 5.2: Umístění úchylkoměrů na horní části rámu

Pro zjištění deformace stolu (spodní části rámu) je možné použít shodný postup jako při určování deformace na beranu. Jelikož je však u rámu předpokládána vyšší tuhost a navíc je stůl ustaven na pevné podložce, lze očekávat, že hodnota deformace stolu bude oproti pracovnímu prostoru a horní části rámu velmi malá.

Celkově lze říci, že použití většího počtu měřicích sond snižuje riziko nepřesností způsobených např. výskytem lokálního zvýšení/snížení deformace, jelikož je k dispozici velký počet měřených bodů. Získaný výsledek by tak měl být poměrně spolehlivě přesný.

Přesto je tato obecná varianta spíše teoretickou možností, jelikož vždy nemusí být k dispozici dostatečný počet úchylkoměrů a jejich počet je také často redukován prostorovým omezením daného pracoviště. V praxi se tedy většinou pracuje s menším počtem měřicích sond.

## 5.1 Původní varianta

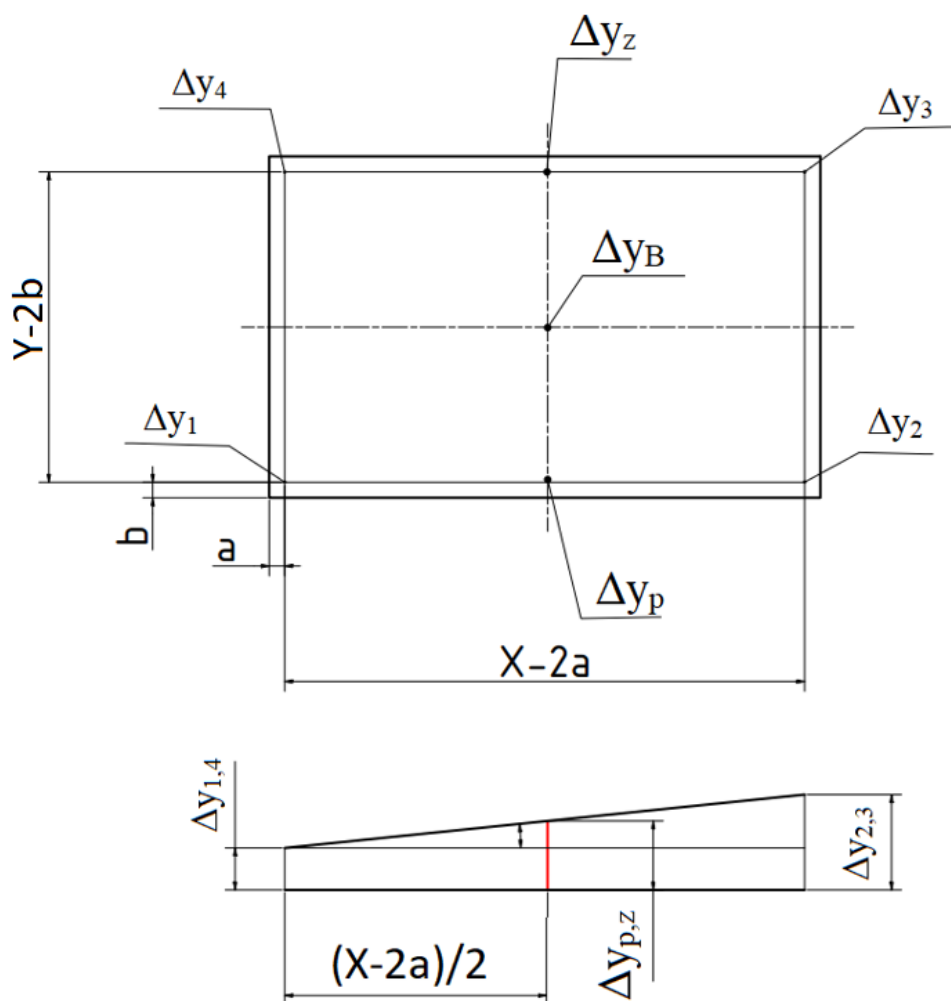
Měření deformace pracovního prostoru:

[2, 3, 10] Podle původní metodiky měření probíhalo zjištění deformace pracovního prostoru pomocí čtyř úchylkoměrů umístěných v rozích beranu (viz obrázek 5.3). Celková deformace  $\Delta y_B$  v působišti tvářecí síly se pak určila zprůměrováním hodnot deformací v přední a zadní části beranu:

$$\Delta y_p = \frac{\Delta y_1 + \Delta y_2}{2} \quad (5.3)$$

$$\Delta y_z = \frac{\Delta y_3 + \Delta y_4}{2} \quad (5.4)$$

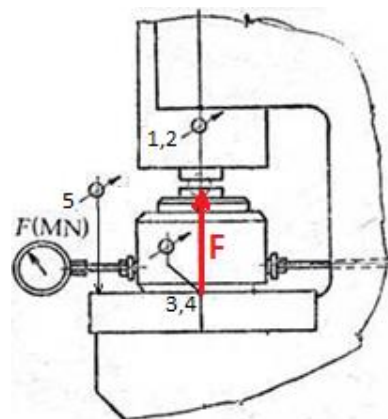
$$\Delta y_B = \frac{\Delta y_p + \Delta y_z}{2} \quad (5.5)$$



Obrázek 5.3: Umístění sond na beranu – 1. varianta

Měření deformace rámu:

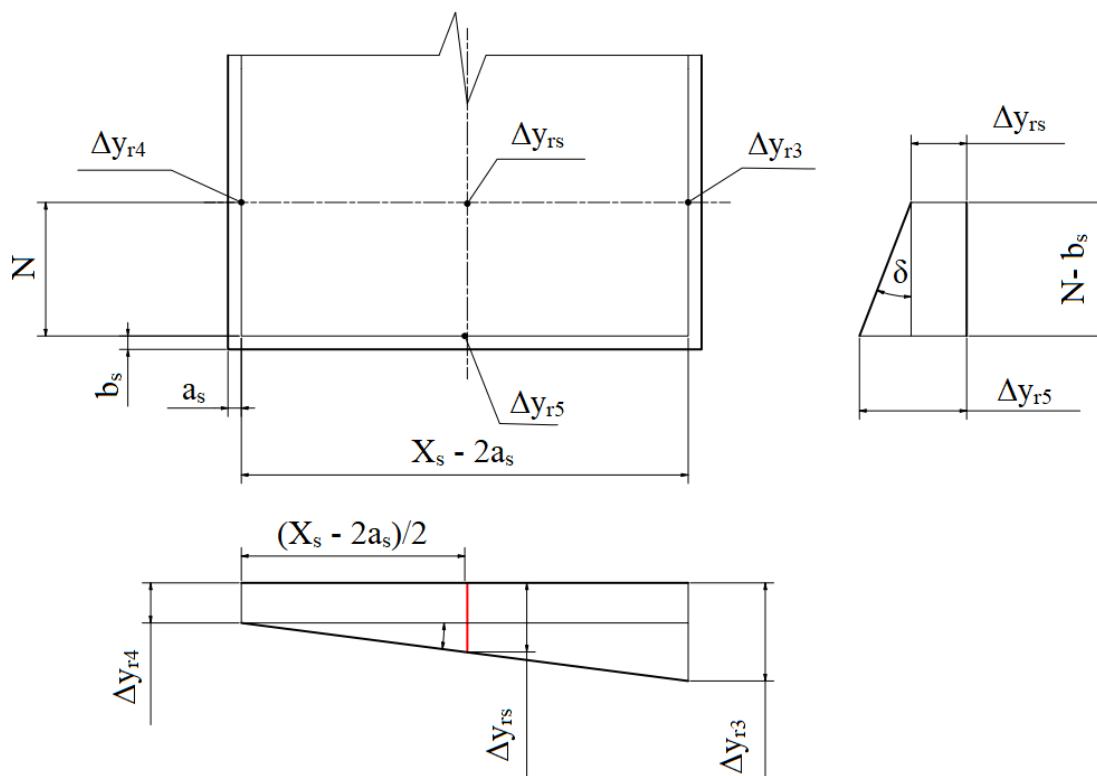
Měření deformace rámu stroje probíhalo tak, že se umístily dvě sondy na horní a dvě na spodní část rámu (stůl), a to vždy místech, kde je z jejich hodnot možné dopočítat deformaci v ose stroje – obrázek 5.4. Úchylkoměry 1 a 2 se tedy musí nacházet ve stejné rovině, v níž leží spojnice středů stran beranu. Pro sondy 3 a 4 platí totéž – nachází se uprostřed stran stolu. Pátá sonda umístěná v polovině šířky stolu na přední části slouží k určení úhlové deformace (obrázek 5.5). Výsledné deformace v působišti síly se opět získají prostým zprůměrováním naměřených hodnot:



Obrázek 5.4: Umístění úchylkoměrů na horní a spodní části rámu – 1. varianta [10]

$$\Delta y_{rh} = \frac{\Delta y_{r1} + \Delta y_{r2}}{2} \quad (5.6)$$

$$\Delta y_{rs} = \frac{\Delta y_{r3} + \Delta y_{r4}}{2} \quad (5.7)$$



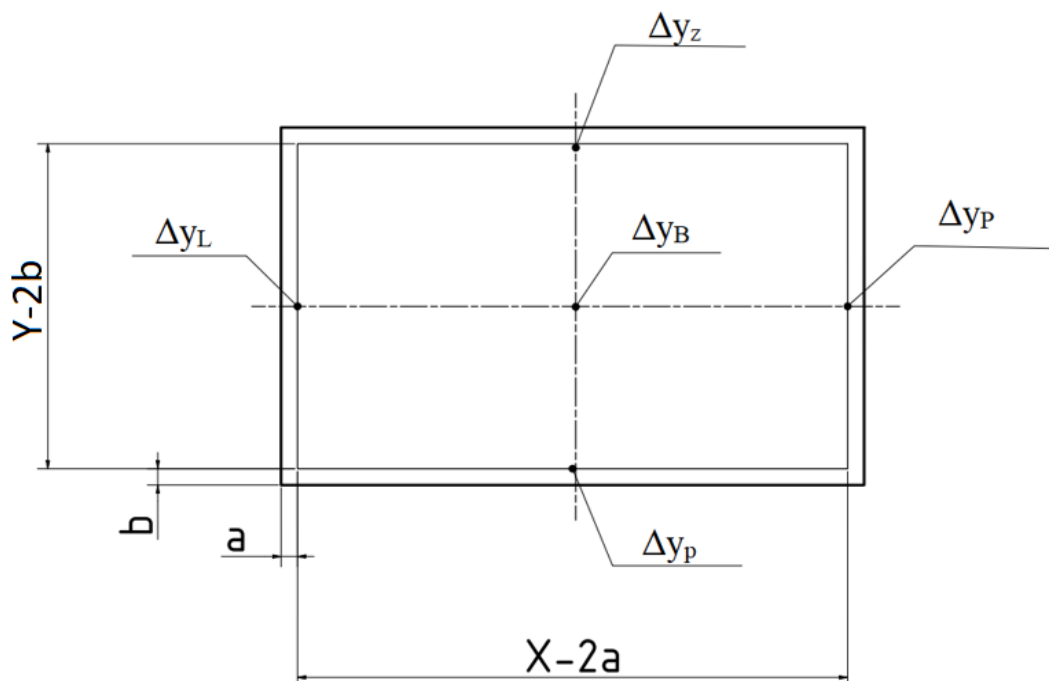
Obrázek 5.5: Umístění úchylkoměrů na stole – 1. varianta

## 5.2 2. varianta

Měření deformace pracovního prostoru:

Druhá varianta pracuje opět se čtyřmi úchylkoměry, tentokrát však umístěnými přímo do středů jednotlivých stran (obrázek 5.6). Není zde tedy nutné provádět přepočítání deformací do středů stran, neboť měřicí sondy se nachází už přímo v těchto bodech. Ze získaných hodnot lze pak jejich zprůměrováním získat hodnotu uprostřed:

$$\Delta y_B = \frac{\Delta y_L + \Delta y_P + \Delta y_z + \Delta y_p}{2} \quad (5.8)$$



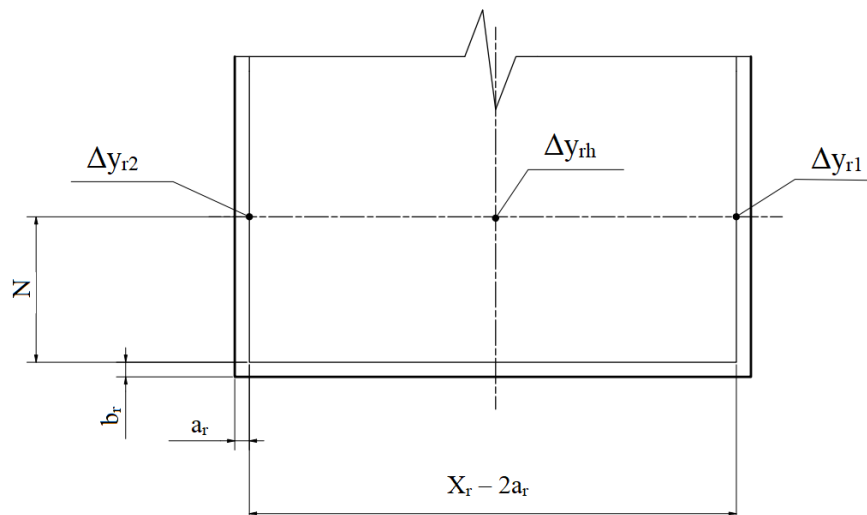
Obrázek 5.6: Umístění úchylkoměrů na beranu – 2. varianta

Cílem použití této metody je zjistit, zda se bude výsledek výrazněji lišit od původního postupu s úchylkoměry v rozích. Průběh změny deformace podél strany beranu se totiž podle původní metodiky předpokládá lineární (viz obrázek 5.3). Ve skutečnosti však může dojít k tomu, že vzhledem k charakteru zatížení bude v okolí středů stran výraznější průhyb. Výsledky získané touto metodou pomohou objasnit, jak výrazný je rozdíl středové deformace (a tedy i tuhosti) oproti původnímu postupu a zda jsou obě metody srovnatelně přesné.



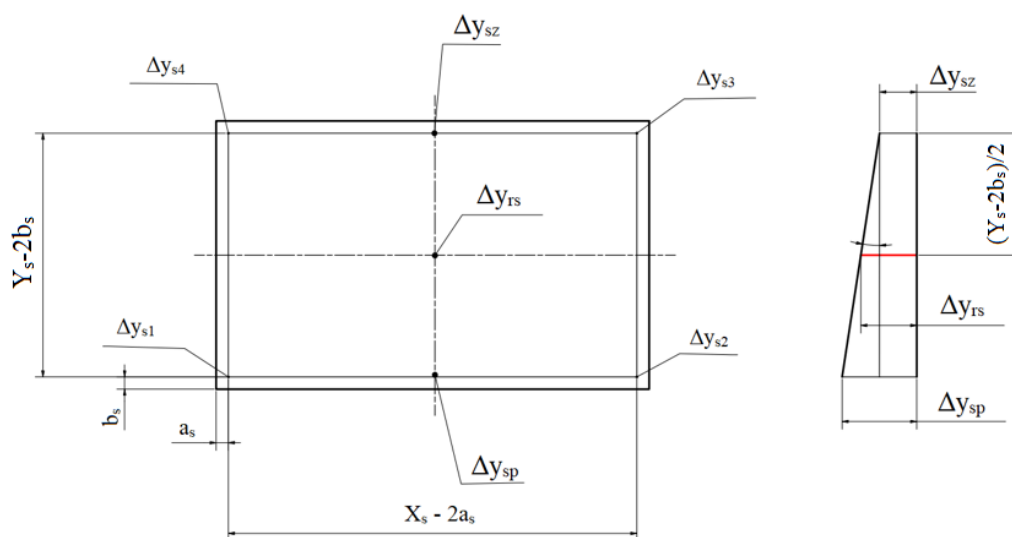
Měření deformace rámu:

Pro měření deformace horní části rámu byl použit stejný postup jako v původní variantě – tedy dvě měřicí sondy umístěné na protilehlých stranách rámu – obrázek 5.7



Obrázek 5.7: Umístění úchylkoměrů na horní části rámu – 2. varianta

Změna byla provedena u měření deformace spodní části rámu, jelikož deska stolu lisu LEN 25 obsahovala T drážku, která znemožnila umístění sond do středů bočních stran. Úchylkoměry byly tedy umístěny v rozích stolu, rovněž byla odstraněna sonda na přední straně, jelikož natočení stolu bylo při dané konfiguraci možné dopočítat i bez ní – viz obrázek 5.8.

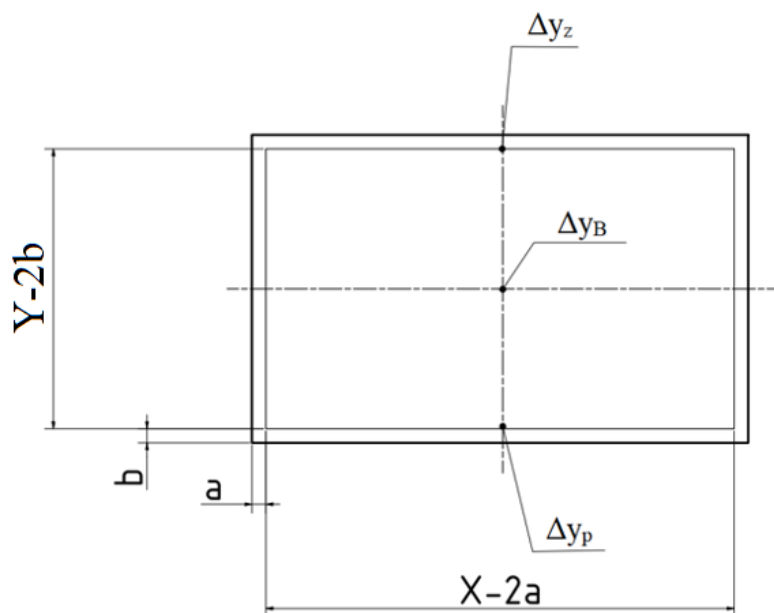


Obrázek 5.8: Umístění úchylkoměrů na spodní části rámu – 2. varianta

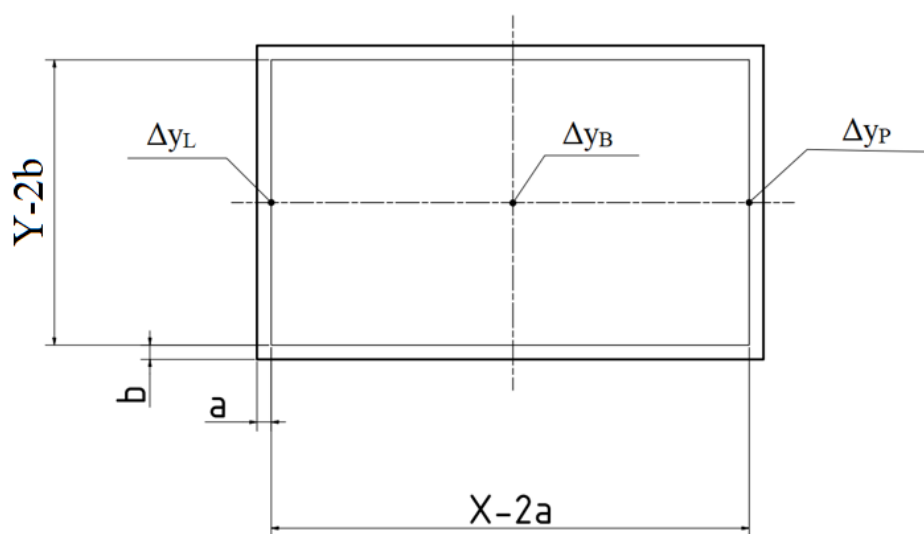
### 5.3 3 a 4. varianta

Měření deformace pracovního prostoru:

Poslední navržená varianta je ta nejúspornější. Pro měření deformace pracovního prostoru jsou zde použity pouze dvě měřicí sondy. Ty jsou umístěné vždy ve středech dvou protilehlých stran, buď přední a zadní, nebo levé a pravé – viz obrázky 5.9, 5.10.



Obrázek 5.9: Umístění úchylkoměrů na beranu – 3. varianta



Obrázek 5.10: Umístění úchylkoměrů na beranu – 4. varianta

Hodnota deformace v ose je potom určena jako průměr dvou hodnot, buď:

$$\Delta y_B = \frac{\Delta y_z + \Delta y_p}{2} \quad (5.9)$$

Nebo:

$$\Delta y_B = \frac{\Delta y_L + \Delta y_P}{2} \quad (5.10)$$

Hlavním důvodem použití této varianty je snaha zjistit, zda se středová deformace na beranu získaná dvojicí sond (buď  $\Delta y_p$ ,  $\Delta y_z$  nebo  $\Delta y_L$ ,  $\Delta y_P$ ) výrazněji liší od hodnoty naměřené při použití všech čtyř úchylkoměrů naráz a zda je tedy skutečně nutné umísťovat měřicí sondy do středů všech čtyř stran.

Postup měření deformace horní i spodní části rámu je shodný s variantou 2.

Cílem práce bylo všechny čtyři uvedené varianty měření realizovat na výstředníkovém lisu LEN25, získané výsledky porovnat, zhodnotit přesnost a efektivnost jednotlivých metod a určit optimální variantu použitelnou pro daný lis.

Výsledky měření a jejich zhodnocení jsou uvedeny v kapitole 9.

## 6 Způsob vyhodnocení měření

Kromě samotného návrhu optimální varianty měření a jejího provedení bylo jedním ze stěžejních cílů této práce nalézt také způsob, jak získaná data efektivně vyhodnocovat, tedy vytvořit vhodný výpočtový algoritmus pro zpracování výsledků měření.

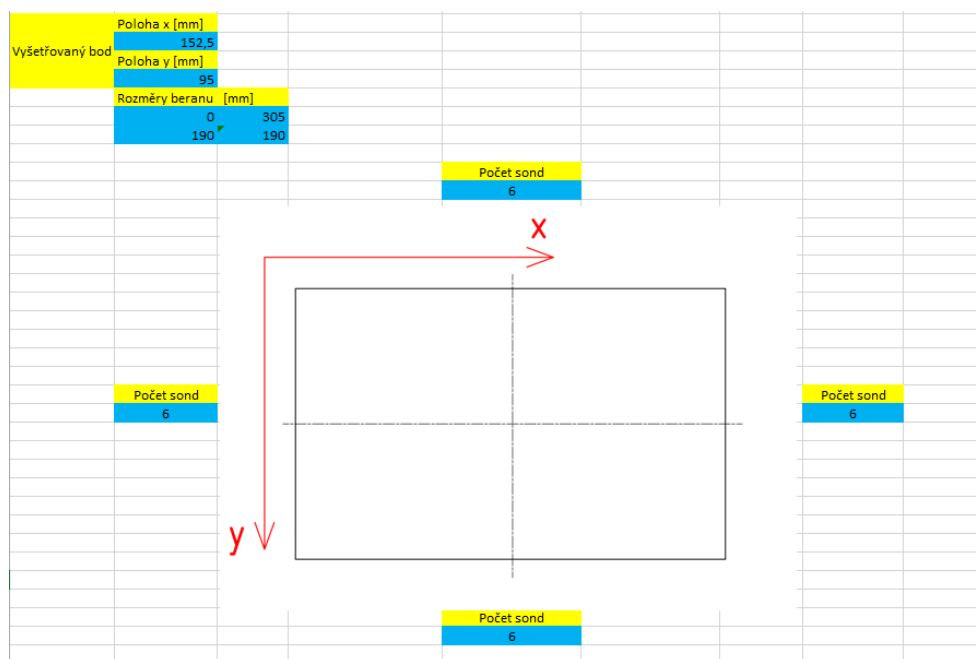
Jelikož nikdy není možné měřit deformaci přímo v působišti síly, musí se v tomto bodě dopočítat ze známých hodnot naměřených příslušnými úchylkoměry. Složitost a způsob tohoto přepočtu se mírně mění v závislosti na použité metodě měření, princip však zůstává veskrze stejný. Cílem tedy bylo vytvořit daný vyhodnocovací algoritmus tak, aby byl aplikovatelný univerzálně pro libovolnou variantu měření a zároveň dostatečně flexibilní, umožňující rychlou a snadnou změnu použité metody a vstupních parametrů.

Algoritmus byl vytvořen v programu MS Excel a je možné ho použít pro vyhodnocení výsledků z měření deformace pracovního prostoru i z měření deformace rámu.

### 6.1 Algoritmus pro zpracování hodnot – pracovní prostor

Pro popis principu výpočtového programu zde byla pro lepší názornost použita sada ilustrativních hodnot, které nevycházejí z žádného reálného měření.

Prvním krokem je definování rozměrů beranu a polohy bodu, ve kterém chceme vyšetřovat deformaci. Dále je potřeba určit počet měřicích sond (úchylkoměrů) umístěných na jednotlivých stranách – obrázek 6.1.



Obrázek 6.1: Vyhodnocovací algoritmus – určení počtu a umístění sond na beranu

V tomto případě bylo pro ilustraci použito 6 úchylkoměrů pro každou stranu beranu, což je zároveň maximální počet, který výpočtový program umožňuje použít. Vyšetřovaný bod byl zvolen uprostřed beranu, v případě potřeby je ale možné tento bod umístit zcela obecně v rámci souřadnicového systému beranu.

V dalším kroku je definována přesná poloha měřicích sond na jednotlivých stranách. Počátek souřadného systému je umístěn v levém zadním rohu beranu. Na přední a zadní straně beranu jsou v tomto případě úchylkoměry rozmístěny rovnoměrně podél osy x s roztečí 61 mm. Ve sloupcích pro jednotlivé sondy jsou vloženy odpovídající hodnoty deformace naměřené příslušnou sondou při určitém zatížení. V případě tohoto fiktivního měření byla zvolena zátěžná síla postupně se zvyšující od 0 do 250 kN, přičemž deformace byly měřeny pro vždy po 10 kN.

Vyhodnocení probíhá tak, že algoritmus provede lineární regresi hodnot deformací naměřených podél příslušné strany – tedy proloží tyto hodnoty přímkou. Z rovnice této přímky se pak automaticky vypočítá deformace v x-ové souřadnici vyšetřovaného bodu (v tomto případě střed beranu:  $x = 152,5$  mm). Totéž se provede pro obě strany, výsledkem jsou tedy pro každou zátěžnou sílu dvě hodnoty deformací (vpředu a vzadu), které jsou již přepočítané do potřebného bodu na ose x.

Tyto dvě hodnoty se následně opět proloží přímkou, z jejíž rovnice je vypočtena deformace v y-ové souřadnici vyšetřovaného bodu – tedy již přímo v působišti síly – DEFORAMCE 1 (viz obrázek 6.2).

Číslo sondy	VZADU						Deformace vzadu [μm]	VPŘEDU						Deformace vpředu [μm]	DEFORAMCE 1 [μm]	SÍLA [N]
	1	2	3	4	5	6		1	2	3	4	5	6			
Poloha x [mm]	0	61	122	183	244	305	0	0	61	122	183	244	305	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
110	90	80	100	110	80	95	100	110	80	110	90	90	90	96,66666667	95,83333333	10000
210	190	180	200	210	180	195	200	210	180	210	190	190	190	196,66666667	195,83333333	20000
310	290	280	300	310	280	295	300	310	280	310	290	290	290	293,33333333	288,33333333	30000
410	390	380	400	410	380	395	400	410	380	410	390	390	390	390,00000000	385,00000000	40000
510	490	480	500	510	480	495	500	510	480	510	490	490	490	490,00000000	485,00000000	50000
610	590	580	600	610	580	595	600	610	580	610	590	590	590	590,00000000	585,00000000	60000
710	690	680	700	710	680	695	700	710	680	710	690	690	690	690,00000000	685,00000000	70000
810	790	780	800	810	780	795	800	810	780	810	790	790	790	790,00000000	785,00000000	80000
910	890	880	900	910	880	895	900	910	880	910	890	890	890	890,00000000	885,00000000	90000
1010	990	980	1000	1010	980	995	1000	1010	980	1010	990	990	990	990,00000000	985,00000000	100000
1110	1090	1080	1100	1110	1080	1095	1100	1110	1080	1110	1090	1090	1090	1090,00000000	1085,00000000	110000
1210	1190	1180	1200	1210	1180	1195	1200	1210	1180	1210	1190	1190	1190	1190,00000000	1185,00000000	120000
1310	1290	1280	1300	1310	1280	1295	1300	1310	1280	1310	1290	1290	1290	1290,00000000	1285,00000000	130000
1410	1390	1380	1400	1410	1380	1395	1400	1410	1380	1410	1390	1390	1390	1390,00000000	1385,00000000	140000
1510	1490	1480	1500	1510	1480	1495	1500	1510	1480	1510	1490	1490	1490	1490,00000000	1485,00000000	150000
1610	1590	1580	1600	1610	1580	1595	1600	1610	1580	1610	1590	1590	1590	1590,00000000	1585,00000000	160000
1710	1690	1680	1700	1710	1680	1695	1700	1710	1680	1710	1690	1690	1690	1690,00000000	1685,00000000	170000
1810	1790	1780	1800	1810	1780	1795	1800	1810	1780	1810	1790	1790	1790	1790,00000000	1785,00000000	180000
1910	1890	1880	1900	1910	1880	1895	1900	1910	1880	1910	1890	1890	1890	1890,00000000	1885,00000000	190000
2010	1990	1980	2000	2010	1980	1995	2000	2010	1980	2010	1990	1990	1990	1990,00000000	1985,00000000	200000
2110	2090	2080	2100	2110	2080	2095	2100	2110	2080	2110	2090	2090	2090	2090,00000000	2085,00000000	210000
2210	2190	2180	2200	2210	2180	2195	2200	2210	2180	2210	2190	2190	2190	2190,00000000	2185,00000000	220000
2310	2290	2280	2300	2310	2280	2295	2300	2310	2280	2310	2290	2290	2290	2290,00000000	2285,00000000	230000
2410	2390	2380	2400	2410	2380	2395	2400	2410	2380	2410	2390	2390	2390	2390,00000000	2385,00000000	240000
2510	2490	2480	2500	2510	2480	2495	2500	2510	2480	2510	2490	2490	2490	2490,00000000	2485,00000000	250000

Obrázek 6.2: Vyhodnocovací algoritmus – hodnoty pro přední a zadní stranu beranu

Shodný postup se opakuje i pro levou a pravou stranu beranu. Zde jsou úchylkoměry rozmístěny podél osy y s roztečí 38 mm. Lineární regrese je tentokrát provedena pro hodnoty deformací naměřené na levé a pravé straně. Výsledkem jsou tedy opět pro každou zátěžnou sílu dvě hodnoty deformací (vlevo a vpravo) přepočítané do y-ové souřadnice vyšetřovaného bodu (v tomto případě:  $y = 95$  mm) Z těchto dvou získaných hodnot se následně další lineární regresi určí deformace v x-ové souřadnici vyšetřovaného bodu – tedy v působišti síly – DEFORAMCE 2 (viz obrázek 6.3).

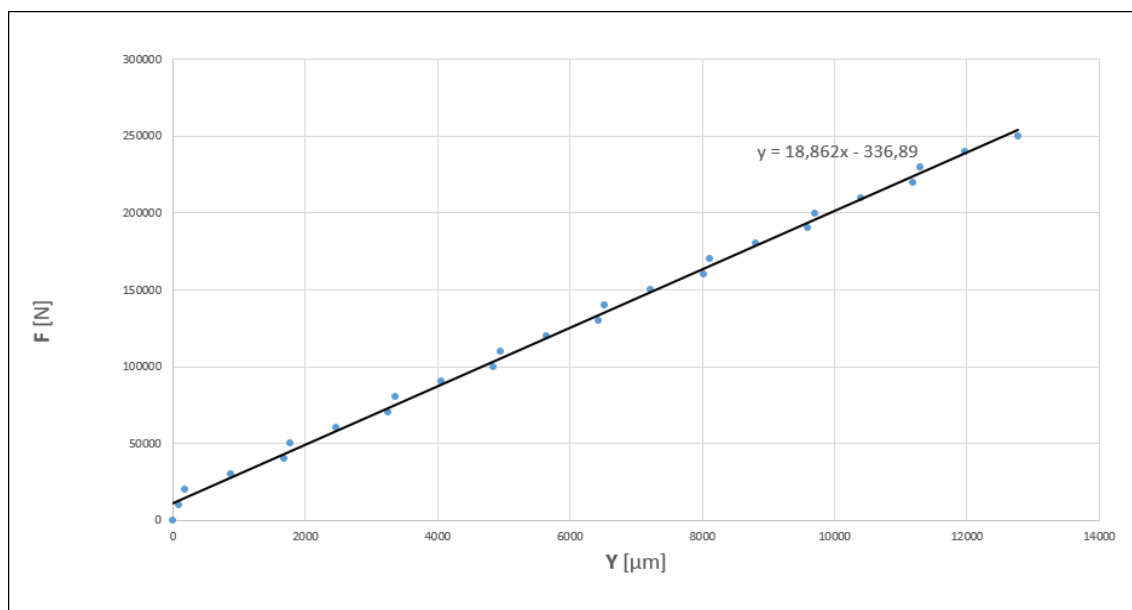
VLEVO							VPRAVO								
1	2	3	4	5	6		1	2	3	4	5	6			
0	38	76	114	152	190	Deformace vlevo [μm]	0	38	76	114	152	190	Deformace vpravo [μm]	DEFORMACE 2 [μm]	SÍLA [N]
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
110	90	70	100	80	100	91,66666667	80	110	70	80	90	90	86,66666667	89,16666667	10000
210	190	170	200	180	200	191,66666667	180	210	170	180	190	190	186,66666667	189,16666667	20000
920	880	840	900	860	900	883,33333333	860	920	840	860	880	880	873,33333333	878,33333333	30000
1730	1670	1610	1700	1640	1700	1675	1640	1730	1610	1640	1670	1670	1660	1667,5	40000
1830	1770	1710	1800	1740	1800	1775	1740	1830	1710	1740	1770	1770	1760	1767,5	50000
2540	2460	2380	2500	2420	2500	2456,666667	2420	2540	2380	2420	2460	2460	2446,666667	2456,666667	60000
3350	3250	3150	3300	3200	3300	3258,33333333	3200	3350	3150	3200	3250	3250	3233,33333333	3245,83333333	70000
3450	3350	3250	3400	3300	3400	3358,33333333	3300	3450	3250	3300	3350	3350	3333,33333333	3345,83333333	80000
4160	4040	3920	4100	3980	4100	4050	3980	4160	3920	3980	4040	4040	4020	4035	90000
4970	4830	4690	4900	4760	4900	4841,666667	4760	4970	4690	4760	4830	4830	4806,666667	4824,166667	100000
5070	4930	4790	5000	4860	5000	4941,666667	4860	5070	4790	4860	4930	4930	4906,666667	4924,166667	110000
5780	5620	5460	5700	5540	5700	5633,33333333	5540	5780	5460	5540	5620	5620	5593,33333333	5613,33333333	120000
6590	6410	6230	6500	6320	6500	6425	6320	6590	6230	6320	6410	6410	6380	6402,5	130000
6690	6510	6330	6600	6420	6600	6525	6420	6690	6330	6420	6510	6510	6480	6502,5	140000
7400	7200	7000	7300	7100	7300	7216,666667	7100	7400	7000	7100	7200	7200	7166,666667	7191,666667	150000
8210	7990	7770	8100	7880	8100	8008,33333333	7880	8210	7770	7880	7990	7990	7953,33333333	7980,83333333	160000
8310	8090	7870	8200	7980	8200	8108,33333333	7980	8310	7870	7980	8090	8090	8053,33333333	8080,83333333	170000
9020	8780	8540	8900	8660	8900	8800	8660	9020	8540	8660	8780	8780	8740	8770	180000
9830	9570	9310	9700	9440	9700	9591,666667	9440	9830	9310	9440	9570	9570	9526,666667	9559,166667	190000
9930	9670	9410	9800	9540	9800	9691,666667	9540	9930	9410	9540	9670	9670	9626,666667	9659,166667	200000
10640	10360	10080	10500	10220	10500	10383,33333333	10220	10640	10080	10220	10360	10360	10313,33333333	10348,33333333	210000
11450	11150	10850	11300	11000	11300	11175	11000	11450	10850	11000	11150	11150	11100	11137,5	220000
11550	11250	10950	11400	11100	11400	11275	11100	11550	10950	11100	11250	11250	11200	11237,5	230000
12260	11940	11620	12100	11780	12100	11966,666667	11780	12260	11620	11780	11940	11940	11886,666667	11926,666667	240000
13070	12730	12390	12900	12560	12900	12758,33333333	12560	13070	12390	12560	12730	12730	12673,33333333	12715,83333333	250000

Obrázek 6.3: Vyhodnocovací algoritmus – hodnoty pro levou a pravou stranu beranu

Výsledkem těchto procesů jsou tedy celkem dvě hodnoty deformací přepočtené do působišti síly (DEFORMACE 1, DEFORMACE 2). Pro získání optimálního výsledku jsou tyto hodnoty zprůměrovány a automaticky vyneseny do grafu v závislosti na zátěžné síle – obrázek 6.4, 6.5.

DEFORMACE 1 [μm]	DEFORMACE 2 [μm]	CELKOVÁ DEFORMACE [μm]	SÍLA [N]
0	0	0	0
95,8333333333	89,1666666667	92,5	10000
195,8333333333	189,1666666667	192,5	20000
891,6666666667	878,3333333333	885	30000
1687,5	1667,5	1677,5	40000
1787,5	1767,5	1777,5	50000
2483,3333333333	2456,6666666667	2470	60000
3279,1666666667	3245,8333333333	3262,5	70000
3379,1666666667	3345,8333333333	3362,5	80000
4075	4035	4055	90000
4870,8333333333	4824,1666666667	4847,5	100000
4970,8333333333	4924,1666666667	4947,5	110000
5666,6666666667	5613,3333333333	5640	120000
6462,5	6402,5	6432,5	130000
6562,5	6502,5	6532,5	140000
7258,3333333333	7191,6666666667	7225	150000
8054,1666666667	7980,8333333333	8017,5	160000
8154,1666666667	8080,8333333333	8117,5	170000
8850	8770	8810	180000
9645,8333333333	9559,1666666667	9602,5	190000
9745,8333333333	9659,1666666667	9702,5	200000
10441,6666666667	10348,3333333333	10395	210000
11237,5	11137,5	11187,5	220000
11337,5	11237,5	11287,5	230000
12033,3333333333	11926,6666666667	11980	240000
12829,1666666667	12715,8333333333	12772,5	250000

Obrázek 6.4: Vyhodnocovací algoritmus – výpočet celkové deformace (prac. prostor)



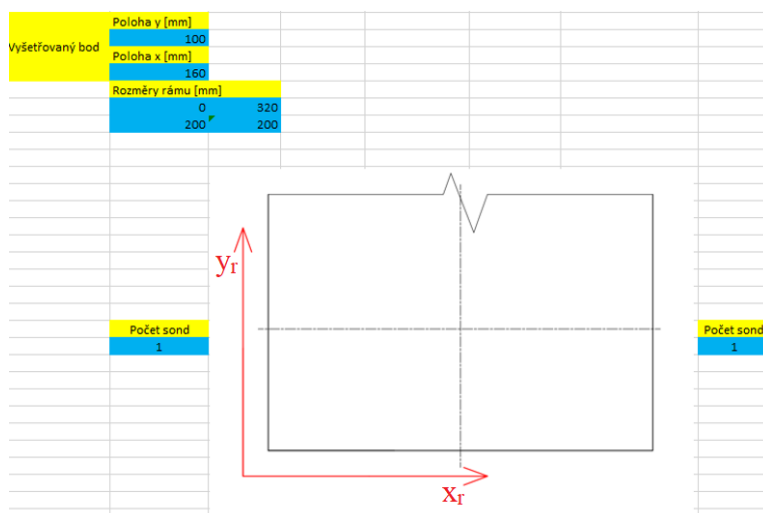
Obrázek 6.5: Vyhodnocovací algoritmus – zatěžovací charakteristika (pracovní prostor)

Celkovou tuhost pracovního prostoru lze určit z grafu jako směrnici přímky představující danou tuhostní charakteristiku. V tomto ilustrativním případě je tuhost  $k = 18,862 \text{ N}/\mu\text{m}$ . Při měření na reálném stroji by daná charakteristika neměla takto lineární podobu, za prvé by se na začátku projevilo vymezování vůlí mechanismu a za druhé by byl stroj proměřován několikrát za sebou, tudíž by docházelo k zatěžování a odlehčování. Charakteristika při zatěžování má mírně odlišný tvar (vypouklý) než při odlehčování (vydutý), tyto dvě fáze potom vlastně tvoří hysterenzní smyčku, výsledná tuhostní charakteristika pak prochází uprostřed.

Princip vyhodnocovacího algoritmu zde byl vysvětlen na příkladu měření šesti sondami na každé straně. Program je ale možné použít obecně pro 1-6 úchylkoměrů libovolně rozmístěných na příslušné straně beranu. Sondy je možné umístit buď na všechny čtyři strany, nebo jen na dvě protilehlé. Deformace lze přepočítat do libovolného místa plochy beranu, pouze při použití jedné sondy pro každou stranu (např. varianta s úchylkoměry ve středech stran) se souřadnice  $x$  a  $y$  vyšetřovaného místa logicky musí shodovat s umístěním sond na  $x$ -ové, respektive  $y$ -ové ose.

## 6.2 Algoritmus pro zpracování hodnot – rám

Deformace horní části rámu stroje se vyhodnocuje analogicky. Nejprve je třeba opět definovat rozměry rámu a zvolit bod, do kterého bude deformace přepočítávána – působí síla. V tomto případě se jedná o sílu v ose tváření, působí se tedy nachází ve středu horní části rámu. Podél každé strany rámu (levé a pravé) je možné umístit až šest úchylkoměrů. Zde, jelikož je určována pouze deformace uprostřed, byla pro jednoduchost zvolena varianta s jednou měřicí sondou ve středu každé strany – obrázek 6.6.



Obrázek 6.6: Vyhodnocovací algoritmus – určení počtu a umístění sond na rámu

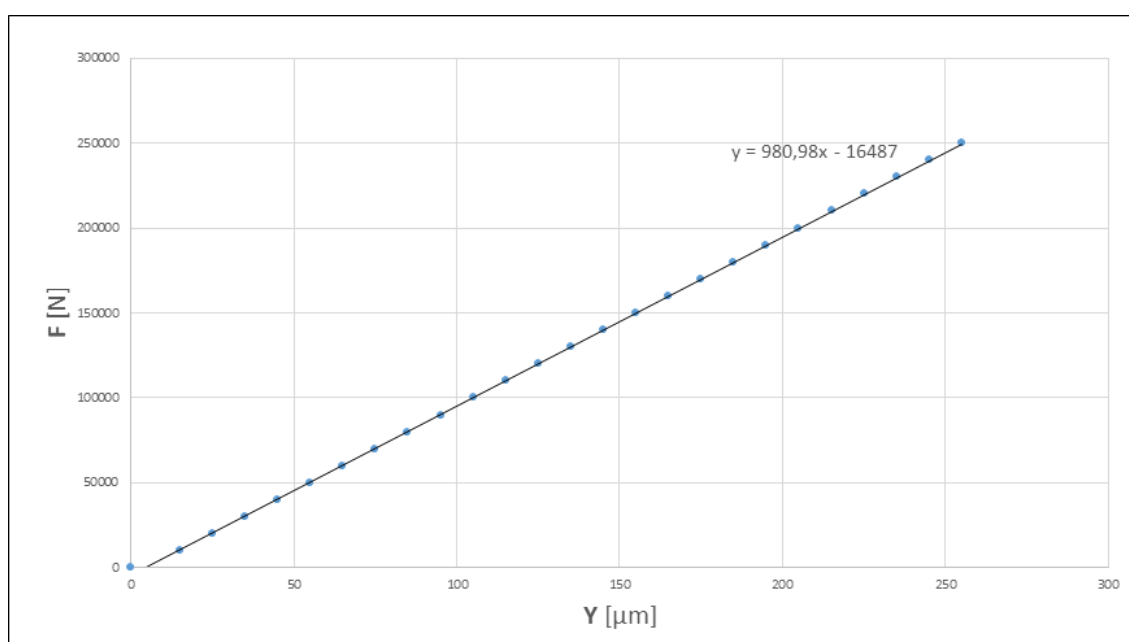
Zátěžná síla pro tento ilustrativní příklad byla zvolena opět od 0 do 250 kN, vždy po 10 kN.

Číslo sondy	VLEVO						VPRAVO						CELKOVÁ DEFORMACE [μm]	SÍLA [N]
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6		
Poloha y [mm]	100	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0		
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	20	0	0	0	0	0	20	10	0	0	0	0	10	15
	30	0	0	0	0	0	30	20	0	0	0	0	20	25
	40	0	0	0	0	0	40	30	0	0	0	0	30	35
	50	0	0	0	0	0	50	40	0	0	0	0	40	45
	60	0	0	0	0	0	60	50	0	0	0	0	50	55
	70	0	0	0	0	0	70	60	0	0	0	0	60	65
	80	0	0	0	0	0	80	70	0	0	0	0	70	75
	90	0	0	0	0	0	90	80	0	0	0	0	80	85
	100	0	0	0	0	0	100	90	0	0	0	0	90	95
	110	0	0	0	0	0	110	100	0	0	0	0	100	105
	120	0	0	0	0	0	120	110	0	0	0	0	110	115
	130	0	0	0	0	0	130	120	0	0	0	0	120	125
	140	0	0	0	0	0	140	130	0	0	0	0	130	135
	150	0	0	0	0	0	150	140	0	0	0	0	140	145
	160	0	0	0	0	0	160	150	0	0	0	0	150	155
	170	0	0	0	0	0	170	160	0	0	0	0	160	165
	180	0	0	0	0	0	180	170	0	0	0	0	170	175
	190	0	0	0	0	0	190	180	0	0	0	0	180	185
	200	0	0	0	0	0	200	190	0	0	0	0	190	195
	210	0	0	0	0	0	210	200	0	0	0	0	200	205
	220	0	0	0	0	0	220	210	0	0	0	0	210	215
	230	0	0	0	0	0	230	220	0	0	0	0	220	225
	240	0	0	0	0	0	240	230	0	0	0	0	230	235
	250	0	0	0	0	0	250	240	0	0	0	0	240	245
	260	0	0	0	0	0	260	250	0	0	0	0	250	255

Obrázek 6.7: Vyhodnocovací algoritmus – výpočet celkové deformace (rám)



Princip výpočtu je stejný jako při vyhodnocování deformace pracovního prostoru. Nejprve je provedena lineární regrese hodnot deformací naměřených vlevo a vpravo a tyto hodnoty jsou přepočítány do středu příslušné strany. V tomto případě, kdy je na každé straně uprostřed umístěn pouze jeden úchylkoměr, je jím naměřená hodnota zároveň i hledanou hodnotou ve středu strany. Dalším krokem je přepočet deformací vlevo a vpravo do působíště síly. Zde síla působí uprostřed dané části rámu, výsledná deformace je tedy pouze průměrem hodnot vlevo a vpravo. Výsledkem je graf závislosti celkové deformace rámu na příslušné zatěžovací síle – obrázek 6.8.



Obrázek 6.8: Vyhodnocovací algoritmus – zatěžovací charakteristika (rám)

Tuhost rámu zde představuje směrnice dané tuhostní charakteristiky. V tomto ilustrativním případě je tuhost  $k = 980,98 \text{ N}/\mu\text{m}$ . Při reálném měření by byl stroj opět zatěžován několikrát za sebou, a tudíž by se projevil dříve popsany rozdíl charakteristiky při zatěžování a odlehčování.

Pro určení deformace spodní části rámu (stolu) je možné použít buď část programu pro rám, nebo pro pracovní prostor v závislosti na umístění měřicích sond. Postup bude shodný. Z kapitoly 9 však vyplývá, že deformace stolu je (alespoň u lisu LEN 25 a podobných) oproti pracovnímu prostoru a horní části rámu zanedbatelná a není nutné ji uvažovat.

## 7 Měřicí aparatura

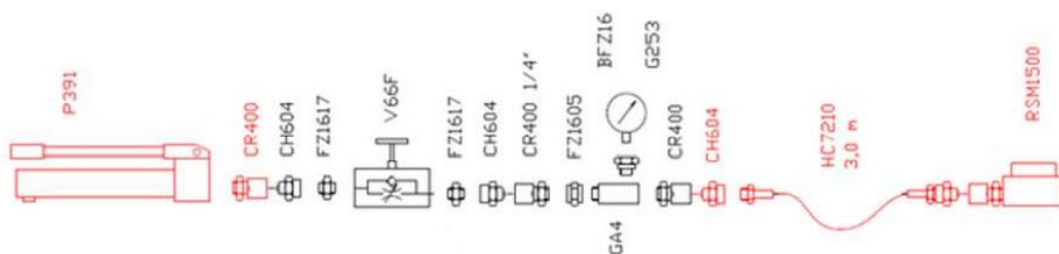
Měřicí aparatura se skládá z několika částí. K samotnému měření deformací slouží stojánky s úchylkoměry uchycené na nezávislý rám. Na vyvození síly je použit hydraulický válec opatřený tenzometrickým kroužkem pro snímání síly a kulovým kloubem pro přenos síly na beran. Nezávislým rámem ani přípravkem pro vyvození síly se tato práce detailněji nezabývá, neboť tyto komponenty byly již navrženy dříve a pro vlastní měření již byly plně k dispozici.

Několik inovací bylo provedeno na sestavě pro přívod tlaku do hydraulického válce a zcela novou částí je pak návrh zvláštní aparatury pro posuv válce v pracovním prostoru při měření excentrického zatěžování.

### 7.1 Aparatura pro přívod tlaku

Přívod tlaku do hydraulického válce se realizuje přes hydraulický obvod napojený na ruční čerpadlo. Do tohoto obvodu je vhodné umístit také manometr. Z naměřené hodnoty tlaku a velikosti plochy hydraulického válce je možné dopočítat velikost zatěžovací síly, která by se měla ideálně shodovat s hodnotou naměřenou tenzometrickým kroužkem umístěným na válci. Paralelní snímání síly a tlaku tedy slouží především pro kontrolu, zda je tenzometrický snímač správně zkalibrován, případně, zda v aparatuře nedochází k úniku tlaku.

Schéma původní sestavy je zobrazeno na obrázku 7.1. Na ruční čerpadlo je zde pomocí rychlospojek připojen škrticí ventil a následně manometr, který je pomocí hadice napojen na hydraulický válec.



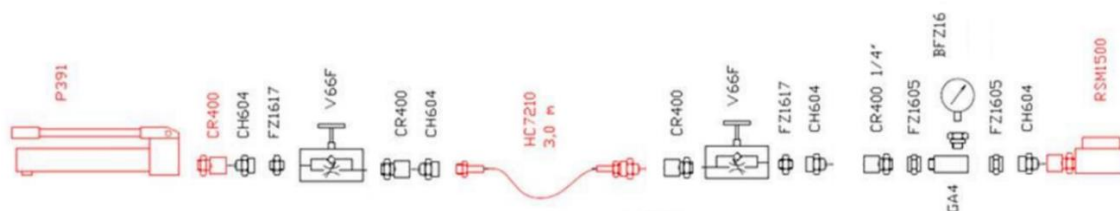
Obrázek 7.1: Schéma původní aparatury pro přívod tlaku [3]

Cílem mé práce bylo tuto aparaturu zdokonalit, doplnit o další prvky a učinit ji více univerzální, aby bylo možné jednotlivé prvky pospojovat v různých konfiguracích podle toho, jak to uživateli vyhovuje.

Nový hydraulický obvod je na obrázku 7.2 a skládá se z šesti částí. Na začátku je opět ruční čerpadlo, na které navazuje škrticí ventil, který je ale nyní opatřen rozdílnou koncovkou rychlospojky na každé straně a je připojen přímo na hadici. Tento škrticí ventil slouží k udržení tlaku v aparatuře, pokud by bylo v průběhu měření potřeba např. vyměnit čerpadlo za menší.

Za hadicí je vložen ještě jeden škrticí ventil, tentokrát v opačném směru. Přiškrcení tohoto ventilu by mělo pomoci k vyhlazování tlakových pulzací, které při natlakování vznikají. Zatímco v neseškrceném stavu není nárůst tlaku zcela rovnoměrný (při záběru čerpadla vznikne nejprve tlaková špička a potom následuje propad), mírným seškrcením proudu dojde ke snížení tlaku za ventilem, čímž se sníží tlaková špička. Mírný přetlak před ventilem potom zase pomáhá dorovnat tlakový propad. Použitím druhého škrticího ventilu je tedy dosaženo rovnoměrnějšího zvyšování tlaku a závislost hodnoty tlaku na čase je více lineární.

Snímač tlaku je tentokrát umístěn až těsně před hydraulický válec, aby co nejlépe reflektoval tlak přímo ve válci, který pak vyvolává zátěžnou sílu.



Obrázek 7.2: Schéma nové aparatury pro přívod tlaku

Celá aparatura je navržena tak, aby bylo možné v případě potřeby snadno zaměnit pořadí jednotlivých částí, případně některý prvek odebrat/přidat. Je možné např. umístit snímač tlaku do jiného místa obvodu, případně použít více snímačů v různých místech, druhý škrticí ventil je možné odebrat apod. Uživateli je tak umožněno sestavit z dostupných prvků velké množství variant daného hydraulického obvodu.

Fotografie jednotlivých částí aparatury i s jejich schematickým zobrazením jsou uvedeny v tabulce 7.1 v pořadí, ve kterém byly za sebou pospojovány.

		<p>Ruční jednočinné čerpadlo P-391</p>
		<p>Jehlový ventil s obtokem V-66F</p>
		<p>Termoplast. hadice 3,0 m HC-7210C</p>
		<p>Jehlový ventil s obtokem V-66F</p>
		<p>Glycerínový manometr 0-700 bar G-2535L</p>
		<p>Hydraulický válec RSM - 1500</p>

Tabulka 7.1: Prvky hydraulického obvodu pro přívod tlaku

## 7.2 Aparatura pro excentrický posuv

Pro získání grafu dovoleného zatěžování je nutné proměřit několik bodů v určité vzdálenosti od osy na každé straně. Proto je třeba zajistit možnost posouvání přípravku na vyvození síly ve směru šířky stolu stroje. Posun musí být možné provádět na obě dvě strany, vždy o určitou přesně danou vzdálenost.

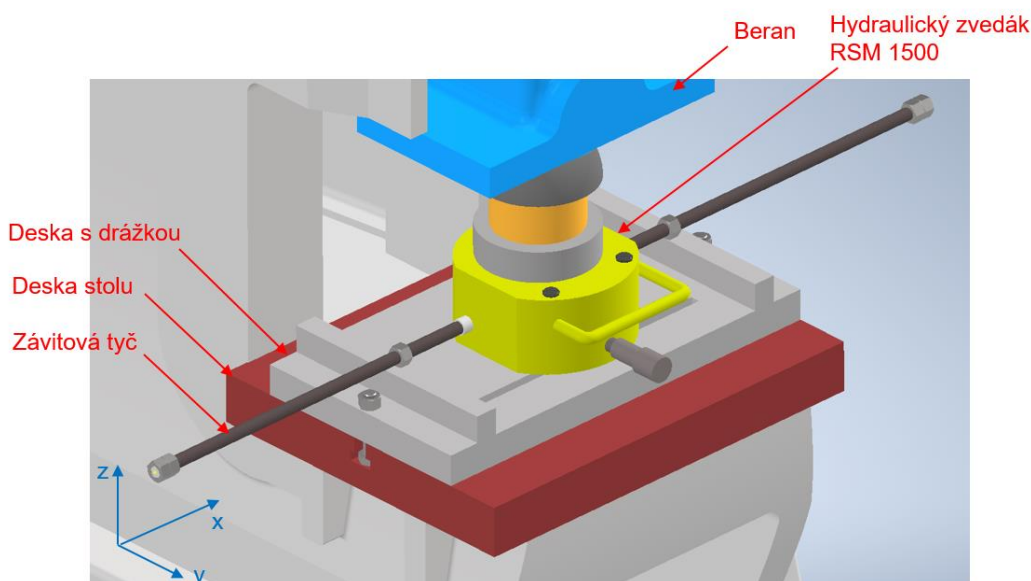
Jelikož přesná ruční manipulace je vzhledem k hmotnosti válce značně obtížná, byla pro tento účel navržena speciální aparatura umožňující snadný posuv a odměřování polohy válce v pracovním prostoru.

Sestava byla navržena ve dvou variantách, přičemž druhá varianta je finální, která byla nakonec při měření reálně použita.

### 1. varianta

V první variantě (obrázek 7.3) se počítá s pomocnou deskou upnutou na stůl stroje, ve které je vyfrézována drážka, která slouží jako vodící drážka pro hydraulický válec. Ten obsahuje průchozí díry, jimiž je možné prostrčit do drážky čepy, jejichž průměr je zároveň shodný s šířkou drážky. Tím je zajištěna poloha válce v ose  $y$  a jeho pohyb je následně možný pouze v ose  $x$  – po šířce stolu.

K samotnému posuvu slouží dvě závitové tyče M16 umístěné v maticích navařených na desce. Otočením tyče o jednu otáčku se celá tyč posune v ose  $x$  o hodnotu stoupání závitu (2 mm). Hrot tyče opatřený krytkou pak zároveň tlačí dopředu i hydraulický válec, na němž jsou umístěny prvky pro přenos a snímání síly. Na pomocné desce s drážkou je vhodné mít na obě strany vyznačenou stupnici s optimálním délkovým krokem.



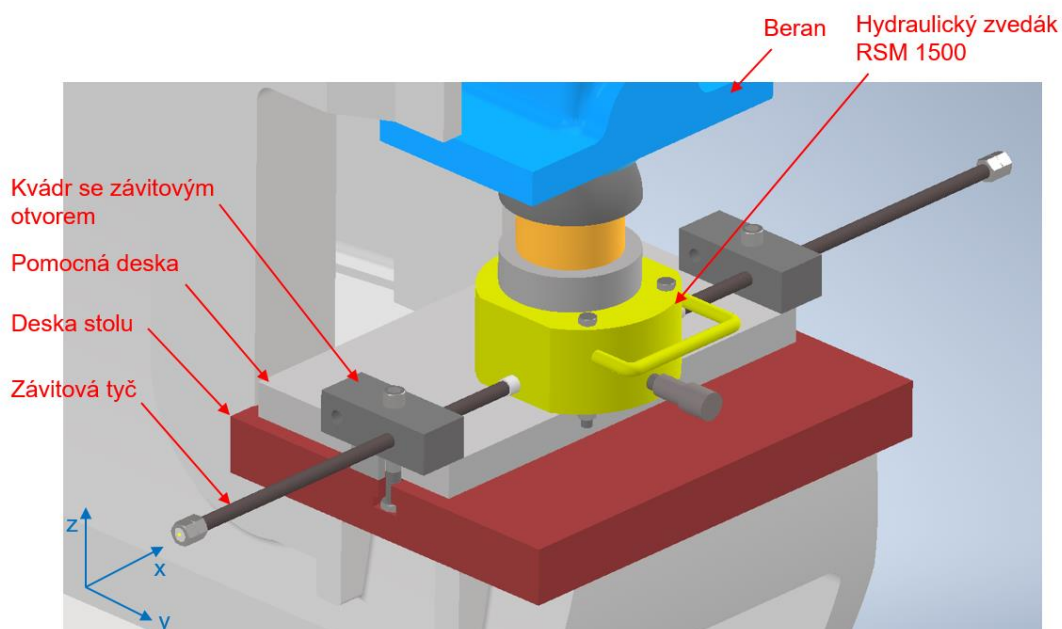
Obrázek 7.3: Aparatura pro excentrický posuv – 1. varianta

## 2. varianta

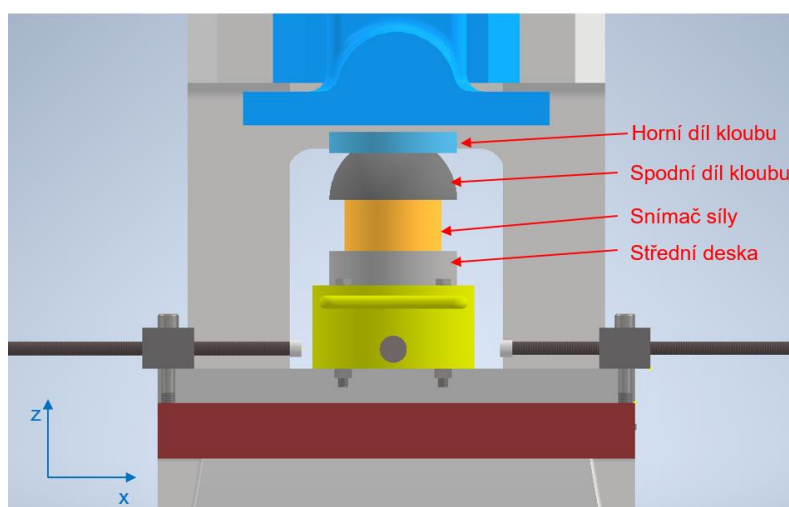
Druhá varianta (obrázky 7.4, 7.5, 7.6) funguje v principu stejně jako první, vzhledem k omezeným výrobním možnostem byly však pozměněny některé dílčí části.

Místo desky s drážkou byla použita obyčejná deska umístěná tak, aby její okraj sloužil jako vedení pro válec. Místo vodících čepů byly skrz otvory válce prostrčeny šrouby zajištěné na druhé straně maticemi. Tyto matice byly natočeny tak, aby plocha jejich strany byla rovnoběžná s okrajem desky a byl tak zajištěn plošný kontakt strany matice a desky.

Na desku také nebyly navařeny matice jako v první variantě, ale byly místo nich použity kvádry se závitovými otvory, které byly společně s deskou upnuty ke stolu.



Obrázek 7.4: Aparatura pro excentrický posuv – 2. varianta



Obrázek 7.5: Aparatura pro excentrický posuv – 2. varianta (rovina xz)





Obrázek 7.6: Fotografie aparatury pro excentrický posuv

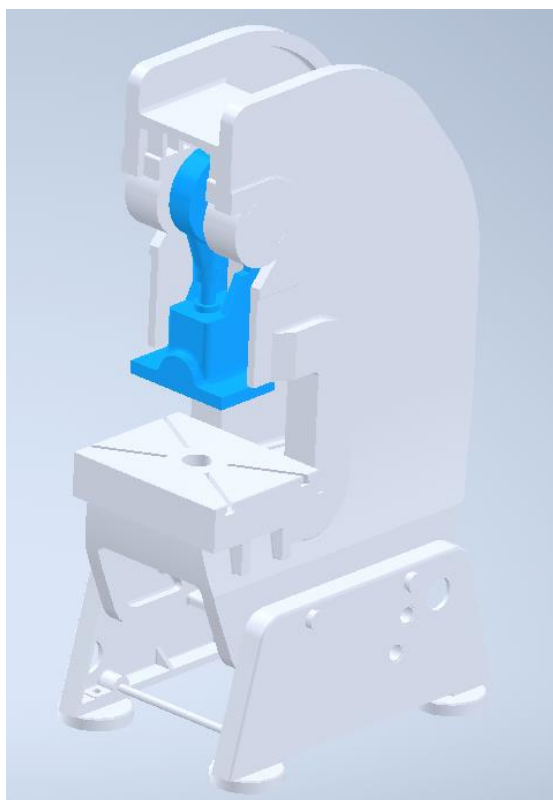
Výhodou obou variant této aparatury je především fakt, že délkový krok posuvu je v podstatě libovolně nastavitelný. Jelikož lze předpokládat, že vliv excentricity na dovolené zatížení se začne výrazněji projevovat až v určité vzdálenosti od osy, bylo by nepraktické, aby všechny měřicí polohy byly od sebe vzdáleny o stejnou hodnotu. Posun pomocí závitové tyče umožňuje zvolit delší krok mezi jednotlivými polohami v oblasti, kde se velikost dovolené síly příliš nemění a naopak jemnější krok v místě, kde se začne uplatňovat vliv excentricity a dovolená síla začne klesat.

Sestavný výkres 2. varianty aparatury pro excentrický posuv se nachází v přílohách práce.

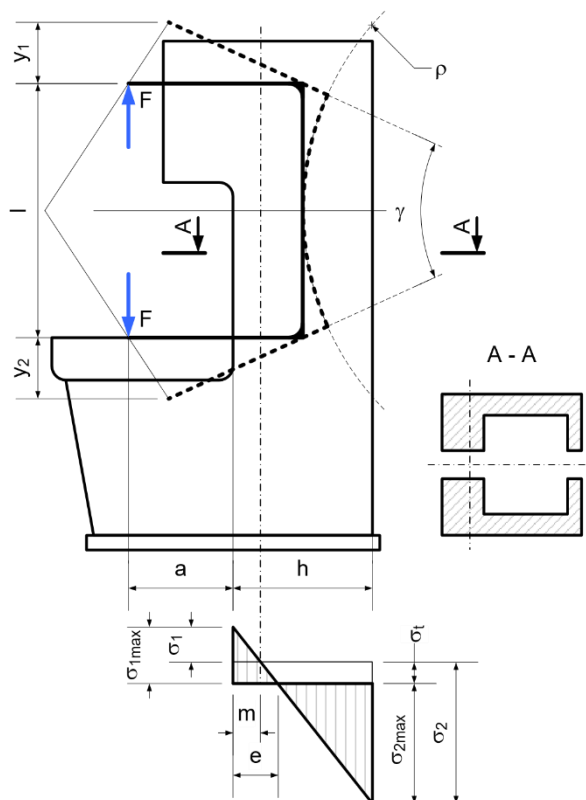
## 8 Analytický výpočet lisu LEN 25

Před samotným měřením na lisu, kterým se zabývá další část této práce, byl proveden rovněž analytický výpočet tuhosti rámu. Takto zjištěnou hodnotu deformace je výhodné znát předem, protože může poskytnout alespoň řádovou představu o tom, jak velké deformace lze očekávat a podle toho se pak může modifikovat měřicí aparatura – použití měřidel s vhodným rozsahem.

K dispozici byl 3D model stroje – viz obr. 8.1. Jedná se o výstředníkový lis LEN 25 s otevřeným rámem se jmenovitou silou 250 kN a nastavitelností zdvihu 8 - 85 mm. Vzhledem ke složitosti geometrie rámu byl pro analytický výpočet použit zjednodušený výpočtový model rámu s přímou stojinou (obrázek 8.2).



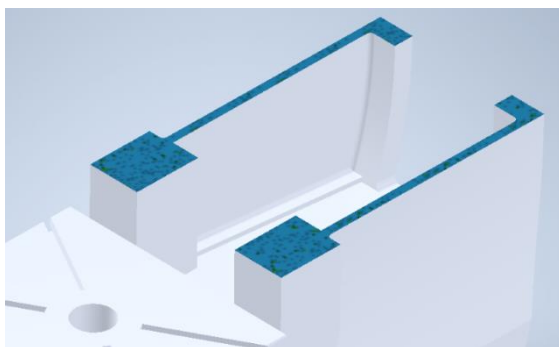
Obrázek 8.1: 3D model lisu



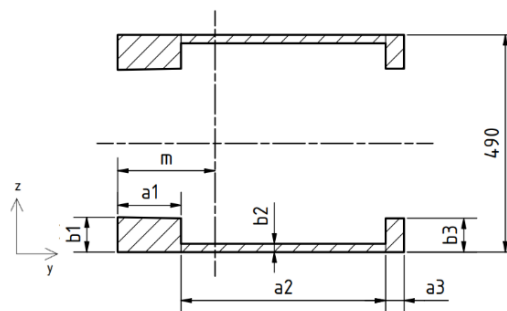
Obrázek 8.2: Výpočtový model lisu pro analytický výpočet

V 3D modelu stroje byl proveden řez stojanem lisu (obrázky 8.3 a 8.4), z něhož byly odečteny rozměry nutné pro výpočet průřezových charakteristik. Všechny potřebné rozměry a vstupní parametry lisu jsou uvedeny v tabulce 8.1.





Obrázek 8.3: Řez stojinou rámu (3D)



Obrázek 8.4: Průřez stojiny rámu (2D)

Parametry lisu	
F [N]	250000
h [mm]	700
a [mm]	225
l [mm]	900
Parametry průřezu stojiny	
$a_1$ [mm]	155
$b_1$ [mm]	85
$a_2$ [mm]	500
$b_2$ [mm]	20
$a_3$ [mm]	45
$b_3$ [mm]	82,5

Tabulka 8.1: Parametry lisu [15]

Pro další výpočty bylo nutné určit plochy jednotlivých částí průřezu a vypočítat polohu těžiště stojanu – rovnice (8.1) až (8.5).

Plochy částí průřezu 1 – 4:

$$S_1 = a_1 \cdot b_1 = 155 \cdot 85 = 13175 \text{ mm}^2 \quad (8.1)$$

$$S_2 = a_2 \cdot b_2 = 500 \cdot 20 = 10000 \text{ mm}^2 \quad (8.2)$$

$$S_3 = a_3 \cdot b_3 = 45 \cdot 82,5 = 3712,5 \text{ mm}^2 \quad (8.3)$$

Celková plocha průřezu:

$$S = 2 \cdot (S_1 + S_2 + S_3) = 53776 \text{ mm}^2 \quad (8.4)$$

Poloha těžiště:

$$m = \frac{S_1 \cdot \frac{a_1}{2} + S_2 \cdot \left(a_1 + \frac{a_2}{2}\right) + S_3 \cdot \left(a_1 + a_2 + \frac{a_3}{2}\right)}{S_1 + S_2 + S_3} = 282,15 \text{ mm} \quad (8.5)$$

Dále následoval výpočet kvadratických momentů jednotlivých dílčích částí průřezu, z nichž se poté určil celkový kvadratický moment průřezu stojiny.

Určení kvadratického momentu průřezu stojiny:

$$\begin{aligned} J_{z1} &= \frac{1}{12} \cdot b_1 \cdot a_1^3 + S_1 \cdot \left(m - \frac{a_1}{2}\right)^2 \\ &= \frac{1}{12} \cdot 85 \cdot 155^3 + 13175 \cdot \left(282,15 - \frac{155}{2}\right)^2 \\ &= 578167824,4 \text{ mm}^4 \end{aligned} \quad (8.6)$$

$$\begin{aligned} J_{z2} &= \frac{1}{12} \cdot b_2 \cdot a_2^3 + S_2 \cdot \left(a_1 + \frac{a_2}{2} - m\right)^2 \\ &= \frac{1}{12} \cdot 20 \cdot 500^3 + 10000 \cdot \left(155 + \frac{500}{2} - 282,15\right)^2 \\ &= 359254558,3 \text{ mm}^4 \end{aligned} \quad (8.7)$$

$$\begin{aligned} J_{z3} &= \frac{1}{12} \cdot b_3 \cdot a_3^3 + S_3 \cdot \left(a_1 + a_2 + \frac{a_3}{2} - m\right)^2 \\ &= \frac{1}{12} \cdot 82,5 \cdot 45^3 + 3712,5 \cdot \left(655 + \frac{45}{2} - 282,15\right)^2 \\ &= 580896257,9 \text{ mm}^4 \end{aligned} \quad (8.8)$$

$$J = 2. (J_{z1} + J_{z2} + J_{z3}) = 3036637281 \text{ mm}^4 \quad (8.9)$$

Následně byly provedeny výpočty dle teorie popsané v kapitole 4.1. Pro součinitel tvaru stojanu  $\xi$ , který se má pohybovat mezi 0,7 až 1,3 byla v rovnici (8.15) zvolena hodnota  $\xi=0,7$ .

Ohybový moment stojiny k její střednici:

$$M = F. (a + m) = 250000. (225 + 282,15) = 126787500 \text{ N} \cdot \text{mm} \quad (8.10)$$

Napětí v tahu a ohybu:

$$\sigma_t = \frac{F}{S} = \frac{250000}{53776} = 4,6489 \text{ N/mm}^2 \quad (8.11)$$

$$\sigma_1 = \frac{M \cdot m}{J} = \frac{126787500 \cdot 282,15}{3036637281} = 11,7805 \text{ N/mm}^2 \quad (8.12)$$

$$\sigma_2 = \frac{M \cdot (h-m)}{J} = \frac{126787500 \cdot (700-282,15)}{3036637281} = 17,4463 \text{ N/mm}^2 \quad (8.13)$$

Poloha neutrální osy:

$$e = h \cdot \frac{\sigma_t + \sigma_1}{\sigma_1 + \sigma_2} = 700 \cdot \frac{4,6489 + 11,7805}{11,7805 + 17,4463} = 393,49 \text{ mm} \quad (8.14)$$

Zakřivení neutrální osy:

$$\rho = \xi \cdot \frac{E \cdot J}{M} = 0,7 \cdot \frac{210000 \cdot 3036637281}{126787500} = 3520738,88 \text{ mm} \quad (8.15)$$

Celková deformace:

$$y = y_1 + y_2 = \frac{l \cdot (a+e)}{\rho} = \frac{900 \cdot (225+393,49)}{3520738,88} = 0,1581 \text{ mm} \quad (8.16)$$

Tuhost rámu:

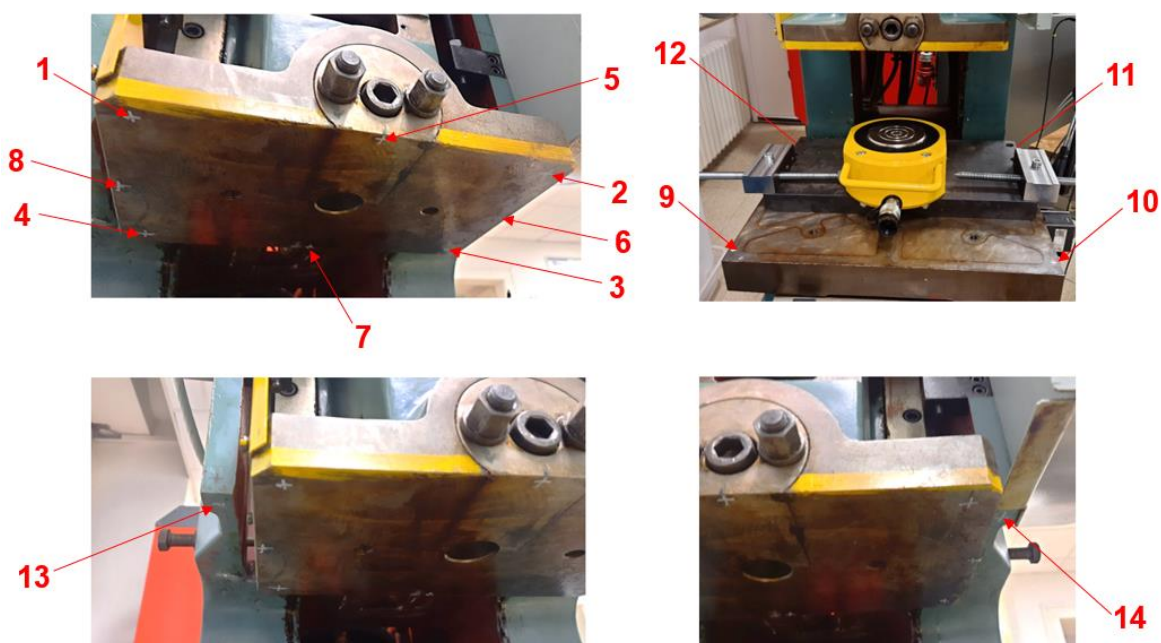
$$k_r = \frac{F}{y} = \frac{250000}{0,1581} = 1581277,7 \text{ N/mm} \doteq 1581,3 \text{ kN/mm} \quad (8.17)$$

## 9 Výsledky měření

Vlastní měření na výstředníkovém lisu LEN 25 se skládalo ze čtyř částí – měření deformace pracovního prostoru, měření deformace horní části rámu, měření deformace stolu a měření dovoleného excentrického zatěžování.

Pro měření deformací byly použity digitální úchylkoměry se základnou na nezávislém rámu (obrázek 9.2). Na stroji bylo vyznačeno celkem 14 měřících bodů, označených na obrázku 9.1, ve kterých byly umístěny hroty sond.

V pracovním prostoru stroje byl umístěn přípravek na vyvození síly napojený na tlakovací aparaturu (kapitola 7.1) a na aparaturu pro excentrický posuv (kapitola 7.2)



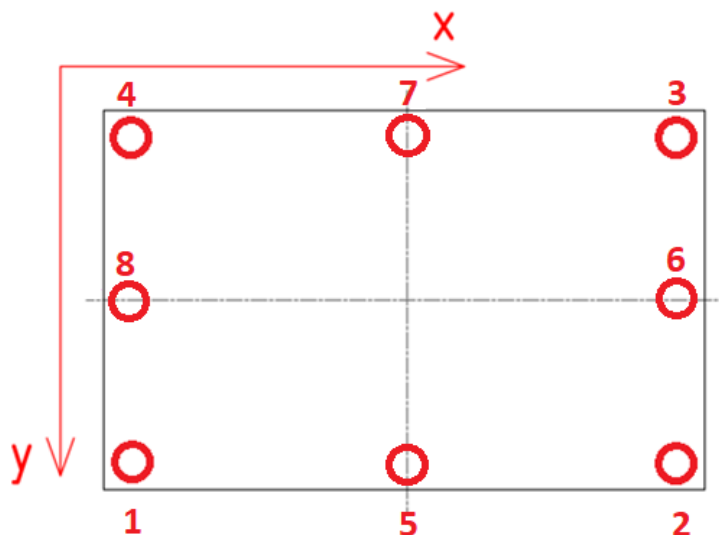
Obrázek 9.1: Polohy měřících sond



Obrázek 9.2: Upnutí úchylkoměrů na nezávislém rámu

## 9.1 Měření deformace pracovního prostoru

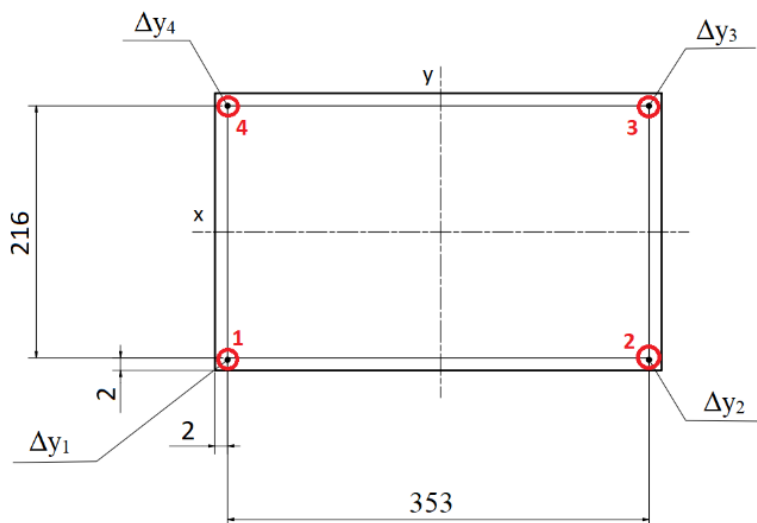
Deformace pracovního prostoru byla měřena ve čtyřech variantách popsaných v kapitole 4. Na beranu bylo vyznačeno celkem 8 pracovních bodů, ve kterých postupně probíhalo měření (obrázek 9.3).



Obrázek 9.3: Poloha měřicích sond na beranu

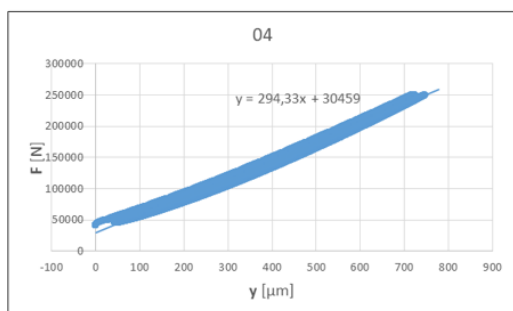
### 9.1.1 1. varianta

V první variantě byla deformace měřena ve čtyřech pracovních bodech 1-4, umístěných v rozích beranu (obrázek 9.4). Nejprve bylo provedeno několik zkušebních zatížení pro vymezení vůlí a poté byl stroj postupně pětkrát za sebou zatěžován silou od zhruba 50 kN až do velikosti jmenovité síly lisu 250 kN.

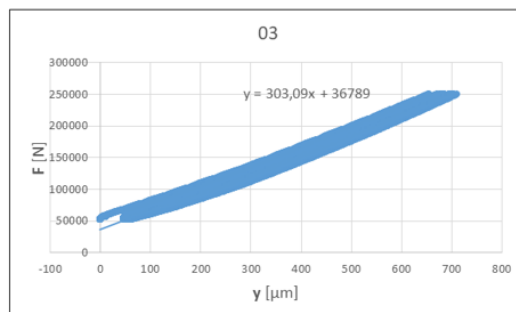


Obrázek 9.4: Poloha měřicích sond na beranu – 1. varianta

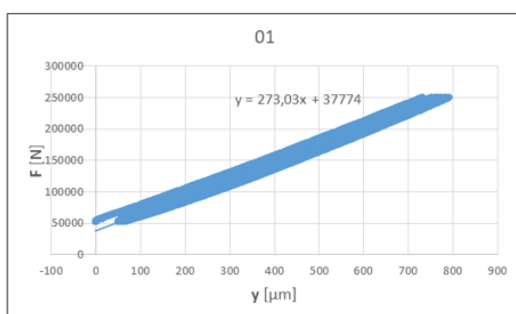
Jelikož byly k dispozici pouze tři úchylkoměry, nemohly být všechny deformace měřeny současně. Nejprve byly proto naráz proměřeny body 1-3 a poté se měření opakovalo pro bod 4 zvlášť. V každém bodě byla tedy získána dílčí zatěžovací charakteristika a tuhost (obrázek 9.5).



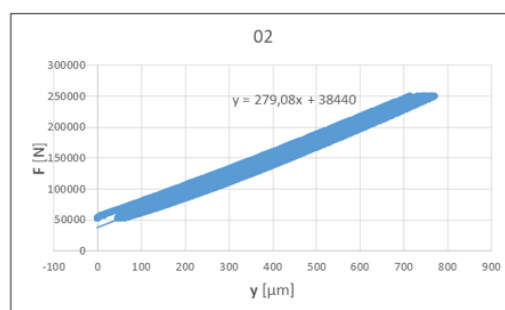
$$\Delta y_{4(250)} = 745,9 \mu\text{m} \quad \Delta y_{4(50)} = 66,39 \mu\text{m} \quad F_0 = 50\,000 \text{ N}$$



$$\Delta y_{3(250)} = 703,46 \mu\text{m} \quad \Delta y_{3(50)} = 43,59 \mu\text{m} \quad F_0 = 50\,000 \text{ N}$$



$$\Delta y_{1(250)} = 777,3 \mu\text{m} \quad \Delta y_{1(50)} = 44,78 \mu\text{m} \quad F_0 = 50\,000 \text{ N}$$



$$\Delta y_{2(250)} = 758,06 \mu\text{m} \quad \Delta y_{2(50)} = 41,42 \mu\text{m} \quad F_0 = 50\,000 \text{ N}$$

Obrázek 9.5: Zatěžovací charakteristiky v jednotlivých měřených bodech – 1. varianta

Z rovnic zatěžovacích charakteristik 1-4 bylo poté možné získat pro každý ze čtyř bodů hodnotu deformace vzniklé při zatížení jmenovitou silou 250 kN. Vzhledem k tomu, že při této konfiguraci přepočít jednotlivých deformací doprostřed beranu odpovídá prostému aritmetickému průměru hodnot  $\Delta y_1 \dots \Delta y_4$ , byla výsledná deformace při jmenovité síle určena jako:

$$\Delta y = \Delta y_{250} - \Delta y_{50} \tag{9.1}$$

$$= \frac{\Delta y_{1(250)} + \Delta y_{2(250)} + \Delta y_{3(250)} + \Delta y_{4(250)}}{4} - \frac{\Delta y_{1(50)} + \Delta y_{2(50)} + \Delta y_{3(50)} + \Delta y_{4(50)}}{4}$$

$$= \frac{777,3 + 758,06 + 703,46 + 745,9}{4} - \frac{44,78 + 41,42 + 43,59 + 66,39}{4}$$

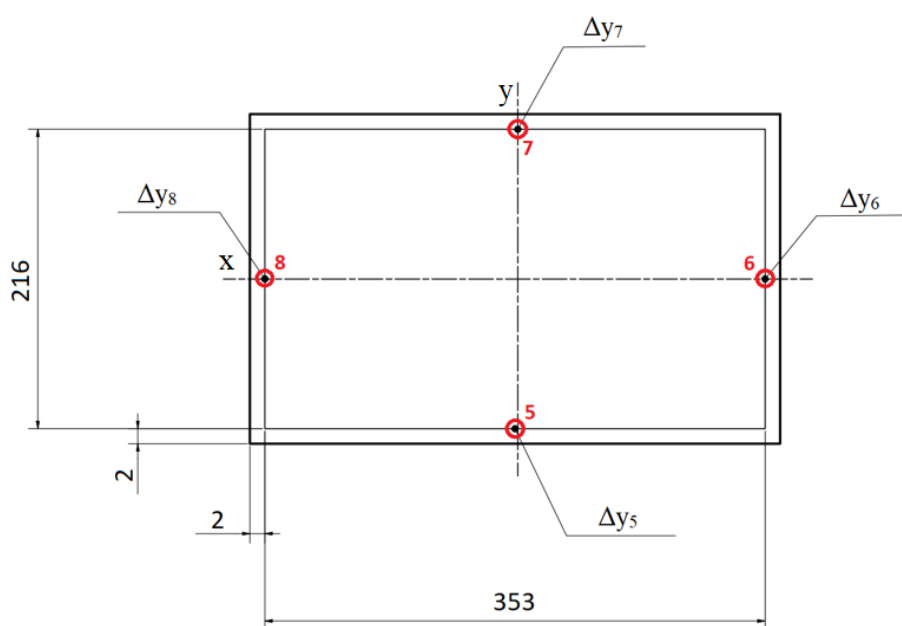
$$= 697,135 \mu\text{m}$$

Hledaná celková tuhost pracovního prostoru určená podle 1. varianty je potom rovna:

$$k_c = \frac{F_j - F_0}{\Delta y} = \frac{250000 - 50000}{697,135} = 286,9 \text{ kN/mm} \quad (9.2)$$

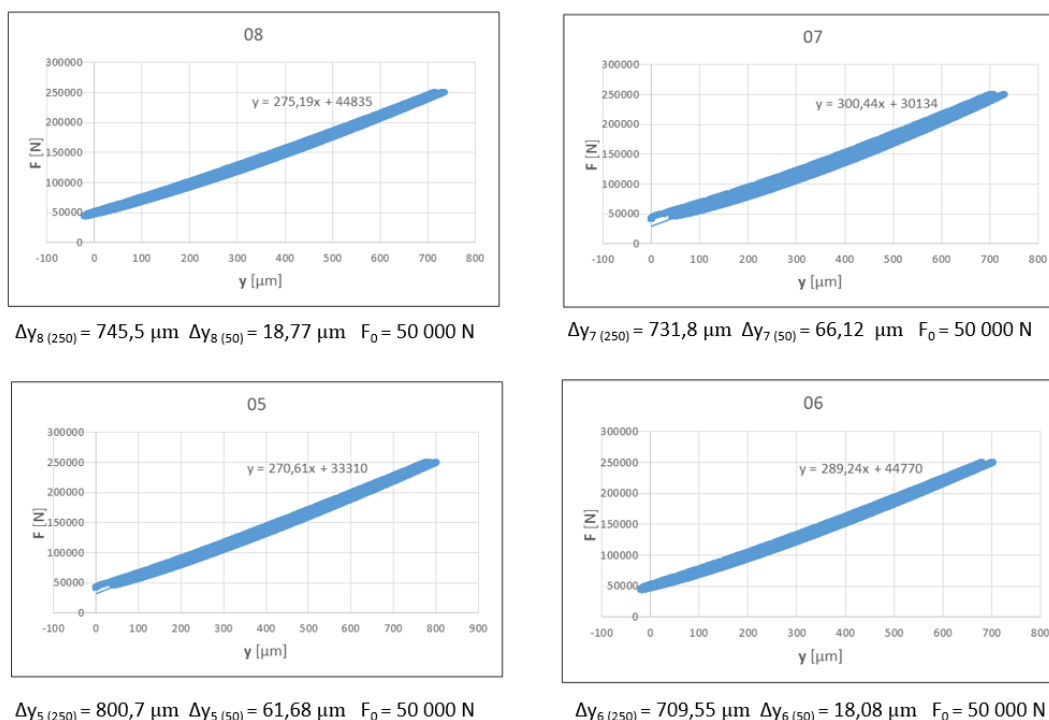
### 9.1.2 2. varianta

Měření podle druhé varianty probíhalo analogicky k první variantě. Změnila se pouze poloha měřicích sond, které se tentokrát nacházely ve středech stran beranu v bodech 5- 8 (obrázek 9.6)



Obrázek 9.6: Poloha měřicích sond na beranu – 2. varianta

Protože opět nebylo možné současné zapojení všech čtyř úchylkoměrů, bylo měření znovu provedeno postupně – nejprve náraz body 5 a 7, poté body 6 a 8 (obrázek 9.7)



Obrázek 9.7: Zatěžovací charakteristiky v jednotlivých měřených bodech – 2. varianta

Celková deformace při jmenovité síle byla opět určena jako aritmetický průměr hodnot dílčích deformací získaných z rovnic jednotlivých zatěžovacích charakteristik v bodech 5-8.

$$\Delta y = \Delta y_{250} - \Delta y_{50} \quad (9.3)$$

$$= \frac{\Delta y_{5(250)} + \Delta y_{6(250)} + \Delta y_{7(250)} + \Delta y_{8(250)}}{4} - \frac{\Delta y_{5(50)} + \Delta y_{6(50)} + \Delta y_{7(50)} + \Delta y_{8(50)}}{4}$$

$$= 705,725 \mu\text{m}$$

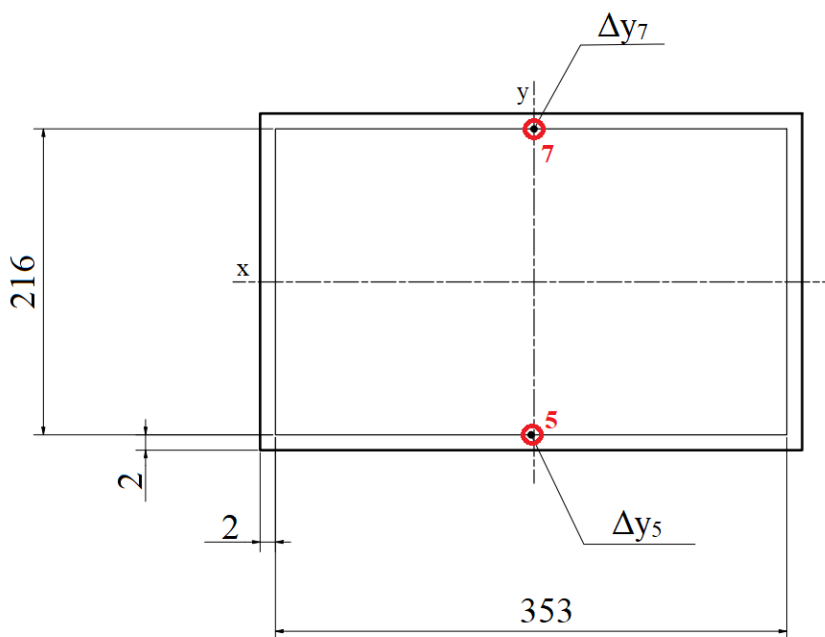
Výsledná celková tuhost pracovního prostoru určená podle 2. varianty pak vychází:

$$k_c = \frac{F_j - F_0}{\Delta y} = \frac{250000 - 50000}{705,725} = 283,4 \text{ kN/mm} \quad (9.4)$$



### 9.1.3 3. varianta

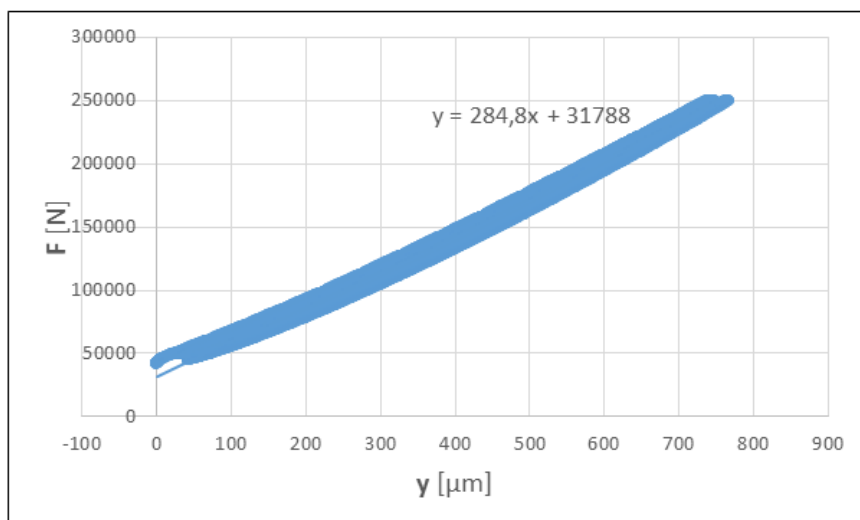
Ve třetí variantě probíhalo měření deformace pouze v bodech 5 a 7 (obrázek 9.8). Díky tomu, že tentokrát byly použity pouze dvě sondy, bylo možné měření provést najednou. Stroj byl tedy opakovaně zatěžován silou do velikosti jmenovité síly a při tomto zatěžování byly současně měřeny deformace ve středu přední a zadní strany.



Obrázek 9.8: Poloha měřících sond na beranu – 3. varianta

K určení výsledné deformace uprostřed byl použit navržený výpočtový program, popsáný v kapitole 5.

Vzhledem k tomu, že byly oba body zatěžovány a měřeny najednou, nebylo tentokrát nutné provádět superpozici jednotlivých zatěžovacích charakteristik. Naměřené deformace pro každou hodnotu zátěžné síly byly rovnou přepočítány do středu. Vynesením závislosti zjištěné středové deformace na zátěžné síle vznikla výsledná zatěžovací charakteristika zobrazená na obrázku 9.9.



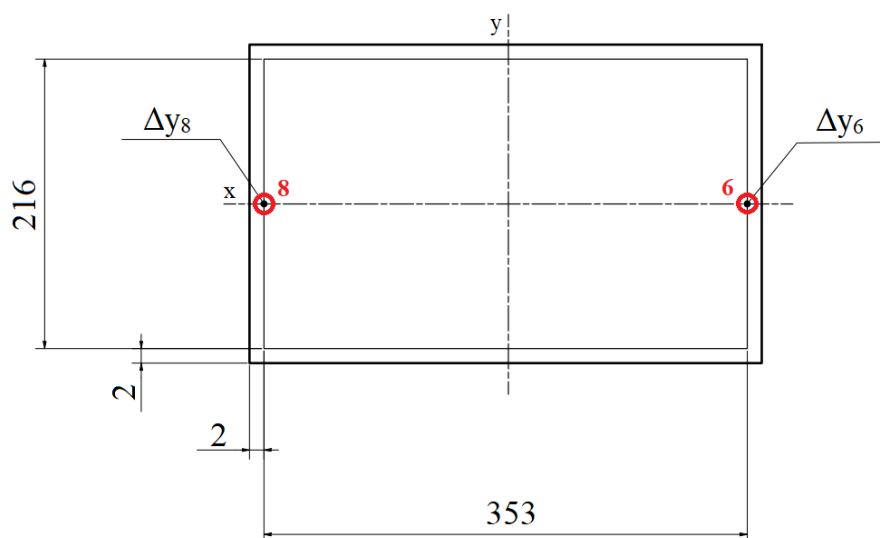
Obrázek 9.9: Výsledná zatěžovací charakteristika – 3. varianta

Z rovnice v grafu je možné určit celkovou tuhost pracovního prostoru podle varianty 3:

$$k_c = 284,8 \text{ kN/mm}$$

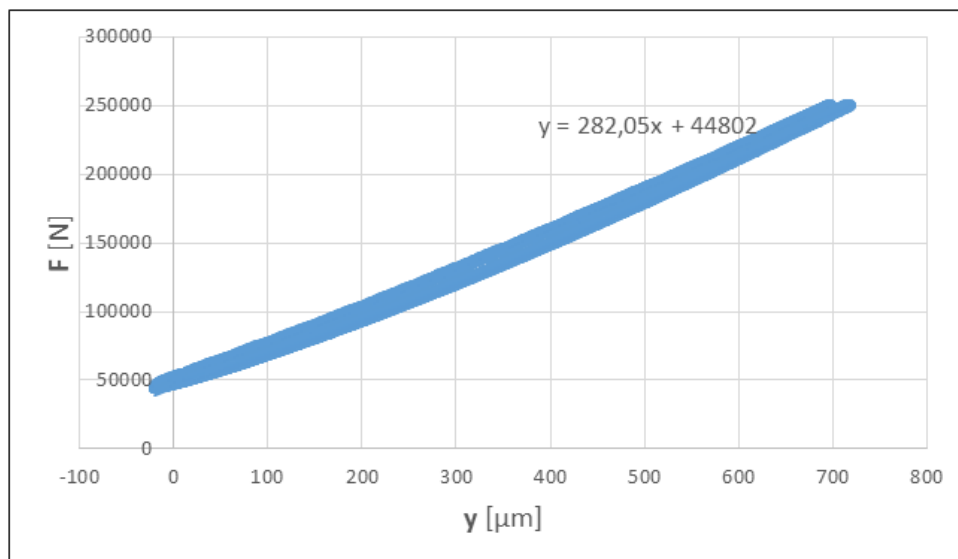
#### 9.1.4 4. varianta

V poslední variantě měření deformace pracovního prostoru byly úchylkoměry umístěny ve středech levé a pravé strany beranu (v bodech 6 a 8) – obrázek 9.10. Jinak byl postup měření shodný s variantou třetí.



Obrázek 9.10: Poloha měřících sond na beranu – 4. varianta

Výsledná zatěžovací charakteristika pro čtvrtou variantu je na obrázku 9.11.



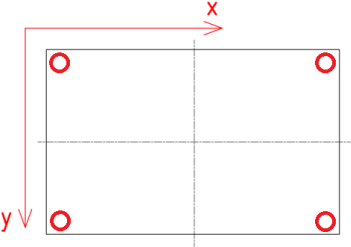
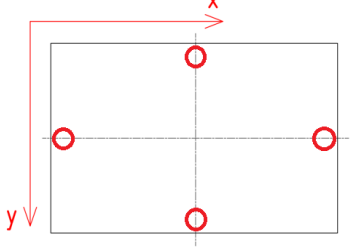
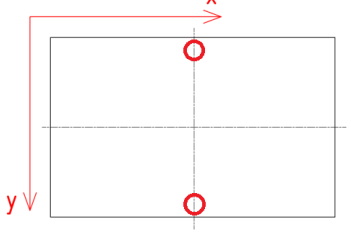
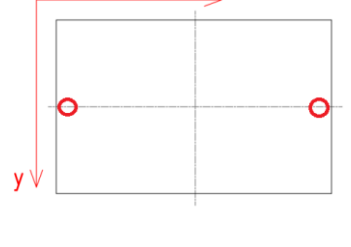
Obrázek 9.11: Výsledná zatěžovací charakteristika – 4. varianta

Hodnota celkové tuhosti pracovního prostoru podle varianty 4 je rovna:

$$k_c = 282,05 \text{ kN/mm}$$

### 9.1.5 Porovnání vybraných variant

V tabulce 9.1 jsou přehledně znázorněny výsledky měření podle všech čtyř zvolených variant.

	<p>4 sondy v rozích</p>	<p><math>k_c = 286,9 \text{ kN/mm}</math></p>
	<p>4 sondy ve středech stran</p>	<p><math>k_c = 283,4 \text{ kN/mm}</math></p>
	<p>2 sondy ve středech stran (vpředu, vzadu)</p>	<p><math>k_c = 284,8 \text{ kN/mm}</math></p>
	<p>2 sondy ve středech stran (vlevo, vpravo)</p>	<p><math>k_c = 282,05 \text{ kN/mm}</math></p>

Tabulka 9.1: Porovnání výsledků měření podle jednotlivých variant

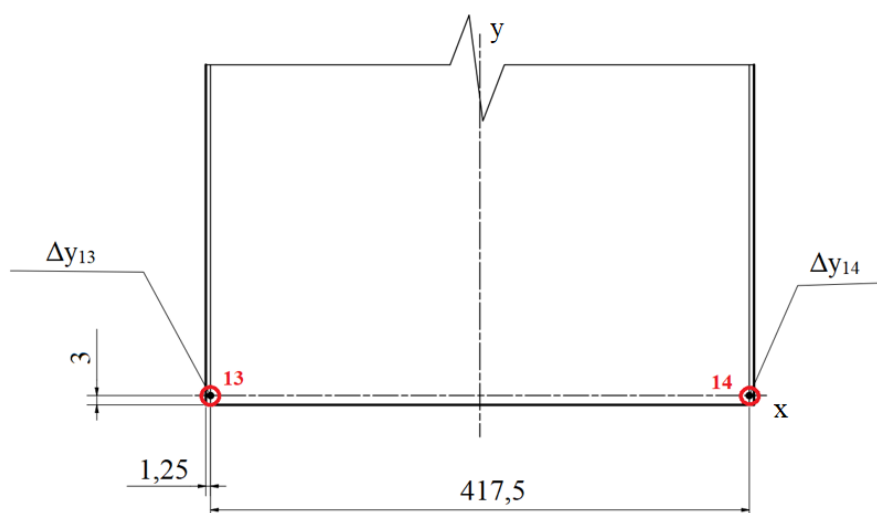
Z výsledků měření je patrné, že hodnoty tuhosti pracovního prostoru zjištěné podle jednotlivých variant se liší pouze minimálně. Vzhledem k tomu, že se jedná o stroj s menší jmenovitou silou a zároveň vykazuje pracovní prostor relativně vysokou tuhost, je možné průběh změny deformace podél stran beranu považovat za přibližně lineární.

Jelikož tedy umístění ani počet měřicích sond výsledek nijak výrazně neovlivňují, lze prohlásit, že ke zjištění hodnoty deformace a tuhosti pracovního prostoru lisu LEN 25 je možné použít nejjednodušší variantu se dvěma úchylkoměry umístěnými ve středech protějších stran beranu, přičemž lze očekávat dostatečně přesný výsledek.

Porovnáním výsledků všech čtyř měřených variant bylo zjištěno, že odchylka mezi tuhostmi pracovního prostoru pro jednotlivé metody je maximálně 1,7 % - neboli, že hodnota tuhosti pracovního prostoru daného lisu je  $k_c = (284,475 \pm 2,425)$  kN/mm. Tento výsledek zároveň odpovídá tabulce 3.1, podle které by se tuhost výstředníkových lisů se jmenovitou silou 250 kN měla pohybovat v rozmezí (140 – 400) kN/mm.

## 9.2 Měření deformace horní části rámu

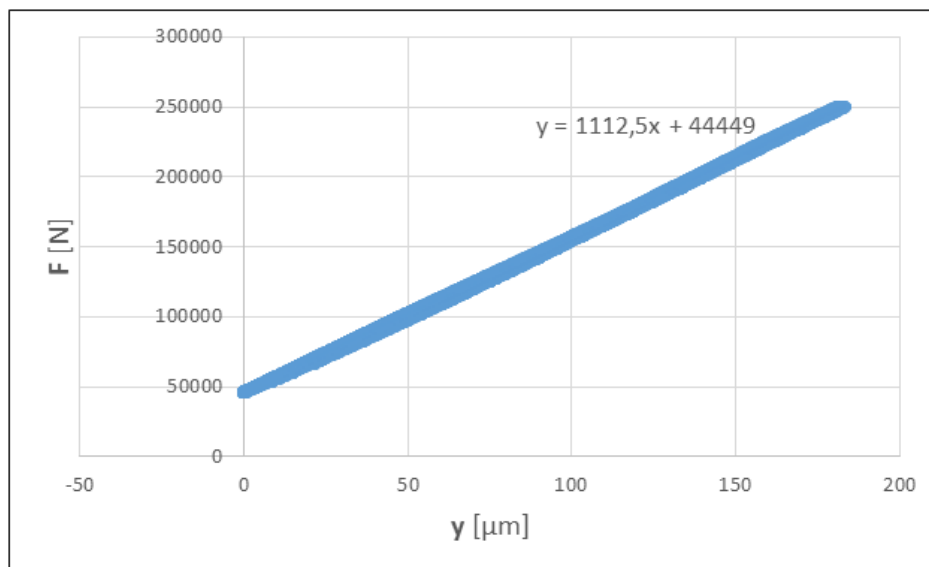
Na horní části rámu byly vyznačeny dva body (13 a 14) pro měřicí sondy. Ve středu spojnice těchto bodů se nacházelo působiště síly (obrázek 9.12). Stroj byl i tentokrát pětikrát za sebou zatěžován silou od cca 50 kN do 250 kN, přičemž byly na rámu měřeny deformace.



Obrázek 9.12: Poloha měřicích sond na horní části rámu

Pomocí navrženého algoritmu byly naměřené hodnoty přepočítány do působivé síly a ze získané zatěžovací charakteristiky (obr. 9.13) byla určena tuhost horní části rámu:

$$k_{rh} = 1112,5 \text{ kN/mm}$$

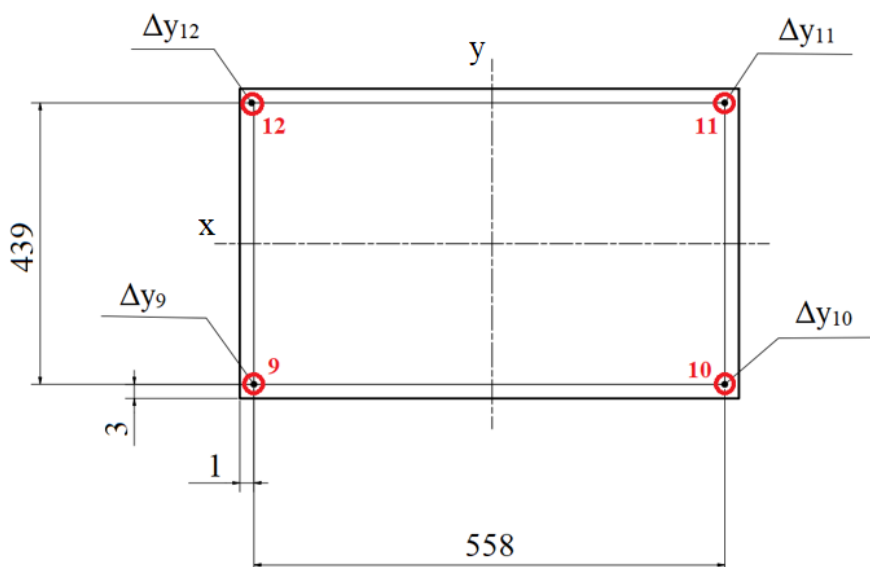


Obrázek 9.13: Výsledná zatěžovací charakteristika – horní část rámu

Hodnota tuhosti je o řád vyšší než u pracovního prostoru, což bylo očekáváno vzhledem k tomu, že rám lisu je sám o sobě tužší a kompaktnější než celý pracovní prostor obsahující i mechanismus.

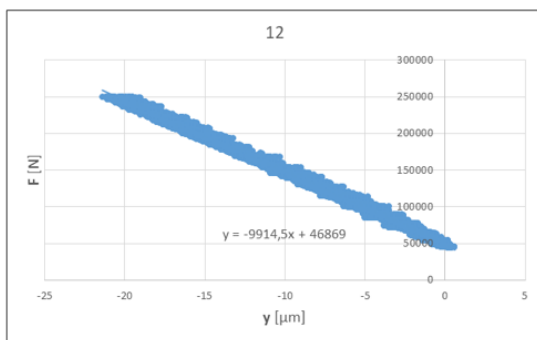
### 9.3 Měření deformace stolu

Pro měření deformace stolu (dolní částí rámu) stroje byla použita metoda se čtyřmi měřicími sondami umístěnými v rozích stolu v bodech označených 9-12 (obrázek 9.14). Toto rozmístění muselo být zvoleno z důvodu, že uprostřed stolu se v ose  $x$  nachází T drážka, která znemožňovala použít pro měření střed levé a pravé strany. Umístění sondy ve středu přední strany zase bránila aparatura pro přívod tlaku do hydraulického válce.

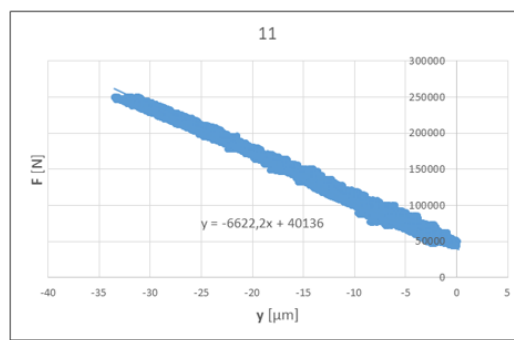


Obrázek 9.14: Poloha měřících sond na spodní části rámu (stole)

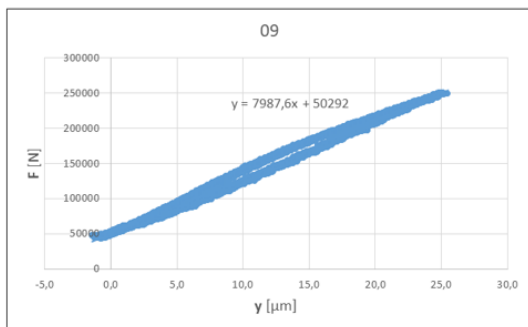
Kvůli malému počtu úchylkoměrů bylo měření opět provedeno na dvakrát. Nejprve byly naráz proměřeny body 9-11 a poté bod 12. Lis byl průběhu měření znovu pětkrát za sebou zatěžován silou od přibližně 50 kN do jmenovité síly 250 kN. Zatěžovací charakteristiky naměřené v jednotlivých bodech jsou vyneseny na obrázku 9.15.



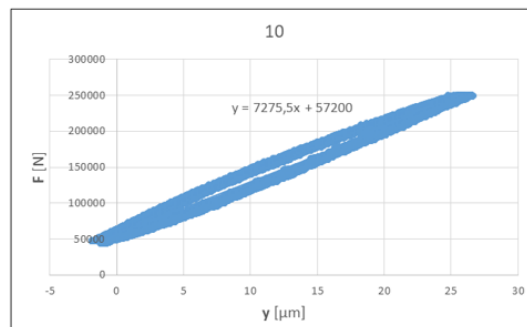
$\Delta y_{12(250)} = -20,5 \mu\text{m}$   $\Delta y_{12(50)} = -0,32 \mu\text{m}$   $F_0 = 50\,000 \text{ N}$



$\Delta y_{11(250)} = -31,7 \mu\text{m}$   $\Delta y_{11(50)} = -1,49 \mu\text{m}$   $F_0 = 50\,000 \text{ N}$



$\Delta y_9(250) = 25 \mu\text{m}$   $\Delta y_9(50) = -0,037 \mu\text{m}$   $F_0 = 50\,000 \text{ N}$



$\Delta y_{10(250)} = 26,5 \mu\text{m}$   $\Delta y_{10(50)} = -1 \mu\text{m}$   $F_0 = 50\,000 \text{ N}$

Obrázek 9.15: Zatěžovací charakteristiky v jednotlivých měřených bodech – stůl

Během zatěžování došlo na přední zadní straně stolu k deformaci opačným směrem. Zatímco přední strana se deformovala směrem dolů, zadní strana se naopak posunula mírně nahoru.

Z výsledků měření byla pro každý bod určena deformace při jmenovité zátěžné síle 250 kN, po přepočítání do středu stolu měla výsledná deformace uprostřed hodnotu:

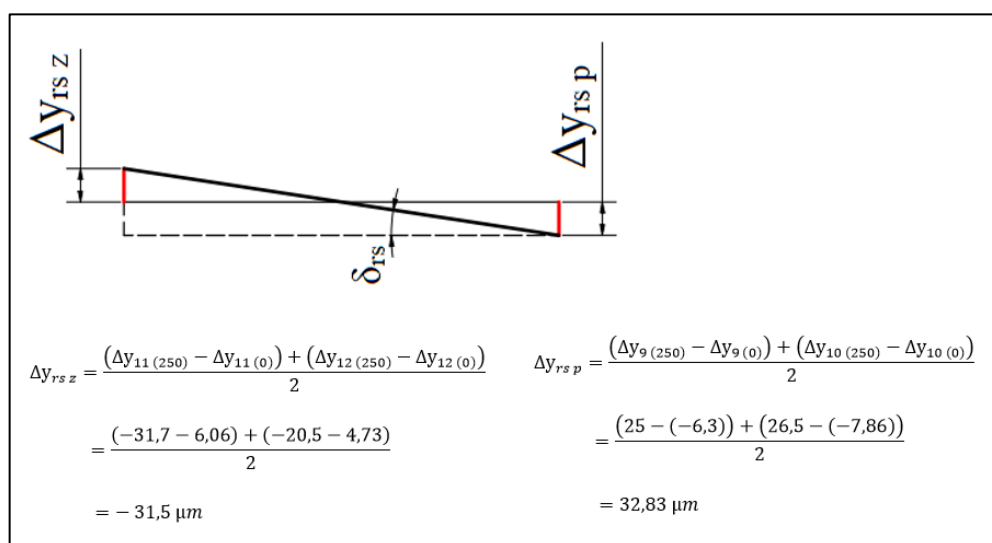
$$\begin{aligned} \Delta y &= \Delta y_{250} - \Delta y_{50} & (9.5) \\ &= \frac{\Delta y_{9(250)} + \Delta y_{10(250)} + \Delta y_{11(250)} + \Delta y_{12(250)}}{4} - \frac{\Delta y_{9(50)} + \Delta y_{10(50)} + \Delta y_{11(50)} + \Delta y_{12(50)}}{4} \\ &= 0,537 \mu m \end{aligned}$$

Výsledná tuhost spodní části rámu (stolu) je potom:

$$k_{rs} = \frac{F_j - F_0}{\Delta y} = \frac{250000 - 50000}{0,537} \doteq 370\,000 \text{ kN/mm} \quad (9.6)$$

Hodnota tuhosti je mnohonásobně vyšší než u pracovního prostoru i horní části rámu. Lze tedy říci, že deformace stolu je oproti ostatním částem stroje nepodstatná a proto je možné její hodnotu zanedbat. Při určování tuhosti pracovního prostoru a rámu daného lisu LEN 25 tedy není nutné k naměřené jmenovité deformaci přičítat deformaci stolu.

Velmi malá hodnota deformace stolu je způsobena jednak jeho vysokou tuhostí, kdy je navíc, na rozdíl od horní části rámu, opřeno o tuhou podložku, ale také tím, jakou podobu deformace stolu měla. Stůl se při zatížení v podstatě pouze naklopil kolem osy x, přičemž posun v působišti byl prakticky nulový (obrázek 9.16).



Obrázek 9.16: Naklopení stolu



Velikost naklonění stolu byla rovněž minimální. Ze získaných výsledků vychází úhlové natočení stolu:

$$\delta_{rs} = \arcsin\left(\frac{|\Delta y_{rs,p}| + |\Delta y_{rs,z}|}{439}\right) = \arcsin\left(\frac{64,33}{439}\right) = 8,4 \cdot 10^{-3} \text{ °} \quad (9.7)$$

Za celkovou tuhost rámu stroje lze tedy s dostatečnou přesností považovat hodnotu tuhosti jeho horní části, uvedenou v kapitole 9.2. Při porovnání měřením získané hodnoty s hodnotou tuhosti rámu vypočtenou analyticky (kapitola 8) se ukázalo, že analytická metoda je oproti realitě optimističtější. Skutečná naměřená hodnota tuhosti je zhruba o 30 % nižší (tabulka 9.2).

Použitá metoda	Tuhost rámu $k_r$
Analytický výpočet	1581,3 kN/mm
Měření	1112,5 kN/mm

Tabulka 9.2: Hodnoty tuhosti rámu – měření, analytický výpočet

Nepřesnost analytického výpočtu je dána zejména značnou tvarovou zjednodušeností výpočtového modelu. Skutečný tvar rámu je složitější než jednoduchý křivý prut tvaru U předpokládaný při výpočtu, také průřez rámu není ve skutečnosti po celé délce konstantní.

Analytickou metodu lze tedy úspěšně použít spíše pro řádový odhad tuhosti rámu stroje, pro získání přesnějšího výsledku je třeba provést měření.

Tuhost mechanismu lisu je pak možné ze získaných hodnot tuhosti pracovního prostoru a rámu určit podle známého vzorce:

$$k_m = \frac{k_c \cdot k_r}{k_r - k_c} = \frac{284,475 \cdot 1112,5}{1112,5 - 284,475} = 382,2 \text{ kN/mm} \quad (9.8)$$

## 9.4 Měření dovolené síly při excentrickém zatěžování

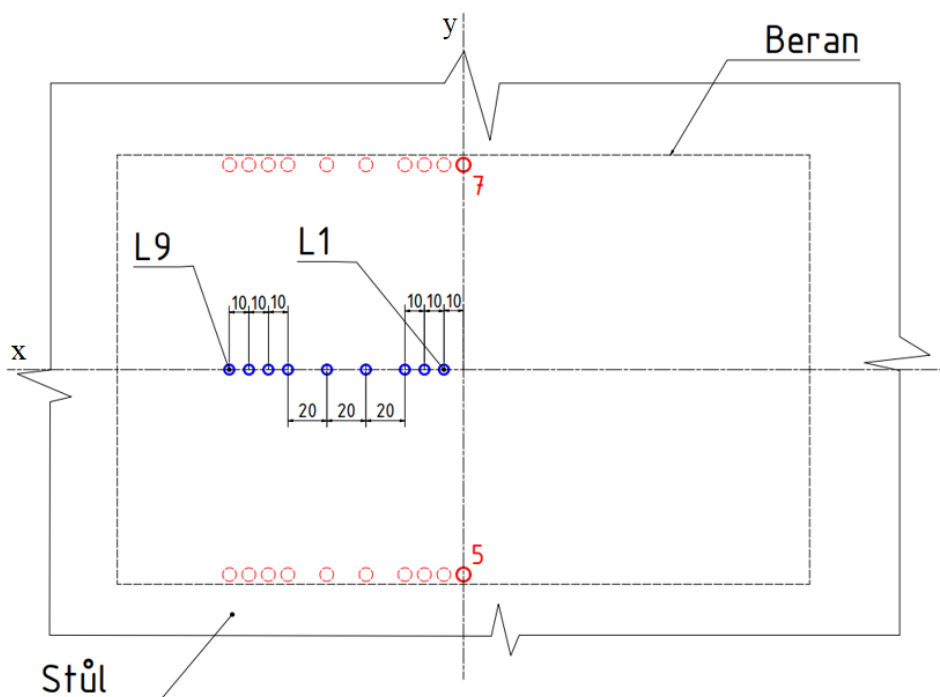
Vzhledem k poznatku, že výsledná hodnota deformace pracovního prostoru výrazněji nezávisí na zvolené variantě rozmístění sond, byla pro měření excentrického zatěžování použita nejjednodušší metoda se dvěma úchylkoměry umístěnými na protilehlých stranách (přední a zadní).

Cílem bylo nejprve určit jmenovitou deformaci  $\Delta y_j$ , která vznikne při zatížení lisu jmenovitou silou v jeho ose. Jako první bylo proto provedeno měření uprostřed. Stroj byl v ose třikrát za sebou zatížen silou od zhruba 20 kN do hodnoty jmenovité síly 250 kN.

Z naměřených dat byla v navrženém výpočtovém programu vytvořena zatěžovací charakteristika, z níž byla určena hodnota deformace, která vznikla v pracovním prostoru při zatížení silou od 20 do 250 kN:

$$\Delta y_j = 911 \mu m$$

Následně byla provedena sada měření při mimoosém vychýlení síly. Hydraulický válec byl pomocí aparatury navržené v kapitole 7.2 pokaždé posunut v ose x do nového bodu, ve kterém proběhlo měření. Celkem bylo na levé straně proměřeno devět bodů L1 – L9 vzdálených od sebe o 10 až 20 mm, měřicí sondy byly vždy posunuty spolu s válcem, aby bylo možné zjistit hodnotu deformace v aktuálním působišti síly (obrázek 9.17).



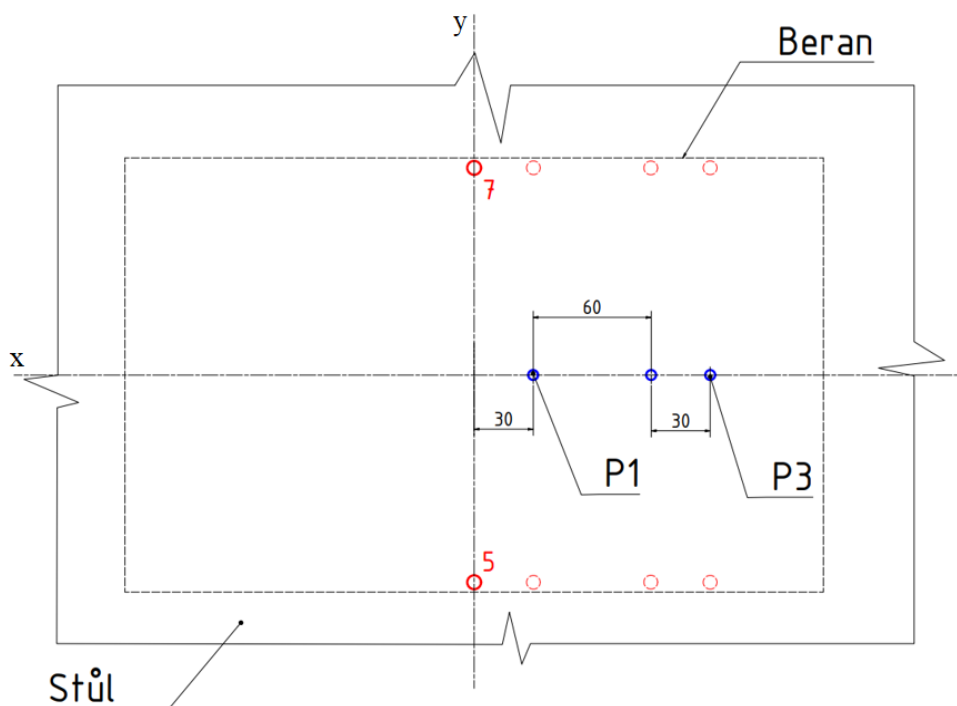
Obrázek 9.17: Poloha bodů pro měření excentrického zatěžování (levá strana)

V každém z těchto bodů byl lis, stejně jako předtím, postupně třikrát za sebou zatěžován silou od 20 kN do hodnoty, ve které bylo v působišti síly dosaženo jmenovité deformace  $\Delta y_j$ .

Výstupní data z obou úchylkoměrů byla během měření zobrazována v programu LabView, proto bylo, po zprůměrování jejich hodnot, možné rovnou sledovat aktuální hodnotu deformace pracovního prostoru. Jakmile se velikost této deformace přiblížila jmenovité deformaci lisu, byl stroj odlehčen, aby nedošlo k jeho přetížení.

Pro každou z devíti excentrických poloh tak byla získána zatěžovací charakteristika, ze které bylo možné určit, při jaké zátěžné síle dosáhne lis maximální přípustné hodnoty deformace  $\Delta y_j$ .

Tentýž postup byl zopakován i pro pravou stranu pracovního prostoru, zde už ale bylo měření provedeno jen ve třech bodech P1 – P3 (obrázek 9.18).



Obrázek 9.18: Poloha bodů pro měření excentrického zatěžování (pravá strana)

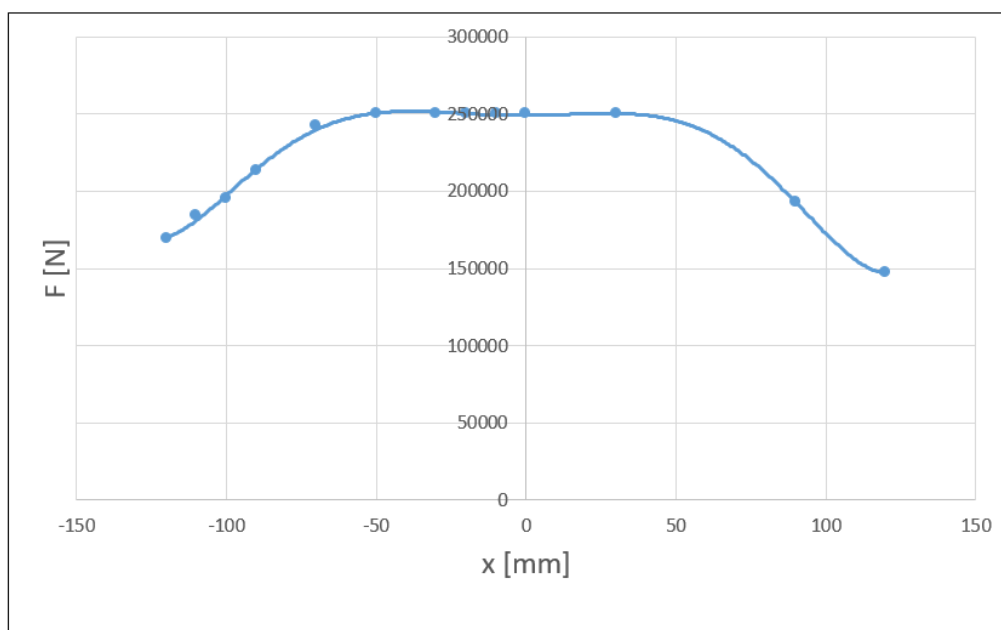
Zjištěné hodnoty dovolených sil pro jednotlivá excentrická působíště síly jsou pro obě dvě strany zaznamenány v tabulce 9.3.

<b>Vzdálenost od osy [mm]</b>	-120	-110	-100	-90	-70	-50	-30	-20	-10
<b>Dovolená síla [kN]</b>	169,4	184,3	195,0	213,1	242,5	250,0	250,0	250,0	250,0

<b>Vzdálenost od osy [mm]</b>	0	30	90	120
<b>Dovolená síla [kN]</b>	250,0	250,0	192,6	147,1

Tabulka 9.3: Hodnoty dovolené síly v závislosti na poloze působíště

Ze získaných dat byla také vytvořena grafická závislost dovolené síly na excentrickém vychýlení (obrázek 9.19).



Obrázek 9.19: Graf dovoleného zatěžování lisu LEN 25

Z grafu dovoleného zatěžování je patrné, že excentricita se začne projevovat až při značně velkém vychýlení zátěžné síly, zhruba při 50-60 mm. Výstředníkový lis LEN 25 má tedy poměrně vysoce tuhý pracovní prostor, značně odolný proti negativním vlivům excentrického zatížení.

Stroj je možné bezpečně mimoose zatěžovat jmenovitou silou  $F_j = 250 \text{ kN}$  až do vzdálenosti 50 mm od osy, teprve poté začne dovolená síla vlivem vychýlení klesat.

## 10 Závěr

Tato práce měla za cíl experimentální zhodnocení a zdokonalení postupu měření statické tuhosti mechanických lisů. Nejprve byla provedena rešerše dané problematiky, kde bylo zjištěno, že pro určování tuhosti lisů lze aplikovat celkem tři metody – reálné měření na stroji, analytický výpočet nebo metodu konečných prvků. Vzhledem k rozsahu práce byly podrobněji rozebrány pouze první dva způsoby a určení deformace metodou konečných prvků bylo zmíněno pouze teoreticky. Hlavní důraz byl kladen na praktické měření pomocí úchylkoměrů snímajících deformace stroje při jeho zatěžování.

Bylo zjištěno, že metodika měření deformací tvářecích strojů není přesně normalizována a v praxi se vychází především ze zažitých postupů. V rámci této práce bylo navrženo několik nových variant měření (rozmístění měřicích sond), které by mohly být porovnány s dosavadní metodikou.

K provedení měření bylo, kromě vhodného rozmístění úchylkoměrů, také třeba sestavit funkční měřicí a zatěžovací aparaturu. Použit byl již dříve navržený přípravek obsahující hydraulický válec, tenzometrický snímač a kulový kloub pro přenos normálové síly při zatěžování stroje. Hydraulický obvod, sloužící pro přívod tlaku do tohoto přípravku byl částečně inovován a upraven tak, aby jeho použití bylo univerzálnější a aby umožňoval snadnou modifikaci.

Jelikož jedním z úkolů práce bylo také zjistit vliv excentricity na velikost možné zatěžující síly, bylo pro tento účel nutné použít vhodný přípravek umožňující právě excentrický posuv zatěžovací aparatury v pracovním prostoru stroje. Tento prvek byl navržen a sestaven v originálním provedení, umožňujícím snadný a přesný pohyb hydraulického válce po šířce stolu lisu.

Samotné měření deformací bylo uskutečněno na výstředníkovém lisu LEN 25. Protože bylo měření poměrně rozsáhlé (podle několika variant), byl pro efektivnější vyhodnocení výsledků navržen výpočtový program, umožňující přepočítání naměřených deformací do působivé síly a získání zatěžovací charakteristiky, a to pro jakoukoliv z použitých metod.

Z porovnání daných variant vyplynulo, že při měření deformace pracovního prostoru lisu LEN 25 nehraje počet a poloha použitých úchylkoměrů zásadní roli. K dostatečně přesnému výsledku lze dospět i při použití pouze dvou měřicích sond umístěných ve středech protilehlých stran beranu. Stávající metodiku je tedy možné u podobných menších mechanických lisů zjednodušit. Tuhost rámu stroje byla rovněž porovnána

s výsledkem analytického výpočtu, který se ukázal jako poměrně nepřesný kvůli velkému tvarovému zjednodušení rámu -rozdíl oproti naměřené hodnotě činil zhruba 30 %. Analytické řešení lisů je tedy vhodné spíše pro řádový odhad deformací před samotným měřením. Zároveň bylo zjištěno, že daný lis LEN 25 vykazuje značnou odolnost proti mimoosému namáhání a je možné ho bezpečně excentricky zatěžovat jmenovitou silou 250 kN až do vzdálenosti 50 mm od osy stroje.

## Seznamy

### Seznam použité literatury

- [1] RUDOLF, B. a KOPECKÝ, M. A KOL. *Tvářecí stroje - základy stavby a využití*. 1.vydání. Praha: SNTL, 1985.
- [2] Kolektiv. *Laboratorní cvičení z výrobních strojů*, ČVUT v Praze, 1982.
- [3] HOCHHEIM, Kristýna. *Určení vhodného mechanického lisu pro postupové lisovací nástroje*. Praha, 2017. Diplomová práce. ČVUT v Praze. Fakulta strojní. Vedoucí práce Ing. TOMÁŠ KRANNICH, Ph.D.
- [4] POKORNÝ, Přemysl. *Výrobní stroje II. Mechanické lisy*. Liberec: Technická Univerzita v Liberci, 1998.
- [5] RUDOLF, B. *Stavba výrobních strojů I*. ČVUT v Praze, 1987.
- [6] ČECHURA, Milan, Jan HLAVÁČ a Jiří STANĚK. *Konstrukce tvářecích strojů*. Plzeň: ZČU v Plzni, 2015.
- [7] VACHEK, Jakub. *Hydraulický lis CTC 63*. Brno, 2018. Bakalářská práce. VUT v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. JIŘÍ OMES, Ph.D.
- [8] PAGAČ, Vít. *Stanovení maximálního zatížení hydraulického lisu*. Plzeň, 2016. Bakalářská práce. ZČU v Plzni. Fakulta strojní. Vedoucí práce Ing. VÁCLAV KUBEC, Ph.D.
- [9] VÍTEK, Daniel. *Návrh rámu pro měření statické tuhosti*. Praha, 2018. Bakalářská práce. ČVUT v Praze. Fakulta strojní. Vedoucí práce Ing. DAVID BURIAN, Ph.D.
- [10] B. RUDOLF, M. KOPECKÝ. *Tvářecí stroje: základy výpočtů a konstrukce*. Vyd. SNTL Praha, 1982.



- [11] SOBOTKA, Radek. *Návrh kotveného stojanu vřetenového lisu s přímým pohonem*. Brno, 2016. Diplomová práce. VUT v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. JIŘÍ OMES, Ph.D.
- [12] NOVOTNÝ, Karel. *Výrobní stroje a zařízení, část tvářecí stroje*. Brno: VUT v Brně, 2002.
- [13] LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky*. 6., vyd. Úvaly: Albra, 2017. ISBN 978-80-7361-111-8.
- [14] Katalog ENERPAC [online] 2.5.2021 [cit. 2021-05-02]. Dostupné z: <http://www.ikema.cz/sites/default/files/enerpac/pdf/E327e.pdf>
- [15] Technické parametry lisu LEN 25

## Seznam použitého softwaru

1. Microsoft Excel 2013
2. Microsoft Word 2010
3. Autodesk Inventor Professional 2020

## Seznam obrázků

Obrázek 3.1- Závislost zatížení a deformace [5] .....	13
Obrázek 3.2- Natočení upínacích ploch stroje [4] .....	15
Obrázek 3.3- Příklady charakteristik tuhosti [4].....	16
Obrázek 3.4- Výpočtový model mechanického lisu [4] .....	16
Obrázek 3.5- Charakteristika tuhosti jednotlivých částí stroje [3] .....	17
Obrázek 3.6- Charakteristika dovoleného zatěžování stroje LE 100 D [3].....	19
Obrázek 4.1- Otevřený rám s přímou stojinou [6].....	20
Obrázek 4.2- Model rámu lisu [8] .....	22
Obrázek 4.3- Síťovaný výpočtový model [8] .....	23

Obrázek 4.4- Rozložení deformací ve směru osy y a x [8] .....	23
Obrázek 4.5- Souřadný systém měřeného stroje [3].....	24
Obrázek 4.6- Přípravek na vyvození síly [3] .....	25
Obrázek 4.7- Obecné rozmístění měřicích sond [10] .....	26
Obrázek 4.8- Měření deformace rámu [10] .....	27
Obrázek 4.9- Měření deformace pracovního prostoru [10] .....	27
Obrázek 5.1- Umístění úchylkoměrů na beranu .....	28
Obrázek 5.2- Umístění úchylkoměrů na horní části rámu .....	29
Obrázek 5.3- Umístění sond na beranu – 1. varianta.....	30
Obrázek 5.4- Umístění úchylkoměrů na horní a spodní části rámu – 1. varianta [10] .....	31
Obrázek 5.5- Umístění sond na stole – 1. varianta .....	31
Obrázek 5.6- Umístění sond na beranu – 2. varianta.....	32
Obrázek 5.7- Umístění úchylkoměrů na horní části rámu – 2. varianta .....	33
Obrázek 5.8- Umístění úchylkoměrů na spodní části rámu – 2. varianta.....	33
Obrázek 5.9- Umístění sond na beranu – 3. varianta.....	34
Obrázek 6.1- Vyhodnocovací algoritmus – určení počtu a umístění sond na beranu.....	36
Obrázek 6.2- Vyhodnocovací algoritmus – hodnoty pro přední a zadní stranu beranu.....	37
Obrázek 6.3- Vyhodnocovací algoritmus – hodnoty pro levou a pravou stranu beranu.....	38
Obrázek 6.4- Vyhodnocovací algoritmus – výpočet celkové deformace (prac. prostor) .....	38
Obrázek 6.5- Vyhodnocovací algoritmus – zatěžovací charakteristika (prac. prostor) .....	39
Obrázek 6.6- Vyhodnocovací algoritmus – určení počtu a umístění sond na rámu .....	40

Obrázek 6.7- Vyhodnocovací algoritmus – výpočet celkové deformace (rám) .....	40
Obrázek 6.8- Vyhodnocovací algoritmus – zatěžovací charakteristika (rám).....	41
Obrázek 7.1- Schéma původní aparatury pro přívod tlaku [3] .....	42
Obrázek 7.2- Schéma nové aparatury pro přívod tlaku .....	43
Obrázek 7.3- Aparatura pro excentrický posuv – 1. varianta .....	45
Obrázek 7.4- Aparatura pro excentrický posuv – 2. varianta .....	46
Obrázek 7.5- Aparatura pro excentrický posuv – 2. varianta (rovina xz) .....	47
Obrázek 7.6- Fotografie aparatury pro excentrický posuv .....	47
Obrázek 8.1- 3D model lisu.....	48
Obrázek 8.2- Výpočtový model lisu pro analytický výpočet [6].....	48
Obrázek 8.3- Řez stojinou rámu (3D).....	49
Obrázek 8.4- Průřez stojiny rámu (2D) .....	49
Obrázek 9.1- Polohy měřicích sond.....	52
Obrázek 9.2- Upnutí úchylkoměrů na nezávislém rámu .....	52
Obrázek 9.3- Poloha měřicích sond na beranu .....	53
Obrázek 9.4- Poloha měřicích sond na beranu – 1. varianta .....	53
Obrázek 9.5- Zatěžovací charakteristiky v jednotlivých měřených bodech – 1. varianta.....	54
Obrázek 9.6- Poloha měřicích sond na beranu – 2. varianta .....	55
Obrázek 9.7- Zatěžovací charakteristiky v jednotlivých měřených bodech – 2. varianta.....	56
Obrázek 9.8- Poloha měřicích sond na beranu – 3. varianta .....	57
Obrázek 9.9- Výsledná zatěžovací charakteristika – 3. varianta .....	58
Obrázek 9.10- Poloha měřicích sond na beranu – 4. varianta .....	58
Obrázek 9.11- Výsledná zatěžovací charakteristika – 4. varianta .....	59
Obrázek 9.12- Poloha měřicích sond na horní části rámu .....	61

Obrázek 9.13- Výsledná zatěžovací charakteristika – horní část rámu .....	62
Obrázek 9.14- Poloha měřicích sond na spodní části rámu (stole).....	63
Obrázek 9.15- Zatěžovací charakteristiky v jednotlivých měřených bodech – stůl.....	63
Obrázek 9.16- Naklopení stolu .....	64
Obrázek 9.17- Poloha bodů pro měření excentrického zatěžování (levá strana) ...	66
Obrázek 9.18- Poloha bodů pro měření excentrického zatěžování (pravá strana) .	67
Obrázek 9.19- Graf dovoleného zatěžování lisu LEN 25 .....	68

## Seznam tabulek

Tabulka 3.1- Volba tuhosti pracovního prostoru [5] .....	18
Tabulka 7.1- Prvky hydraulického obvodu pro přívod tlaku.....	44
Tabulka 8.1- Parametry lisu [15] .....	49
Tabulka 9.1- Porovnání výsledků měření podle jednotlivých variant .....	60
Tabulka 9.2- Hodnoty tuhosti rámu – měření, analytický výpočet .....	65
Tabulka 9.3- Hodnoty dovolené síly v závislosti na poloze působišť.....	68

## Seznam příloh

### Výkresová dokumentace

1. Sestavný výkres aparatury pro excentrický posuv (0000-00)
2. Kusovník k aparatuře pro excentrický posuv (0000-K)
3. Výrobní výkres upínací kostky (0000-01)

### Elektronické přílohy

1. Bakalářská práce.pdf
2. Výpočtový program pro vyhodnocení měření.xlsx
3. Výkresová dokumentace.pdf
4. Model aparatury pro excentrický posuv.iam