

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA STROJNÍ**

**Studijní program:** N0715A270017 - Konstruování strojů a technických zařízení

**Studijní specializace:** Konstruování vozidel a manipulačních zařízení

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Modernizace portálového manipulátoru**

**Autor:** Bc. Jan HOUBA

**Vedoucí práce:** Ing. Petr VOTÁPEK, Ph.D.

Akademický rok 2020/2021

# ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2020/2021

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan HOUBA**  
Osobní číslo: **S19N0122P**  
Studijní program: **N0715A270017 Konstruování strojů a technických zařízení**  
Studijní obor: **Konstruování vozidel a manipulačních zařízení**  
Téma práce: **Modernizace portálového manipulátoru**  
Zadávající katedra: **Katedra konstruování strojů**

### Zásady pro vypracování

Základní požadavky:

Pomocí nástrojů reverzního inženýrství analyzujte zadaný portálový manipulátor. Vytvořte 3D model portálového manipulátoru, proveďte výpočty vybraného uzlu a vytvořte výrobní dokumentaci vybraného uzlu, vše s důrazem na možnost využití manipulátoru při aditivních technologiích výroby.

Základní technické údaje:

Technické parametry jsou uvedeny v příloze zadání.

Osnova diplomová práce:

1. Analýza
2. Tvorba 3D modelu
3. Technické výpočty
4. Výrobní dokumentace
5. Technické hodnocení

Rozsah diplomové práce: **40 – 60 stran**  
Rozsah grafických prací: **podle potřeby**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam doporučené literatury:

[1] HOSNEDL, S., KRÁTKÝ, J. *Příručka strojního inženýra 1*. Brno: Computer Press, 1999, ISBN: 80-7226-055-3  
Podkladové materiály, výkresy, prospekty, katalogy, apod. poskytnuté zadavatelem úkolu.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Votápek, Ph.D.**  
Katedra konstruování strojů

Konzultant diplomové práce: **Doc. Ing. Martin Hynek, Ph.D.**  
Katedra konstruování strojů

Datum zadání diplomové práce: **16. října 2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **28. května 2021**

L.S.

---

**Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.**  
děkan

---

**Prof. Ing. Václava Lašová, Ph.D.**  
vedoucí katedry

## **Prohlášení o autorství**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne: .....

.....

podpis autora

## **Poděkování**

Rád bych tímto poděkoval svému vedoucímu diplomové práce Ing. Petru Votápkovi, Ph.D., za odbornou pomoc, praktické rady a trpělivost při vedení této práce.

## ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

|                         |   |                              |                                |  |
|-------------------------|---|------------------------------|--------------------------------|--|
| <b>AUTOR</b>            | Příjmení<br>Bc. Houba                                     | Jméno<br>Jan                 |                                |  |
| <b>STUDIJNÍ PROGRAM</b> | N0715A270017 „Konstruování strojů a technických zařízení“ |                              |                                |  |
| <b>VEDOUcí PRÁCE</b>    | Příjmení<br>Ing. Votápek, Ph.D.                           | Jméno<br>Petr                |                                |  |
| <b>PRACOVIŠTĚ</b>       | ZČU - FST - KKS   |                              |                                |  |
| <b>DRUH PRÁCE</b>       | <b>DIPLOMOVÁ</b>  | <del><b>BAKALÁŘSKÁ</b></del> | Nehodící se<br><b>škrtněte</b> |  |
| <b>NÁZEV PRÁCE</b>      | Modernizace portálového manipulátoru                      |                              |                                |  |

|                |         |                |     |                    |      |
|----------------|---------|----------------|-----|--------------------|------|
| <b>FAKULTA</b> | strojní | <b>KATEDRA</b> | KKS | <b>ROK ODEVZD.</b> | 2021 |
|----------------|---------|----------------|-----|--------------------|------|

### POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

|               |     |                     |    |                      |     |
|---------------|-----|---------------------|----|----------------------|-----|
| <b>CELKEM</b> | 188 | <b>TEXTOVÁ ČÁST</b> | 58 | <b>GRAFICKÁ ČÁST</b> | 130 |
|---------------|-----|---------------------|----|----------------------|-----|

|  |   |
|--|---|
| <b>STRUČNÝ POPIS<br/>(MAX 10 ŘÁDEK)</b><br><br><b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL<br/>POZNATKY A PŘÍNOSY</b>           | <p>Diplomová práce obsahuje analýzu portálového manipulátoru a návrh konstrukčního řešení svislé osy. Byl proveden výpočet reakčních účinků a kontrola vybraných komponent. Dále byly analyzovány posuvy ramen svislé osy, vytvořen 3D model portálového manipulátoru, modely variant konstrukčních řešení a výkresová dokumentace vybrané části.</p> |
| <b>KLÍČOVÁ SLOVA</b><br><br><b>ZPRAVIDLA<br/>JEDNOSLOVNÉ POJMY,<br/>KTERÉ VYSTIHUJÍ<br/>PODSTATU PRÁCE</b> | manipulátor, CAD, návrh   |

## SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

|                          |   |                 |                            |
|--------------------------|---|-----------------|----------------------------|
| <b>AUTHOR</b>            | Surname<br>Bc. Houba  | Name<br>Jan     |                            |
| <b>STUDY PROGRAMME</b>   | N0715A270017 “Design Engineering of Machines and Technical Devices“ |                 |                            |
| <b>SUPERVISOR</b>        | Surname (Inclusive of Degrees)<br>Ing. Votápek, Ph.D.               | Name<br>Petr    |                            |
| <b>INSTITUTION</b>       | ZČU - FST - KKS   |                 |                            |
| <b>TYPE OF WORK</b>      | <b>DIPLOMA</b>  | <b>BACHELOR</b> | Delete when not applicable |
| <b>TITLE OF THE WORK</b> | Modernization of the portal manipulator                             |                 |                            |

|                |                        |                   |                |                     |      |
|----------------|------------------------|-------------------|----------------|---------------------|------|
| <b>FACULTY</b> | Mechanical Engineering | <b>DEPARTMENT</b> | Machine Design | <b>SUBMITTED IN</b> | 2021 |
|----------------|------------------------|-------------------|----------------|---------------------|------|

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

|                |     |                  |    |                       |     |
|----------------|-----|------------------|----|-----------------------|-----|
| <b>TOTALLY</b> | 188 | <b>TEXT PART</b> | 58 | <b>GRAPHICAL PART</b> | 130 |
|----------------|-----|------------------|----|-----------------------|-----|

|   |  |
|---|--|
| <b>BRIEF DESCRIPTION<br/>TOPIC, GOAL, RESULTS<br/>AND CONTRIBUTIONS</b> | The diploma thesis contains an analysis of the portal manipulator and a design of the vertical axis. The calculation of reaction forces and inspection of selected components were performed. Then the displacements of the arms of the vertical axis were analyzed, a 3D model of the portal manipulator, models of variants of construction solutions and drawing documentation of a selected part were created. |
| <b>KEY WORDS</b>  | manipulators, CAD, design  |

# Obsah

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Úvod .....</b>   | <b>1</b>  |
| <b>1 Manipulační zařízení.....</b>                                  | <b>2</b>  |
| 1.1 Rozdělení .....   | 2         |
| 1.1.1 Stupně volnosti .....   | 2         |
| 1.1.2 Kinematické struktury .....                                   | 2         |
| 1.1.3 Míra mobility .....   | 2         |
| 1.1.4 Pracovní prostor.....   | 3         |
| <b>2 Charakteristika portálového manipulátoru GÜDEL FP-3 .....</b>  | <b>5</b>  |
| 2.1 Ocelová konstrukce.....   | 6         |
| 2.1.1 Sloup .....   | 6         |
| 2.1.2 Ocelové profily .....   | 6         |
| 2.2 Pohonná zařízení .....  | 6         |
| 2.2.1 Pohon osy X.....  | 7         |
| 2.2.2 Pohon osy Y.....  | 8         |
| 2.2.3 Pohon osy Z .....   | 8         |
| 2.3 Lineární vedení .....   | 8         |
| 2.3.1 Kolejnice.....  | 8         |
| 2.3.2 Vodící kladka.....  | 9         |
| 2.3.3 Mazání .....  | 10        |
| 2.4 Osa Z.....  | 11        |
| <b>3 Návrh teleskopické osy Z .....</b>                             | <b>12</b> |
| 3.1 Specifikace požadavků.....                                      | 13        |
| 3.2 Návrh variant konstrukčního řešení .....                        | 13        |
| 3.2.1 Varianta A1.....  | 13        |
| 3.2.2 Varianta A2.....  | 14        |
| 3.2.3 Varianta B.....   | 15        |
| 3.2.4 Varianta C.....   | 16        |
| <b>4 Výpočty .....</b>  | <b>17</b> |
| 4.1 Výpočty varianty A1 .....                                       | 17        |
| 4.1.1 Reakční účinky .....  | 20        |
| 4.1.2 Přídavné zatížení vodících kladek od setrvačných účinků ..... | 28        |
| 4.1.3 Kontrola vodících kladek.....                                 | 29        |
| 4.1.4 Kontrola ozubení .....  | 34        |



|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 4.1.5    | Posuv dolního a horního ramene .....                           | 34        |
| 4.1.6    | Volba řemene.....  | 35        |
| 4.1.7    | Volba řetězu.....  | 36        |
| 4.2      | Výpočet varianty B .....                                       | 37        |
| 4.2.1    | Reakční účinky .....   | 39        |
| 4.2.2    | Přídavné zatížení lineárního vedení od setrvačných účinků..... | 39        |
| 4.2.3    | Kontrola lineárního vedení .....                               | 40        |
| 4.2.4    | Kontrola ozubení .....   | 42        |
| 4.2.5    | Posuv dolního a horního ramene .....                           | 42        |
| 4.2.6    | Volba řemene.....  | 43        |
| 4.3      | Varianta C .....   | 44        |
| <b>5</b> | <b>Výpočet MKP .....</b>                                       | <b>45</b> |
| 5.1      | Varianta A1 .....  | 45        |
| 5.1.1    | Profily samostatně .....                                       | 46        |
| 5.1.2    | Kontaktní úloha .....  | 46        |
| 5.1.3    | Celková kontaktní úloha .....                                  | 46        |
| 5.2      | Varianta B .....   | 49        |
| 5.2.1    | Kontaktní úloha .....  | 49        |
| 5.2.2    | Celková kontaktní úloha .....                                  | 49        |
| <b>6</b> | <b>Aktuální stav modelu manipulátoru .....</b>                 | <b>50</b> |
| <b>7</b> | <b>Hodnocení variant .....</b>                                 | <b>55</b> |
|          | <b>Technické hodnocení a závěr .....</b>                       | <b>58</b> |
|          | <b>Citovaná literatura .....</b>                               | <b>59</b> |
|          | <b>Použitý software.....</b>                                   | <b>60</b> |
|          | <b>Seznam obrázků.....</b>                                     | <b>60</b> |
|          | <b>Seznam tabulek .....</b>                                    | <b>62</b> |
|          | <b>Seznam příloh .....</b>                                     | <b>62</b> |
|          | <b>Výkresová dokumentace .....</b>                             | <b>62</b> |

## Úvod

Tato diplomová práce je zaměřena na analýzu a modernizaci portálového manipulátoru GÜDEL FP-3. Portálový manipulátor byl zakoupen Západočeskou univerzitou v Plzni pro rozšíření praktických znalostí studentů v oblasti robotiky. V současnosti se klade důraz na automatizaci výrobních procesů a s tím spojenou manipulaci s materiálem. Cílem je zvýšení rychlosti a kvality procesů.

Švýcarská firma Güdel Group je globálním výrobcem produktů pro robotickou automatizaci. Mezi hlavní produkty této firmy patří modulové lineární systémy, portálové roboty a pojezdy pro roboty. [1]

Tato práce se zabývá návrhem teleskopické osy Z. Současné konstrukční řešení nedovoluje využít celý zdvih osy Z. Důvodem je omezení stropem. Práce obsahuje varianty konstrukčních řešení, které umožní plný zdvih osy Z. Dále je v této práci výpočet reakčních účinků, posuvů a kontrolní výpočty vybraných komponent. Hodnoty posuvů byly ověřeny a u komplexnějších řešení určeny pomocí MKP. V praktické části byl zhotoven 3D model portálového manipulátoru a modely variant konstrukčních řešení.

# 1 Manipulační zařízení

Manipulace je nedílnou součástí výroby. Ovlivňuje čas potřebný k výrobě jednotlivých dílů. Optimalizací manipulačních procesů se zvyšuje produktivita práce. Účelem manipulačních zařízení je ulehčit práci obsluze.

Definice pojmu robot se vyskytuje v několika verzích. Definice od Robotics Institute of America zní:

*„robot je reprogramovatelný multifunkční manipulátor navržený pro přenášení materiálu, součástí, nástrojů, nebo specializovaných zařízení, pomocí variabilně programovaných pohybů k provádění různých úkolů“.* [2]

Pro technickou praxi se zavedl pojem průmyslový robot. Ve druhém vydání Handbook of Industrial Robots je definice průmyslového robotu formulována jako:

*„Průmyslový robot je mechanické zařízení, které může být naprogramováno pro vykonávání různých úkolů manipulačních a pohybových, při automatickém řízení“.* [2]

## 1.1 Rozdělení

### 1.1.1 Stupně volnosti

Podle počtu stupňů volnosti rozlišujeme roboty:

- Deficitní – méně než 6 stupňů volnosti (například roboty typu SCARA)
- Univerzální – 6 stupňů volnosti a jednoznačně vymezená poloha a orientace objektu
- Redundantní – více než 6 stupňů volnosti, čehož se využívá k obcházení překážek [2]

### 1.1.2 Kinematické struktury

Roboty rozlišujeme podle kinematické struktury:

- Sériové – kinematický řetězec manipulátoru je otevřený
- Paralelní – kinematický řetězec manipulátoru je uzavřený
- Hybridní – kombinace předchozích typů řetězců [2]

### 1.1.3 Míra mobility

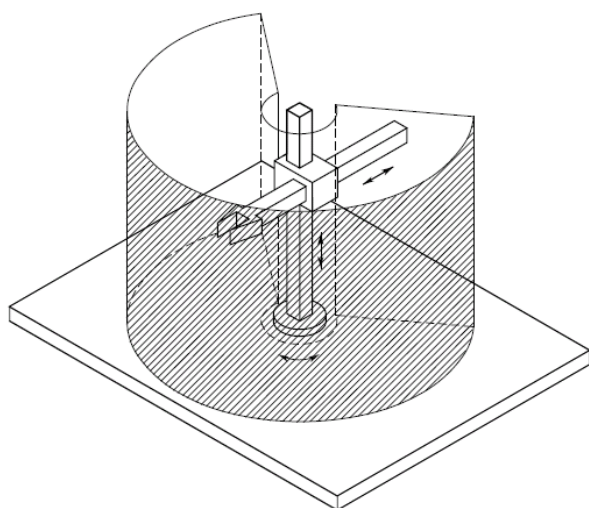
Podle míry mobility se roboty rozdělují:

- Mobilní – pohybují se pomocí podvozku, který může být například pásový, kolový, kráčející apod.
- Imobilní – nepohyblivé [3]

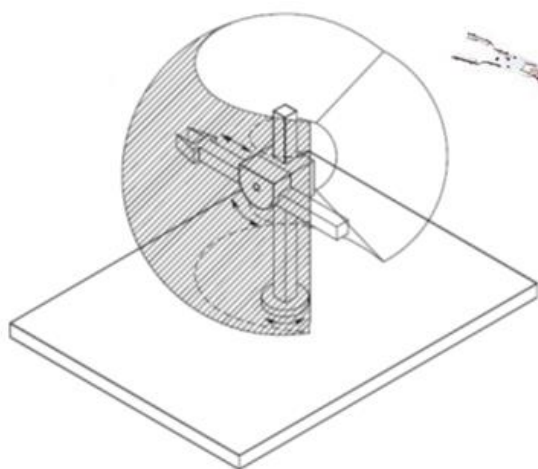
### 1.1.4 Pracovní prostor

Dosah robotu je definován pracovním prostorem. Podle geometrie pracovního prostoru rozlišujeme:

- Cylindrický
- Sférický
- SCARA
- Angulární
- Kartézský



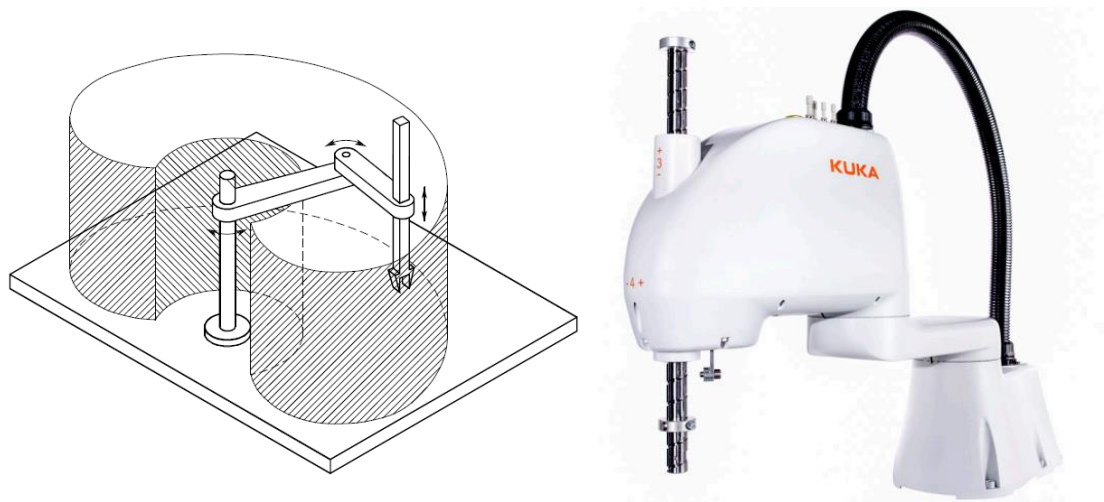
Obrázek 1 - Cylindrický pracovní prostor [3]



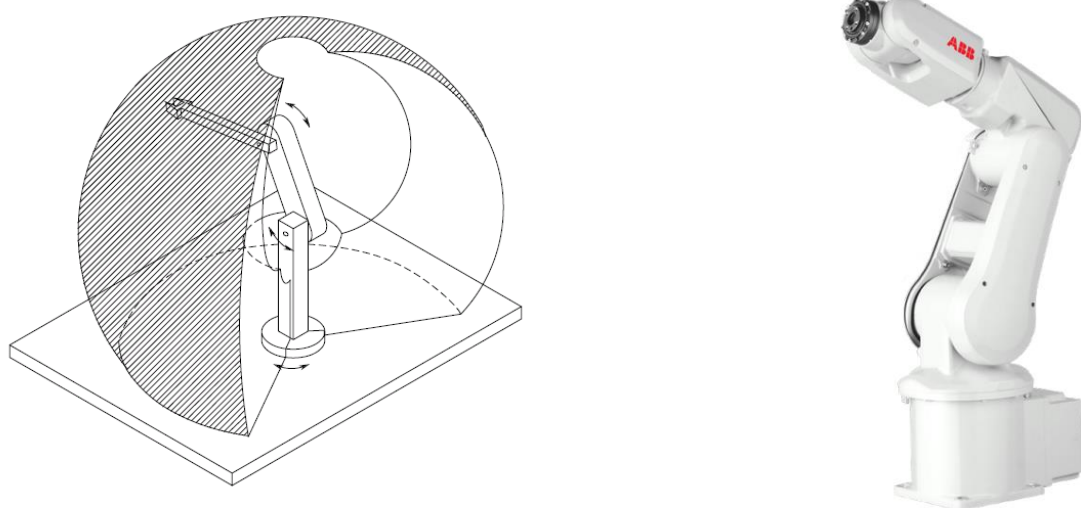
**Unimate 2000 series Robot**



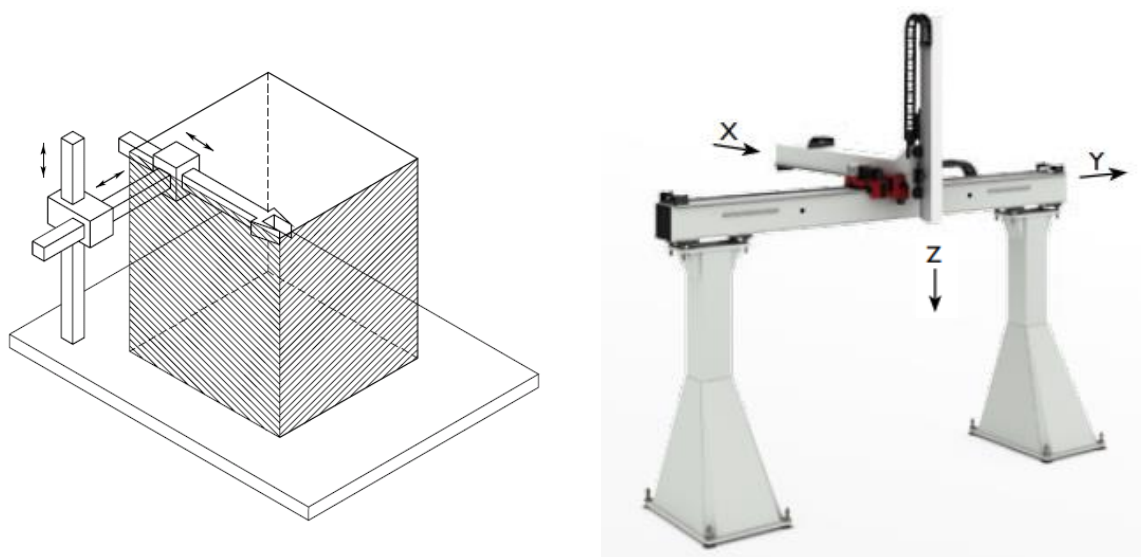
Obrázek 2 - Sférický pracovní prostor [3] [4]



Obrázek 3 - Pracovní prostor pro typ SCARA [3] [5]



Obrázek 4 - Pracovní prostor pro angulární typ [3] [6]



Obrázek 5 - Pracovní prostor pro kartézský typ [3] [7]

## 2 Charakteristika portálového manipulátoru GÜDEL FP-3

Portálový manipulátor GÜDEL FP-3 je určen k přemísťování předmětů z daných pozic po předem definované dráze. Jedná se o 3-osý kartézský manipulátor s elektricky poháněnými osami X, Y a Z.

Výrobce nabízí 3 varianty manipulátoru podle typu zatížení. Je možno zvolit variantu pro vysoké dynamické namáhání, vysokou statickou únosnost nebo univerzální aplikace. Na základě parametrů manipulátoru bylo zjištěno, že se jedná o variantu uzpůsobenou pro vysoké dynamické namáhání. Tato varianta je určena pro nižší statické zatížení a vyšší rychlosti pohybu. [8]

Tabulka 1 - Parametry manipulátoru FP-3 [8]

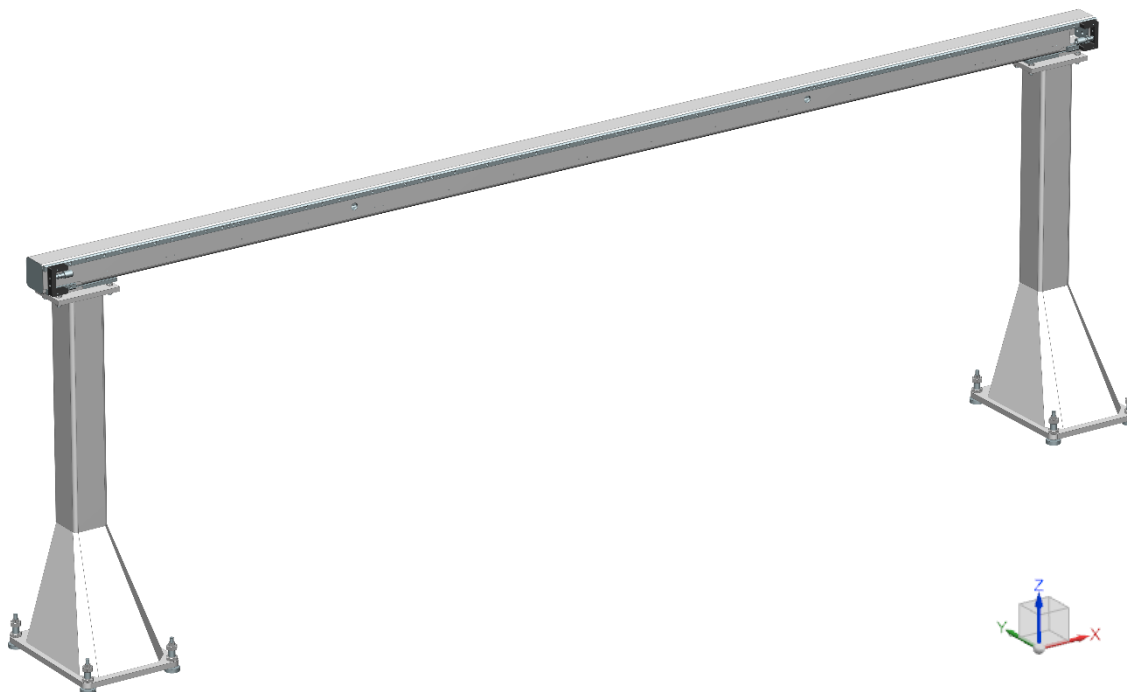
| Osa                                   |                     | X                  |       |       | Y                 |       |       | Z                 |       |       |
|---------------------------------------|---------------------|--------------------|-------|-------|-------------------|-------|-------|-------------------|-------|-------|
| Zdvih                                 | mm                  | $s_x \leq 30000^1$ |       |       | $s_y \leq 3000^1$ |       |       | $s_z \leq 1000^1$ |       |       |
| Užitečné zatížení                     | N                   | 250                | 400   | 630   | 250               | 400   | 630   | 250               | 400   | 630   |
| Rychlost                              | m.min <sup>-1</sup> | 150                | 112,5 | 75    | 150               | 112,5 | 75    | 112,5             | 75    | 45    |
| Zrychlení                             | m.s <sup>-2</sup>   | 2,0                | 1,5   | 1,0   | 5,5               | 4,0   | 3,0   | 10,0              | 2,5   | 1,5   |
| Převodový poměr                       | -                   | 3                  | 4     | 6     | 3                 | 4     | 6     | 4                 | 6     | 10    |
| Velikost převodovky<br>Güdel typu HPG | -                   | 060                | 060   | 060   | 045               | 045   | 045   | 045               | 045   | 045   |
| Posuv v ose na<br>otáčku motoru       | mm                  | 33,33              | 25,00 | 16,67 | 33,33             | 25,00 | 16,67 | 25,00             | 16,67 | 10,00 |
| Doba zrychlení                        | s                   | 1,250              | 1,250 | 1,250 | 0,455             | 0,469 | 0,417 | 0,188             | 0,500 | 0,500 |
| Posuv v ose při<br>zrychlování        | m                   | 1,563              | 1,172 | 0,781 | 0,568             | 0,439 | 0,260 | 0,176             | 0,313 | 0,188 |
| Otáčky motoru                         | min <sup>-1</sup>   | 4500               | 4500  | 4500  | 4500              | 4500  | 4500  | 4500              | 4500  | 4500  |
| Max. kroutící<br>moment motoru        | Nm                  | 7,8                | 4,8   | 2,5   | 4,1               | 2,7   | 1,8   | 5,9               | 3,2   | 2,5   |

Pozn.: Zeleně jsou zvýrazněny hodnoty pro variantu, která je modernizována.

Portálový manipulátor GÜDEL FP-3 můžeme rozdělit do několika skupin. Základem tohoto manipulátoru je ocelová konstrukce. Na této konstrukci jsou upevněny pohony jednotlivých os, lineární vedení, pneumatické prvky, pneumatické a elektrické rozvody, senzory a uchopovací zařízení.

## 2.1 Ocelová konstrukce

Nosná část manipulátoru je tvořena ocelovou konstrukcí. Tato konstrukce se skládá ze 2 portálů. Portál je tvořen 2 sloupy, které jsou horizontálně spojeny ocelovým profilem, kde osa profilu je rovnoběžná s osou X (viz Obrázek 6). Tyto portály nesou lineární vedení, po kterém se pohybuje ocelový profil, jehož osa je rovnoběžná s osou Y.



Obrázek 6 - Portál

### 2.1.1 Sloup

Jedná se o část ocelové konstrukce, která svojí výškou definuje výšku pracovního prostoru. Jde o svařenec složený z podstavy, komolého jehlanu z ocelových desek, čtvercového profilu 200 x 200 mm a horní desky.

V podstavě se nachází komponenty pro vyrovnání nerovností. V horní desce jsou komponenty sloužící k přesnému seřízení.

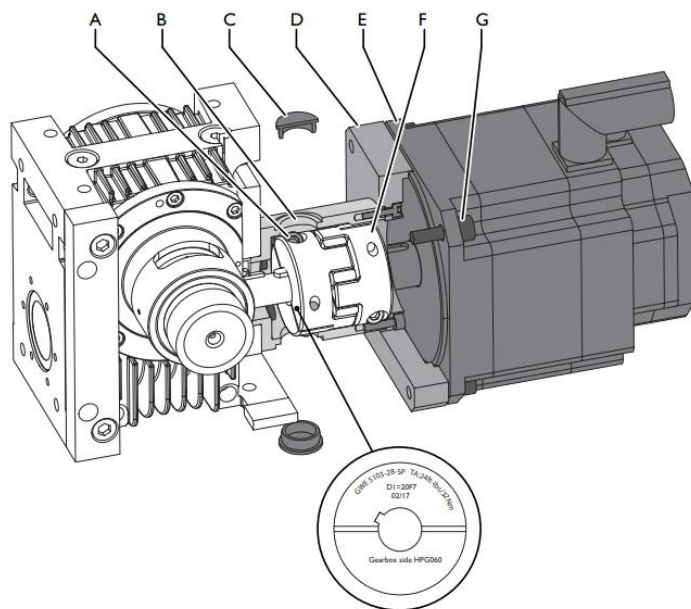
### 2.1.2 Ocelové profily

Horizontální profily (osa X a Y) jsou vyrobeny z oceli S355J2 a jsou obrobena pro dosažení vyšší geometrické přesnosti. Slouží k upevnění vedení a dalšího příslušenství.

## 2.2 Pohonná zařízení

Pohyby manipulátoru zajišťují servomotory od firmy REXROTH spolu se šnekovými převodovkami od firmy GÜDEL. Přenos kroutícího momentu ze servomotoru na převodovku se uskutečňuje pomocí zubové spojky.

- A – spojovací šroub
- B – otvor pro utažení
- C – zátka
- D – příruba motoru
- E – motor
- F – spojka
- G – šroub motoru

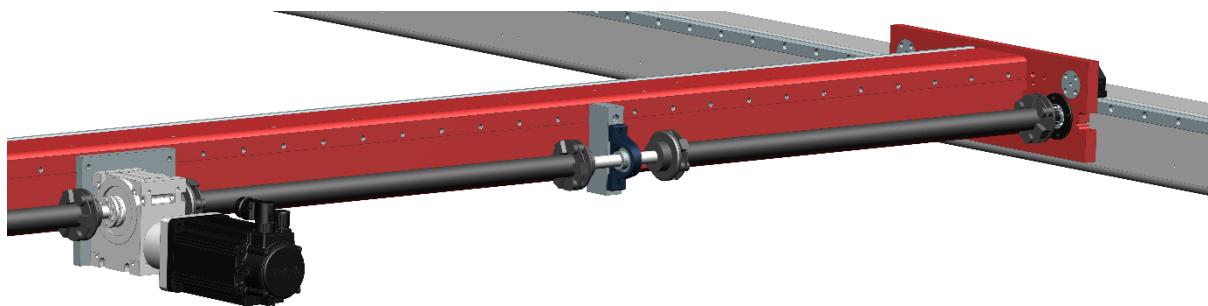


Obrázek 7 - Spojení servomotoru a převodovky zubovou spojkou [9]

### 2.2.1 Pohon osy X

Pohyb ve směru osy X zajišťuje třífázový servomotor s permanentním magnetem typu MSK070D. Kroutící moment je přenášen přes zubovou spojku na šnekovou převodovku typu AE 060L s převodovým poměrem 3. Výstup převodovky je oboustranný a pomocí svěrné hřídelové spojky je spojen s hřídelemi, které přenáší kroutící moment na pastorky u lineárního vedení.

Vzhledem k nutnosti přenést kroutící moment na pastorky, které jsou od převodovky vzdáleny více jak 2000 mm, jsou hnací členy uloženy ve valivých ložiscích. Pro kompenzaci montážních a dalších nepřesností jsou hřídele vybaveny spojkou Centaflex typu X.



Obrázek 8 – Pohon osy X



### 2.2.2 Pohon osy Y

Pohyb ve směru osy Y je zajištěn pomocí třífázového servomotoru s permanentním magnetem typu MSK060C. Kroutící moment je přenášen přes zubovou spojku na šnekovou převodovku typu AE 045L s převodovým poměrem 3. Výstup převodovky je jednostranný a na výstupu se nachází pastorek lineárního vedení.

### 2.2.3 Pohon osy Z

Pohyb ve směru osy Z je zajištěn pomocí třífázového servomotoru s permanentním magnetem typu MSK060C, který je vybaven brzdou s maximálním brzdícím momentem 10 Nm. Kroutící moment je přenášen přes zubovou spojku na šnekovou převodovku typu AE 045L s převodovým poměrem 4. Výstup převodovky je zde stejně jako u pohonu osy Y jednostranný a na výstupu se nachází pastorek lineárního vedení.

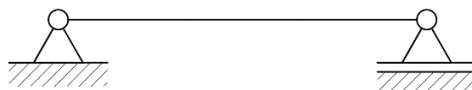
## 2.3 Lineární vedení

Lineární vedení zajišťuje jímání reakčních sil a pohyblivé spojení částí rámu. Vedení použité u manipulátoru se skládá z komponentů od firmy GÜDEL. Konkrétně se jedná o vodící kolejnici, kladku a systém automatického mazání.

### 2.3.1 Kolejnice

Kolejnice tvoří dráhu, po které se pohybuje kladka. U manipulátoru jsou použity kolejnice z řady „MEDIUM DUTY“ velikosti 20. K výrobě byla použita ocel 58CrMoV4. Kolejnice se rozlišují podle tří aspektů. Prvním je tvar vodící plochy, dále zda disponuje ozubeným hřebenem a nakonec její délka. [10]

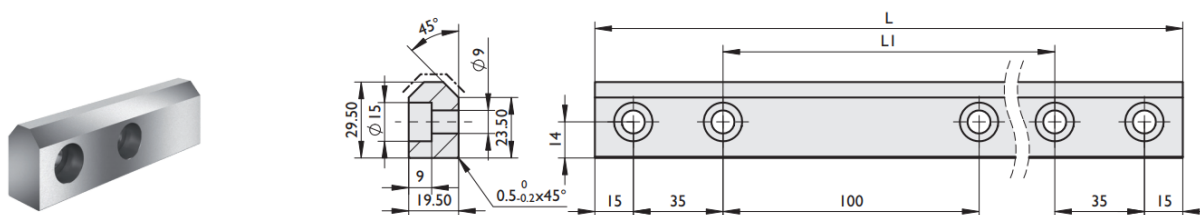
Vodící plocha může být tvaru V, nebo rovná. Kombinací těchto vodících ploch se docílí spojení, které se dá přirovnat ke staticky určitému nosníku na 2 podporách. Rovná plocha odebrává pouze jeden stupeň volnosti (analogie obecné vazby) a plocha tvaru V odebrává 4 stupně volnosti (analogie rotační vazby).



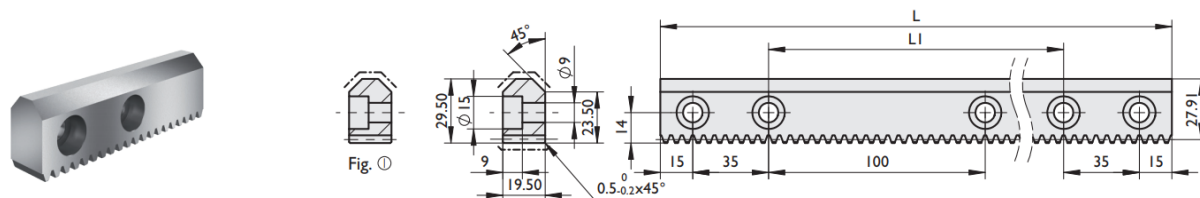
Obrázek 9 - Nosník na 2 podporách

Součástí kolejnice může být i ozubený hřeben, který vytváří spolu s pastorkem mechanismus přeměňující rotační pohyb na lineární.

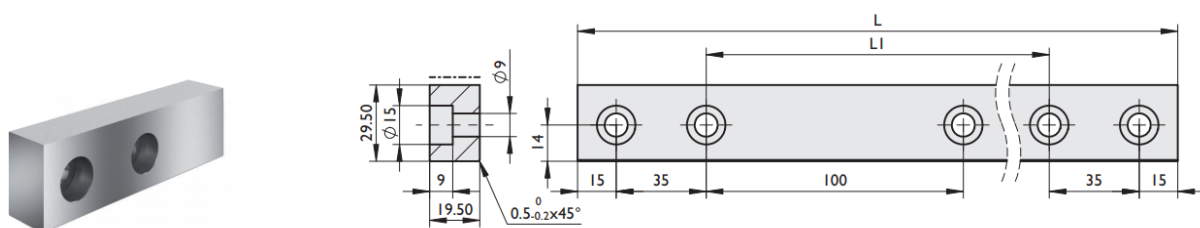
Kolejnicová dráha se skládá z jednotlivých kolejnic, které jsou o délce 1200 mm, 600 mm nebo 1100 mm (zkrácená kolejnice o délce 1200 mm).



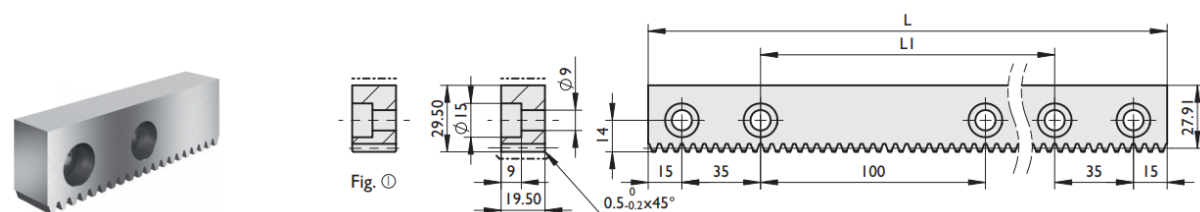
Obrázek 10 - Kolejnice V [10]



Obrázek 11 - Kolejnice V s ozubeným hřebenem [10]



Obrázek 12 - Kolejnice plochá [10]



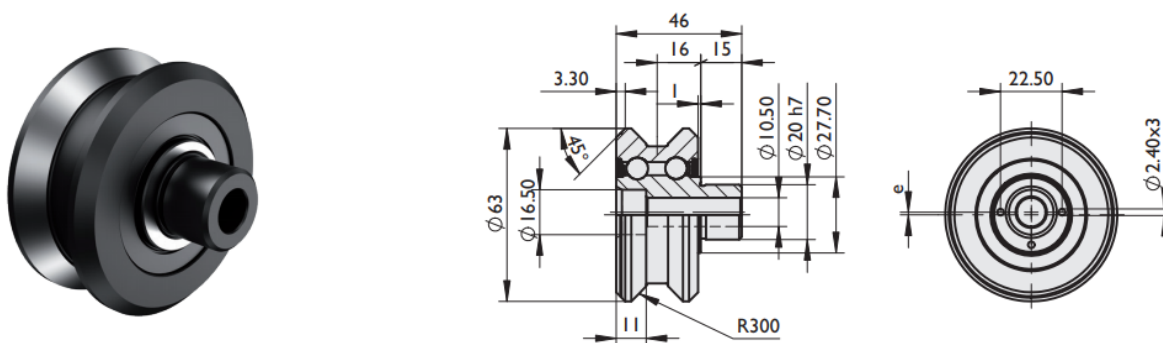
Obrázek 13 - Kolejnice plochá s ozubeným hřebenem [10]

### 2.3.2 Vodící kladka

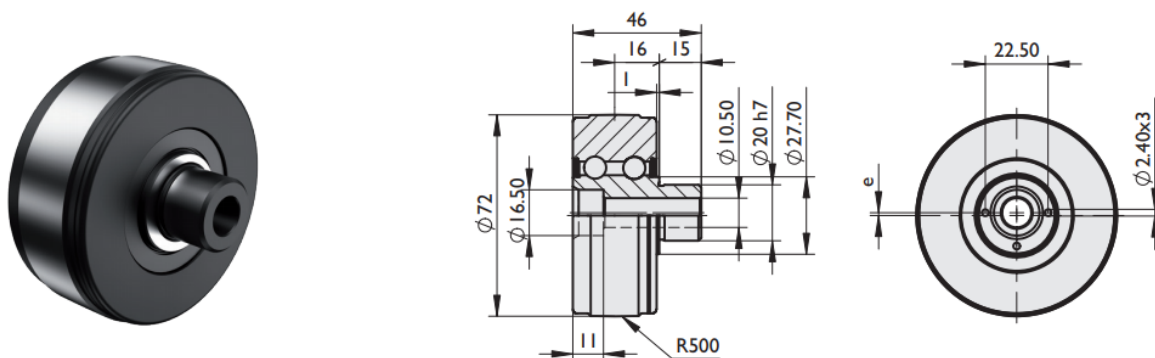
Jedná se o díl přenášející síly na kolejnici, po které se odvaluje. Kladka se skládá z vnějšího kroužku a náboje s excentrickým uložením, kdy excentricita je 1 mm. Mezi těmito díly se nacházejí ve 2 řadách kuličky, které přenášejí zatížení a umožňují odvalování. Axiální vůle je u tohoto dílu v rozmezí 7 – 25 μm.

Excentrické uložení náboje slouží k nastavení kladky tak, aby kladka a kolejnice byly v kontaktu. Po nastavení je kladka přitahována šroubem, který je veden skrz náboj, a tím vznikne silový spoj, které zajistí polohu kladky.

U manipulátoru nalezneme 2 druhy kladek. Jde o kladku pro kolejnici V a kladku pro kolejnici plochou.



Obrázek 14 - Kladka pro kolejnici V [10]



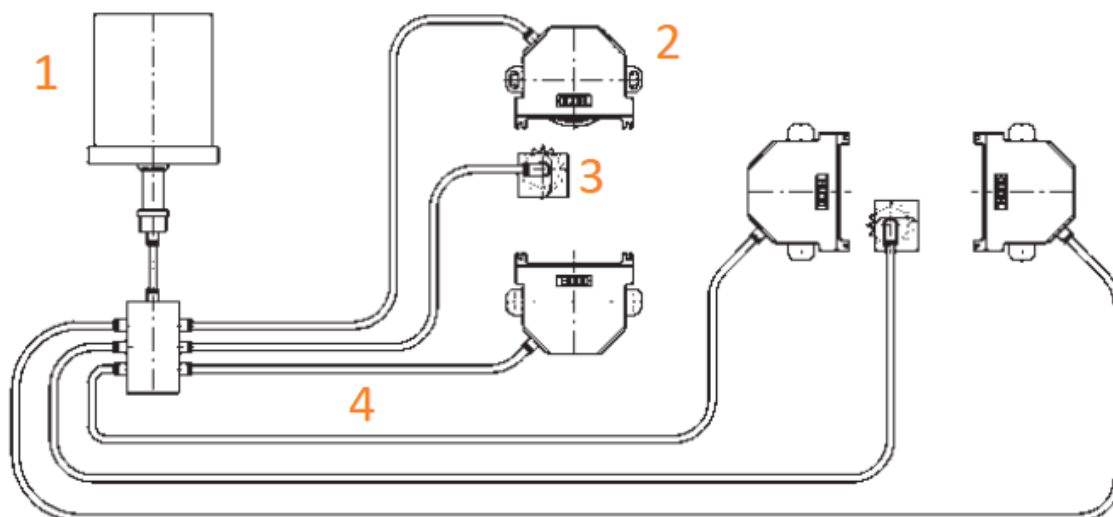
Obrázek 15 - Kladka pro kolejnici plochou [10]

### 2.3.3 Mazání

Pro správnou funkci a delší životnost je důležité dostatečné mazání. Mazáním se snižuje tření a zabraňuje se korozi.

Ložisko kladky je mazáno plastickým mazivem Mobilux EP2, které postačí na nájezd kladky přibližně 100 000 km. [10]

Pro mazání kontaktních ploch a ozubení je použit automatický mazací systém. Tekuté mazivo je distribuováno pomocí hadic k příslušným mazacím zařízením. Konkrétně se jedná o zařízení pro mazání kladek a zařízení pro mazání pastorků.



Obrázek 16 - Schéma mazacího systému [10]

Pozn.: 1 – zdroj maziva, 2 – mazání kladky, 3 – mazání pastorku, 4 – vedení maziva

## 2.4 Osa Z

Hlavní částí osy Z je profil z hliníkové slitiny EN AW-6063 T6 s rozměry průřezu 110x110 mm. Délka profilu je 2006 mm. V profilu jsou vytvořeny otvory s metrickým závitem o velikosti M8, které slouží k připevnění lineárního vedení. [8]

Vedení je tvořeno 2 kolejnicemi V. Jedna z kolejnic disponuje ozubeným hřebenem, který slouží k přenosu sil od pohonu, případně k zajištění polohy.



Obrázek 17 - Hliníkový profil s vedením [10]

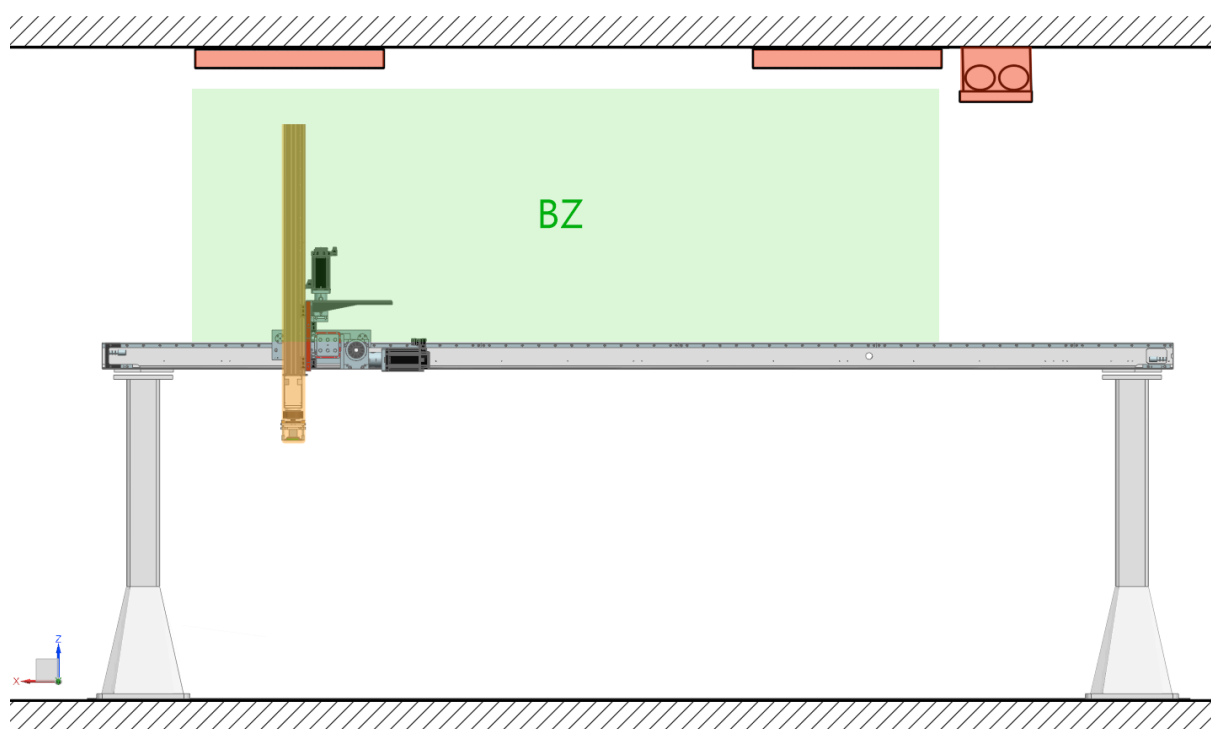
### 3 Návrh teleskopické osy Z

Cílem této diplomové práce je navrhnout konstrukční řešení svislé osy manipulátoru. V současné době je svislá osa tvořena profilem z hliníkové slitiny o délce přibližně 2000 mm (viz kapitola 2.4). Toto konstrukční řešení vyžaduje velký prostor nad manipulátorem pro pohyby při maximálním vysunutí osy Z. Manipulátor je nyní umístěn v prostoru, který omezuje provozní vlastnosti, a proto je potřeba navrhnout takové konstrukční řešení, které bude vyhovující i v těchto podmínkách.

V neomezujícím prostoru neboli prostoru, kde je možnost plného využití zdvihů ve všech 3 směrech, současná konstrukce umožňuje manipulátoru zdvih osy Z až 1390 mm. Při tomto zdvihu dosahuje konec profilu do výšky 3924 mm nad rovinou podlahy.

Aktuální prostor, kde je manipulátor umístěn, omezuje pohyb ve 2 směrech. Vysunutí osy Z je omezeno stropem a osvětlením. Konec profilu může dosahovat při maximálním možném vysunutí až do výšky 3511 mm, tedy na hranici bezpečné zóny BZ (viz Obrázek 18). Dále je omezen pohyb ve směru osy X. Po dohodě se zadavatelem je bezpečná zóna ukončena před potrubím, které je vedeno pod stropem. Zdvih osy X je tedy zkrácen na 4310 mm (z původních 5610 mm).

V této práci je používán pojem „posuv“ ve významu „velikost deformace“ řešené části konstrukce, a nikoliv jako hodnota posuvu pojezdu.



Obrázek 18 - Schéma bezpečné zóny

### 3.1 Specifikace požadavků

Jako jeden z hlavních požadavků je zachování stávajícího vedení pomocí vodících kladek typu FR 20 (včetně roztečí vodících kladek). Dále je potřeba zvětšit zdvih osy Z a zároveň dodržet bezpečnou zónu. Dalším požadavkem bylo dodržení mezních posuvů osy konce pro upevnění efektoru ve směru X a Y do 1 mm s minimální přidanou hmotností.




#### Shrnutí v bodech:

- Zachování stávajícího vedení osy Z
- Zvětšení zdvihu
- Dodržení bezpečné zóny
- Posuvy v X a Y do 1 mm
- Minimální přidaná hmotnost

### 3.2 Návrh variant konstrukčního řešení

Konstrukční řešení se skládá z několika uzlů. Mezi hlavní uzly patří převod, vedení, horní rameno a dolní rameno. Tabulka 2 níže zobrazuje možné kombinace jednotlivých uzlů.

Tabulka 2 - Možnosti řešení jednotlivých uzlů

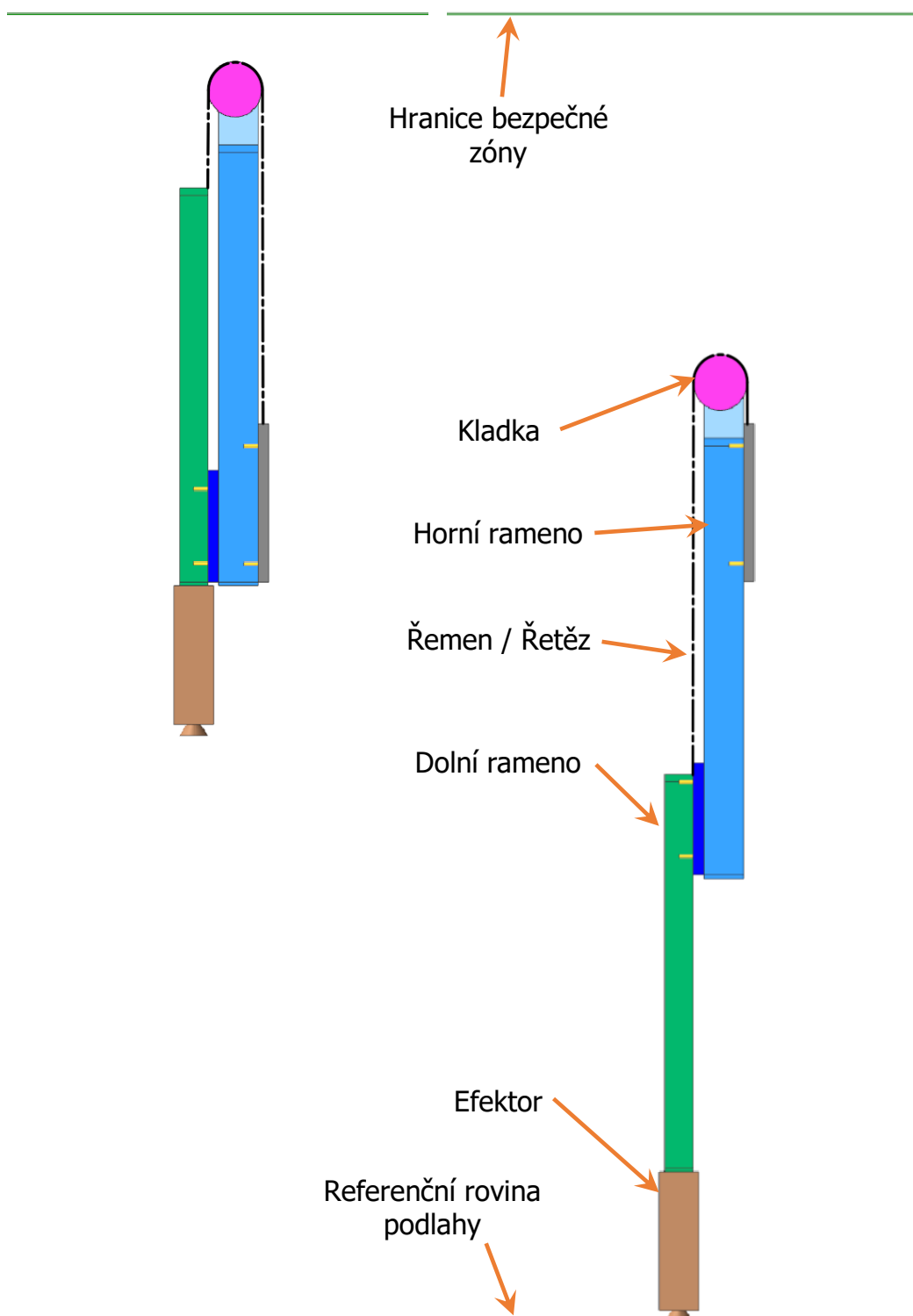
| Převod                  | Hřeben - pastorek   | Řemen - kladka  | Řetěz - kladka   |
|-------------------------|---|---|--|
| Vedení<br>(mezi rameny) | Kuličkové   | Vodící kladky   | -  |
| Rameno horní            | Svařované   | Hliníkový profil<br>110x110 (Güdel)   | Šroubované   |
| Rameno dolní            | Hliníkový profil<br>80x40 (ITEM)  | Hliníkový profil<br>120x40 (ITEM)   | Hliníkový profil<br>80x80 (Güdel)  |
|                         | <b>A1</b>   | <b>A2</b>   | <b>B</b>   |
|                         |  |  |  |

#### 3.2.1 Varianta A1

Varianta A1 se skládá z horního ramene, které je tvořeno hliníkovým profilem Güdel 110 x 110 mm, a dolního ramene, které je tvořeno hliníkovým profilem Güdel 80 x 80 mm. Tato dvě ramena jsou spojena lineárním vedením z řady MD 15, které je určeno firmou Güdel pro profil 80 x 80 mm. Převod je zde řešen pomocí řemene a kladky upevněné k hornímu ramenu.

### 3.2.2 Varianta A2

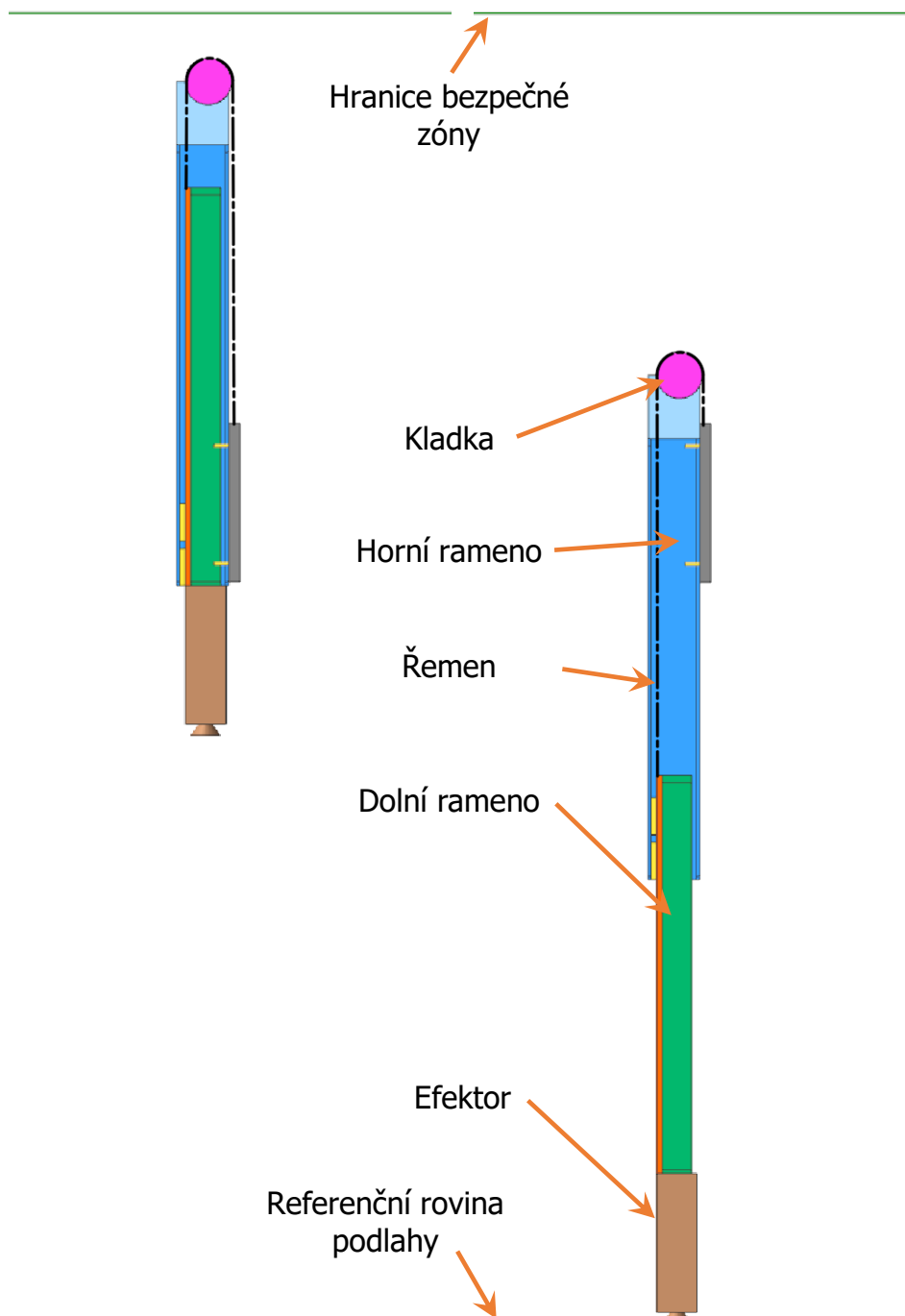
Varianta A2 je složena ze stejných dílů jako varianta A1. Jediným rozdílem je provedení převodu, který je zde zajištěn řetězem, a s tím souvisejících dílů.



Obrázek 19 - Struktura variant A1 a A2

### 3.2.3 Varianta B

Varianta B disponuje horním ramenem, které je tvořeno dvěma ocelovými profily UPE 100 svařenými tak, aby po svaření vytvořily dutý profil. Dolní rameno této varianty je tvořeno hliníkovým profilem ITEM 80 x 40 mm. Tato dvě ramena jsou spojena kuličkovým lineárním vedením od firmy HIWIN, které je složeno z dvou vozíků WEH 35 CA a kolejnice WER 35 R. Převod je zde řešen pomocí řemene a kladky upevněné k hornímu ramenu.

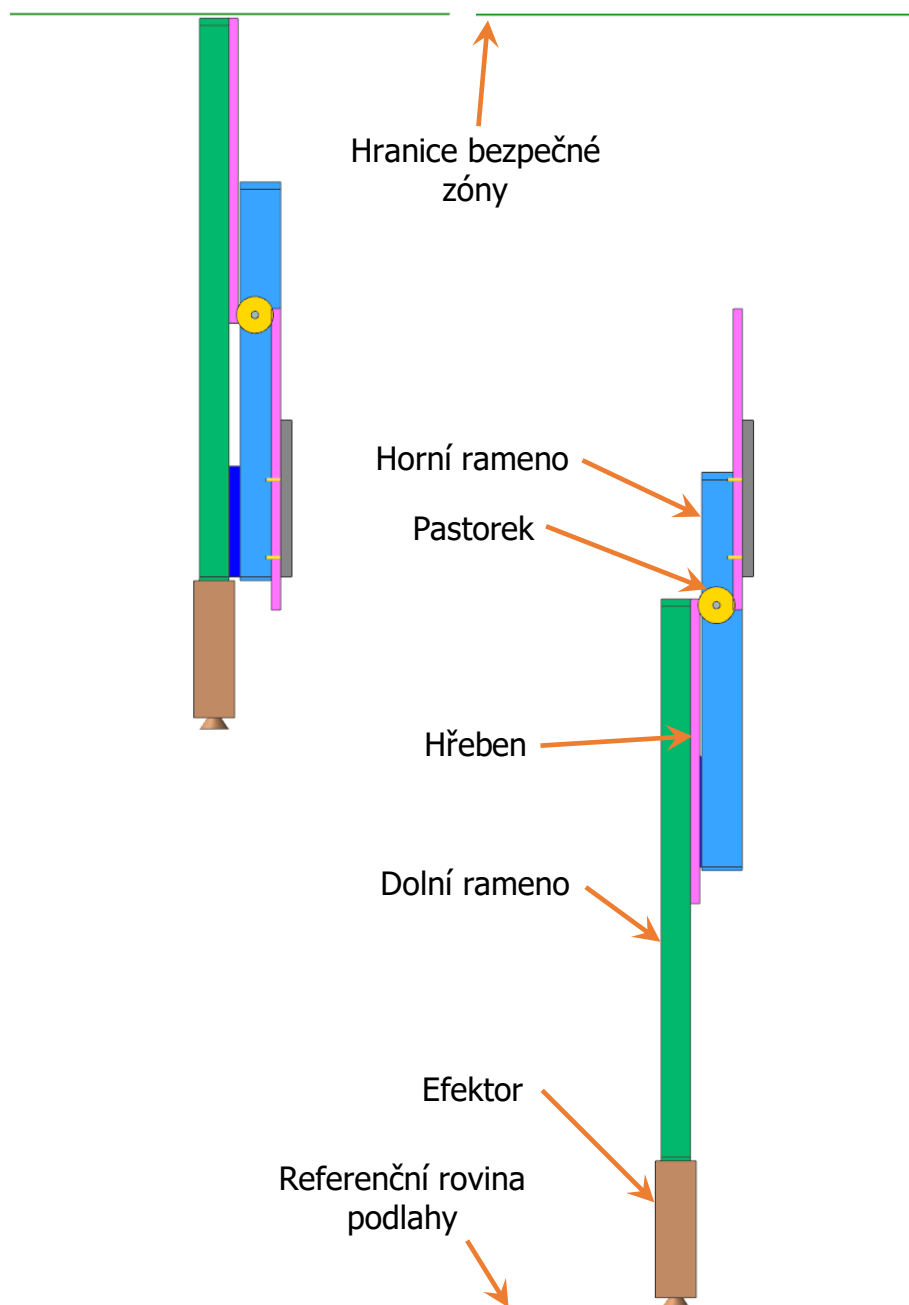


Obrázek 20 - Struktura varianty B



### 3.2.4 Varianta C

Varianta C se skládá z horního ramene, které je tvořeno hliníkovým profilem Güdel 110 x 110 mm, a dolního ramene, které je tvořeno hliníkovým profilem ITEM 120 x 40 mm. Tato dvě ramena jsou spojena kuličkovým lineárním vedením od firmy HIWIN, které je složeno ze dvou vozíků HGW 30 HC a kolejniče HGR 30 R. Převod je zde uskutečněn pomocí dvou hřebenů a pastorku, který je upevněn k hornímu ramenu. Aby nedocházelo k asymetrickému zatěžování od převodu, je převod navržen z obou stran.



Obrázek 21 - Struktura varianty C

## 4 Výpočty

Pro výpočty byl použit software PTC Mathcad Express Prime 6, který při případné změně vstupních hodnot automaticky přepočítá předdefinované vztahy. Kompletní výpočty jsou k dispozici ve výpočtové zprávě, která se nachází v příloze.

### 4.1 Výpočty varianty A1

Varianta A1 a A2 se liší pouze členem, který slouží k převodu mezi horním a dolním ramenem, a provedením kladky, která je s tímto členem v interakci. Výpočet těchto variant byl se lišil pouze hmotností kladky, která se předpokládá větší u varianty A1, a proto byl proveden výpočet této varianty.

U výpočtu bylo provedeno zjednodušení, kdy se zanedbává rozdíl vzdáleností těžišť od roviny XZ a byly brány jako 0.

Pro výpočet bylo konstrukční řešení rozděleno na dvě části. První část tvoří dolní rameno, které je složeno z hliníkového profilu Güdel 80 x 80 mm a ze dvou kolejnic z řady MD 15. Druhou část tvoří hliníkový profil Güdel 110 x 110 mm, dvě kolejnice z řady MD 20 a deska, která slouží k uložení lineárního vedení dolního ramena.

Byly řešeny 4 zatěžovací stavy, které se liší směrem pohybu. Jedná se o směry X, Y, Z a kombinaci všech 3 směrů. Uvažovaly se pohyby, které nejvíce zatěžují uložení ramen, a maximální možné zrychlení pro každý směr.

Výpočet této varianty v plném rozsahu se nachází v kapitole 1 v příloze 1.

Tabulka 3 - Parametry pro výpočet - Varianta A1 [8]

|               | Parametr                     | Značka   | Hodnota              | Jednotky            |        |      |
|---------------|------------------------------|----------|----------------------|---------------------|--------|------|
| Katalog GÜDEL | Užitečné zatížení            | F        | 250                  | [N]                 |        |      |
|               | Zrychlení ve směru X         | $a_x$    | 2                    | [m/s <sup>2</sup> ] |        |      |
|               | Zrychlení ve směru Y         | $a_y$    | 5,5                  | [m/s <sup>2</sup> ] |        |      |
|               | Zrychlení ve směru Z         | $a_z$    | 10                   | [m/s <sup>2</sup> ] |        |      |
| Z modelu      | Rozměry<br>(viz dané schéma) | a        | 45,25                | [mm]                |        |      |
|               |                              | b        | 205                  | [mm]                |        |      |
|               |                              | c        | 316                  | [mm]                |        |      |
|               |                              | d        | 907,5                | [mm]                |        |      |
|               |                              | k        | 42,25                | [mm]                |        |      |
|               |                              | $k_2$    | 57,5                 | [mm]                |        |      |
|               |                              | p        | 6                    | [mm]                |        |      |
|               |                              | r        | 32,615               | [mm]                |        |      |
|               |                              | $x_K$    | 62,25                | [mm]                |        |      |
|               |                              | $x_R$    | 153,25               | [mm]                |        |      |
|               |                              | $x_T$    | 26,34                | [mm]                |        |      |
|               |                              | $x_{T2}$ | 57,17                | [mm]                |        |      |
|               |                              | $z_{K2}$ | 1170                 | [mm]                |        |      |
|               |                              | $z_T$    | 506,77               | [mm]                |        |      |
|               |                              | $z_{T2}$ | 666,58               | [mm]                |        |      |
|               |                              | $z_U$    | 1049,5               | [mm]                |        |      |
|               |                              |          | Hmot. dolního ramena | $m_c$               | 12,545 | [kg] |
|               |                              |          | Hmot. horního ramena | $m_{c2}$            | 28,777 | [kg] |
|               | Hmot. kladky                 | $m_K$    | 4,926                | [kg]                |        |      |

Z převodu pomocí kladky a řemene vychází následující závislost mezi zrychlením ve směru osy Z horního a dolního ramena. Podle této závislosti je třeba snížit limity manipulátoru. Pokud by nebylo softwarově upraveno zrychlení osy Z, pohyboval by se efektor manipulátoru 2x rychleji než u původního konstrukčního řešení. Na zrychlení jsou přímo závislé setrvačné účinky. Z tohoto důvodu byla zvolena cesta softwarového omezení zrychlení, které nenavýšuje setrvačné účinky.

$$a_{z2} = \frac{a_z}{2} = 5 \frac{m}{s^2}$$

$a_{z2}$  – zrychlení horního ramena

**Zatížení od hmotnosti**

$$G_c = m_c \cdot g = 123 \text{ N}$$

$G_c$  – tíhové zatížení dolního ramena

$$G_{c2} = m_{c2} \cdot g = 282,2 \text{ N}$$

$G_{c2}$  – tíhové zatížení horního ramena

$$G_K = m_K \cdot g = 48,3 \text{ N}$$

$G_K$  – tíhové zatížení od kladky

Výrobce udává užitečné zatížení na přírubě  $F = 250 \text{ N}$ . Tato hodnota se dá vyjádřit jako hmotný bod (HB) s hmotností  $m_U$ . Vyjádření hmotností umožní zjištění příslušných setrvačných účinků.

$$F = m_U \cdot g = G_U \quad \Rightarrow \quad m_U = \frac{G_U}{g} = 25,493 \text{ kg}$$

**Setrvačné účinky**

- **Setrvačné síly od zrychlení  $a_x$**

$$S_x = m_c \cdot a_x = 25,1 \text{ N}$$

$S_x$  – na dolní rameno

$$S_{2x} = m_{c2} \cdot a_x = 57,6 \text{ N}$$

$S_{2x}$  – na horní rameno

$$S_{Ux} = m_U \cdot a_x = 51 \text{ N}$$

$S_{Ux}$  – na HB

- **Setrvačné síly od zrychlení  $a_y$**

$$S_y = m_c \cdot a_y = 69 \text{ N}$$

$S_y$  – na dolní rameno

$$S_{2y} = m_{c2} \cdot a_y = 158,3 \text{ N}$$

$S_{2y}$  – na horní rameno

$$S_{Uy} = m_U \cdot a_y = 140,2 \text{ N}$$

$S_{Uy}$  – na HB

- **Setrvačné síly od zrychlení  $a_z$  ( $a_{z2}$ )**

$$S_z = m_c \cdot a_z = 125,5 \text{ N}$$

$S_z$  – na dolní rameno

$$S_{2z} = m_{c2} \cdot a_{z2} = 143,9 \text{ N}$$

$S_{2z}$  – na horní rameno

$$S_{Uz} = m_U \cdot a_z = 254,9 \text{ N}$$

$S_{Uz}$  – na HB

### 4.1.1 Reakční účinky

#### Pohyb ve směru X

##### *Rameno dolní*

$$\begin{aligned}\sum F_{ix} &= 0; & R_{Bx} - R_{Ax} - S_x - S_{Ux} &= 0 \\ \sum F_{iz} &= 0; & G_U - R_R + G_C &= 0 \\ \sum M_{iA} &= 0; & G_U \cdot a + S_{Ux} \cdot z_U + G_C \cdot x_T + S_x \cdot z_T - R_{Bx} \cdot b &= 0\end{aligned}$$

$$R_{Bx} = \frac{G_U \cdot a + S_{Ux} \cdot z_U + G_C \cdot x_T + S_x \cdot z_T}{b} = 394 \text{ N}$$

$$R_{Ax} = R_{Bx} - S_x - S_{Ux} = 318 \text{ N}$$

$$R_R = G_U + G_C = 373 \text{ N}$$

##### *Síla od kladky*

$$F_K = G_K + 2 \cdot R_R = 794,4 \text{ N} \quad (\text{viz Obrázek 26 - Schéma zatížení kladky})$$

##### *Rameno horní*

$$\begin{aligned}\sum F_{ix} &= 0; & R_{Dx} - R_{Cx} - S_{2x} - R_{Bx} + R_{Ax} &= 0 \\ \sum F_{iy} &= 0; & F_R - R_{Cy} - R_{Dy} &= 0 \\ \sum F_{iz} &= 0; & F_K - R_{Pz} + G_{c2} &= 0 \\ \sum M_{iC} &= 0; & F_K \cdot x_K - R_{Dx} \cdot c + G_{c2} \cdot x_{T2} + S_{2x} \cdot z_{T2} - R_{Ax} \cdot d + R_{Bx} \cdot (b + d) &= 0 \\ \sum M_{iO} &= 0; & R_{Dy} \cdot c - R_{Pz} \cdot r - F_R \cdot p &= 0\end{aligned}$$

$$R_{Dx} = \frac{F_K \cdot x_K + G_{c2} \cdot x_{T2} + S_{2x} \cdot z_{T2} - R_{Ax} \cdot d + R_{Bx} \cdot (b + d)}{c} = 803 \text{ N}$$

$$R_{Cx} = R_{Dx} - S_{2x} - R_{Bx} + R_{Ax} = 669,4 \text{ N}$$

$$R_{Pz} = F_K + G_{c2} = 1076,6 \text{ N}$$

- **Síly v ozubení hřeben - pastorek**

$$F_o = R_{Pz}$$

$F_o$  – obvodová síla;  $\alpha = 20^\circ$  (úhel záběru)

$$F_R = F_o \cdot \tan(\alpha) = 391,8 \text{ N}$$

$F_R$  – radiální síla

$$R_{Dy} = \frac{R_{Pz} \cdot r + F_R \cdot p}{c} = 118,6 \text{ N}$$

$$R_{Cy} = F_R - R_{Dy} = 273,3 \text{ N}$$



**Pohyb ve směru Y****Rameno dolní**

$$\begin{aligned} \sum F_{ix} &= 0; & R_{Bx} - R_{Ax} &= 0 \\ \sum F_{iy} &= 0; & S_y + S_{Uy} - R_{By} + R_{Ay} &= 0 \\ \sum F_{iz} &= 0; & G_U - R_R + G_C &= 0 \\ \sum M_{iA} &= 0; & G_U \cdot a + G_C \cdot x_T - R_{Bx} \cdot b &= 0 \\ \sum M_{iP} &= 0; & R_{By} \cdot b - S_{Uy} \cdot z_U - S_y \cdot z_T &= 0 \end{aligned}$$

$$R_{Bx} = \frac{G_U \cdot a + G_C \cdot x_T}{b} = 71 \text{ N}$$

$$R_{Ax} = R_{Bx} = 71 \text{ N}$$

$$R_{By} = \frac{S_{Uy} \cdot z_U + S_y \cdot z_T}{b} = 888,4 \text{ N}$$

$$R_{Ay} = R_{By} - S_y - S_{Uy} = 679,2 \text{ N}$$

$$R_R = G_U + G_C = 373 \text{ N}$$

**Síla od kladky**

$$F_K = G_K + 2 \cdot R_R = 794,4 \text{ N} \quad (\text{viz Obrázek 26 - Schéma zatížení kladky})$$

**Rameno horní**

$$\begin{aligned} \sum F_{ix} &= 0; & R_{Dx} - R_{Cx} - R_{Bx} + R_{Ax} &= 0 \\ \sum F_{iy} &= 0; & F_R + R_{Cy} - R_{Dy} + S_{2y} + R_{By} - R_{Ay} &= 0 \\ \sum F_{iz} &= 0; & F_K - R_{Pz} + G_{C2} &= 0 \\ \sum M_{iC} &= 0; & F_K \cdot x_K - R_{Dx} \cdot c + G_{C2} \cdot x_{T2} - R_{Ax} \cdot d + R_{Bx} \cdot (b + d) &= 0 \\ \sum M_{iO} &= 0; & R_{Dy} \cdot c - R_{Pz} \cdot r - F_R \cdot p - S_{2y} \cdot z_{T2} + R_{Ay} \cdot d - R_{By} \cdot (b + d) &= 0 \end{aligned}$$

$$R_{Dx} = \frac{F_K \cdot x_K + G_{C2} \cdot x_{T2} - R_{Ax} \cdot d + R_{Bx} \cdot (b + d)}{c} = 253,6 \text{ N}$$

$$R_{Cx} = R_{Dx} - R_{Bx} + R_{Ax} = 253,6 \text{ N}$$

$$R_{Pz} = F_K + G_{C2} = 1076,6 \text{ N}$$

- Síly v ozubení hřeben - pastorek**

$$F_O = R_{Pz}$$

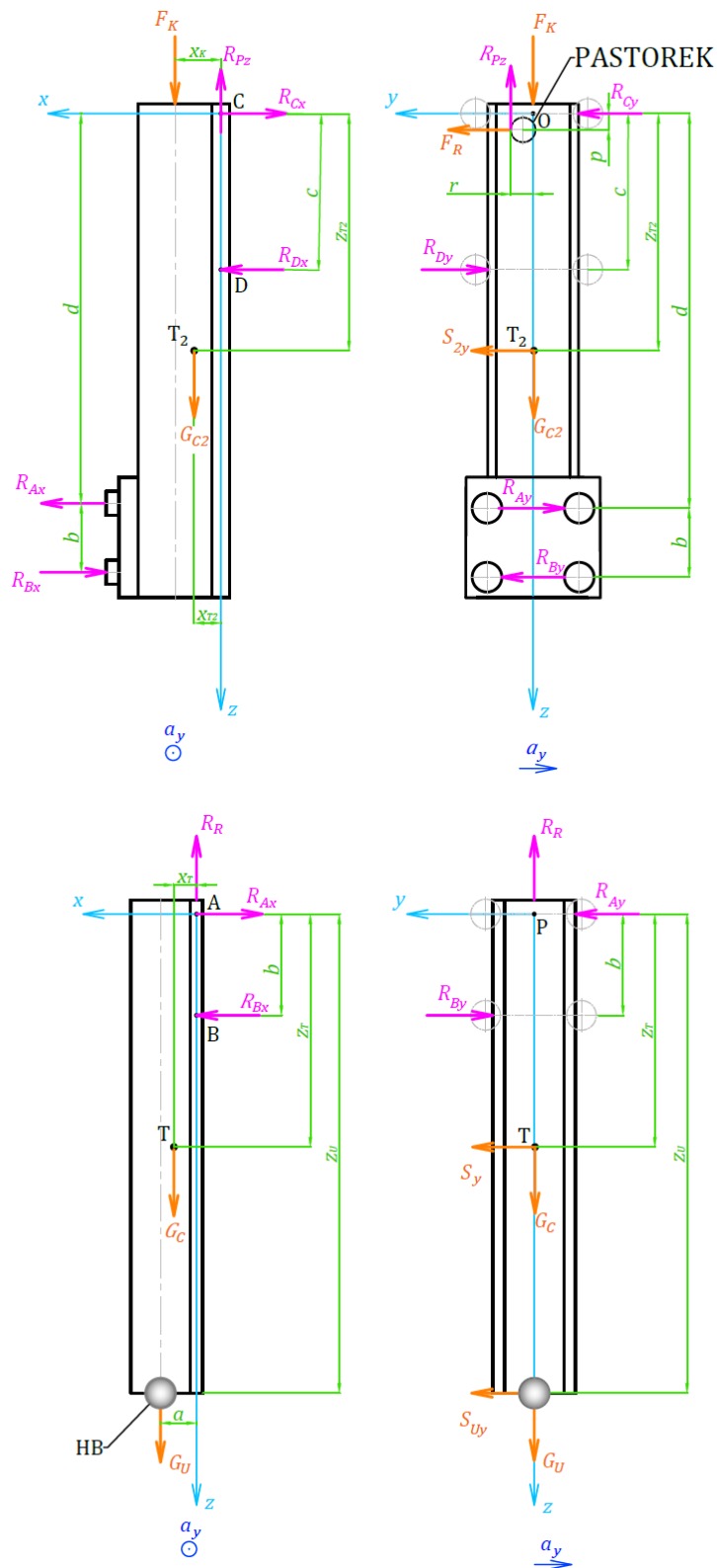
$F_O$  – obvodová síla;  $\alpha = 20^\circ$  (úhel záběru)

$$F_R = F_O \cdot \tan(\alpha) = 391,8 \text{ N}$$

$F_R$  – radiální síla

$$R_{Dy} = \frac{R_{Pz} \cdot r + F_R \cdot p + S_{2y} \cdot z_{T2} - R_{Ay} \cdot d + R_{By} \cdot (b + d)}{c} = 1629,6 \text{ N}$$

$$R_{Cy} = R_{Dy} - F_R - S_{2y} - R_{By} + R_{Ay} = 870,2 \text{ N}$$



Obrázek 23 - Schéma zatížení - pohyb ve směru Y - Varianta A1



**Pohyb ve směru Z****Rameno dolní**

$$\sum F_{ix} = 0; \quad R_{Bx} - R_{Ax} = 0$$

$$\sum F_{iz} = 0; \quad G_U + S_z + S_{UZ} - R_R + G_c = 0$$

$$\sum M_{iA} = 0; \quad G_U \cdot a + S_{UZ} \cdot a + G_c \cdot x_T + S_z \cdot x_T - R_{Bx} \cdot b = 0$$

$$R_{Bx} = \frac{G_U \cdot a + S_{UZ} \cdot a + G_c \cdot x_T + S_z \cdot x_T}{b} = 143,4 \text{ N}$$

$$R_{Ax} = R_{Bx} = 143,4 \text{ N}$$

$$R_R = G_U + S_z + S_{UZ} + G_c = 753,4 \text{ N}$$

**Síla od kladky**

$$F_K = G_K + 2 \cdot R_R = 1555,1 \text{ N} \quad (\text{viz. Obrázek 26 - Schéma zatížení kladky})$$

**Rameno horní**

$$\sum F_{ix} = 0; \quad R_{Dx} - R_{Cx} - R_{Bx} + R_{Ax} = 0$$

$$\sum F_{iy} = 0; \quad F_R - R_{Cy} - R_{Dy} = 0$$

$$\sum F_{iz} = 0; \quad F_K - R_{Pz} + G_{c2} + S_{2z} = 0$$

$$\sum M_{iC} = 0; \quad F_K \cdot x_K - R_{Dx} \cdot c + G_{c2} \cdot x_{T2} + S_{2z} \cdot x_{T2} - R_{Ax} \cdot d + R_{Bx} \cdot (b + d) = 0$$

$$\sum M_{iO} = 0; \quad R_{Dy} \cdot c - R_{Pz} \cdot r - F_R \cdot p = 0$$

$$R_{Dx} = \frac{F_K \cdot x_K + G_{c2} \cdot x_{T2} + S_{2z} \cdot x_{T2} - R_{Ax} \cdot d + R_{Bx} \cdot (b + d)}{c} = 476,5 \text{ N}$$

$$R_{Cx} = R_{Dx} - R_{Bx} + R_{Ax} = 476,5 \text{ N}$$

$$R_{Pz} = F_K + G_{c2} + S_{2z} = 1981,2 \text{ N}$$

- Síly v ozubení hřeben - pastorek**

$$F_o = R_{Pz}$$

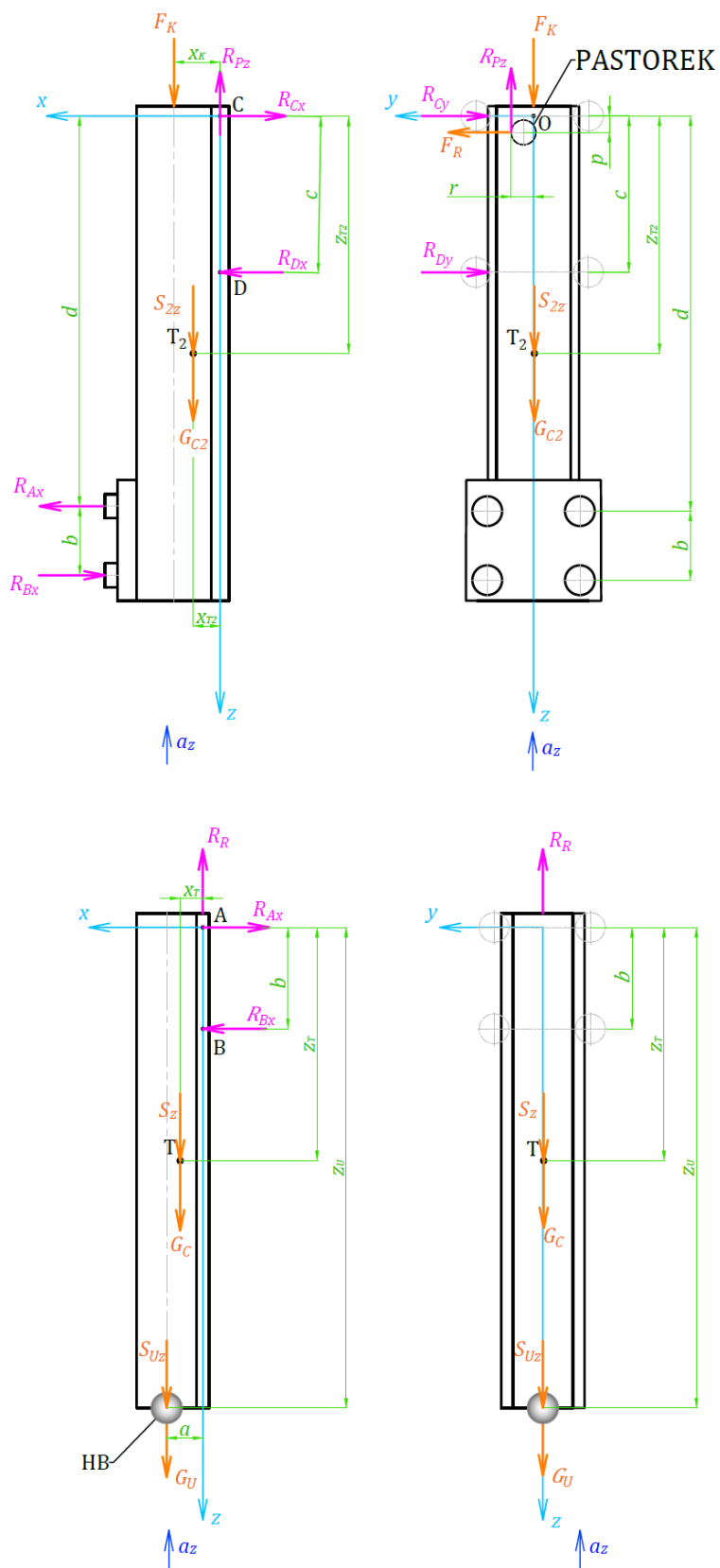
$F_o$  – obvodová síla;  $\alpha = 20^\circ$  (úhel záběru)

$$F_R = F_o \cdot \tan(\alpha) = 721,1 \text{ N}$$

$F_R$  – radiální síla

$$R_{Dy} = \frac{R_{Pz} \cdot r + F_R \cdot p}{c} = 218,2 \text{ N}$$

$$R_{Cy} = F_R - R_{Dy} = 502,9 \text{ N}$$



Obrázek 24 - Schéma zatížení - pohyb ve směru Z - Varianta A1

**Pohyb ve směru X+Y+Z****Rameno dolní**

$$\begin{aligned} \sum F_{ix} &= 0; & R_{Bx} - R_{Ax} - S_x - S_{Ux} &= 0 \\ \sum F_{iy} &= 0; & S_y + S_{Uy} - R_{By} + R_{Ay} &= 0 \\ \sum F_{iz} &= 0; & G_U + S_z + S_{Uz} - R_R + G_c &= 0 \\ \sum M_{iA} &= 0; & G_U \cdot a + S_{Uz} \cdot a + S_{Ux} \cdot z_U + G_c \cdot x_T + S_z \cdot x_T + S_x \cdot z_T - R_{Bx} \cdot b &= 0 \\ \sum M_{iP} &= 0; & R_{By} \cdot b - S_{Uy} \cdot z_U - S_y \cdot z_T &= 0 \end{aligned}$$

$$R_{Bx} = \frac{G_U \cdot a + S_{Uz} \cdot a + S_{Ux} \cdot z_U + G_c \cdot x_T + S_z \cdot x_T + S_x \cdot z_T}{b} = 466,4 \text{ N}$$

$$R_{Ax} = R_{Bx} - S_x - S_{Ux} = 390,4 \text{ N}$$

$$R_{By} = \frac{S_{Uy} \cdot z_U + S_y \cdot z_T}{b} = 888,4 \text{ N}$$

$$R_{Ay} = R_{By} - S_y - S_{Uy} = 679,2 \text{ N}$$

$$R_R = G_U + S_z + S_{Uz} + G_c = 753,4 \text{ N}$$

**Síla od kladky**

$$F_K = G_K + 2 \cdot R_R = 1555,1 \text{ N} \quad (\text{viz Obrázek 26 - Schéma zatížení kladky})$$

**Rameno horní**

$$\begin{aligned} \sum F_{ix} &= 0; & R_{Dx} - R_{Cx} - S_{2x} - R_{Bx} + R_{Ax} &= 0 \\ \sum F_{iy} &= 0; & F_R + R_{Cy} - R_{Dy} + S_{2y} + R_{By} - R_{Ay} &= 0 \\ \sum F_{iz} &= 0; & F_K - R_{Pz} + G_{c2} + S_{2z} &= 0 \\ \sum M_{iC} &= 0; & F_K \cdot x_K - R_{Dx} \cdot c + G_{c2} \cdot x_{T2} + S_{2z} \cdot x_{T2} - R_{Ax} \cdot d + R_{Bx} \cdot (b + d) &= 0 \\ \sum M_{iO} &= 0; & R_{Dy} \cdot c - R_{Pz} \cdot r - F_R \cdot p - S_{2y} \cdot z_{T2} + R_{Ay} \cdot d - R_{By} \cdot (b + d) &= 0 \end{aligned}$$

$$R_{Dx} = \frac{F_K \cdot x_K + G_{c2} \cdot x_{T2} + S_{2z} \cdot x_{T2} - R_{Ax} \cdot d + R_{Bx} \cdot (b + d)}{c} = 904,5 \text{ N}$$

$$R_{Cx} = R_{Dx} - R_{Bx} + R_{Ax} = 828,4 \text{ N}$$

$$R_{Pz} = F_K + G_{c2} + S_{2z} = 1981,2 \text{ N}$$

- Síly v ozubení hřeben - pastorek**

$$F_o = R_{Pz}$$

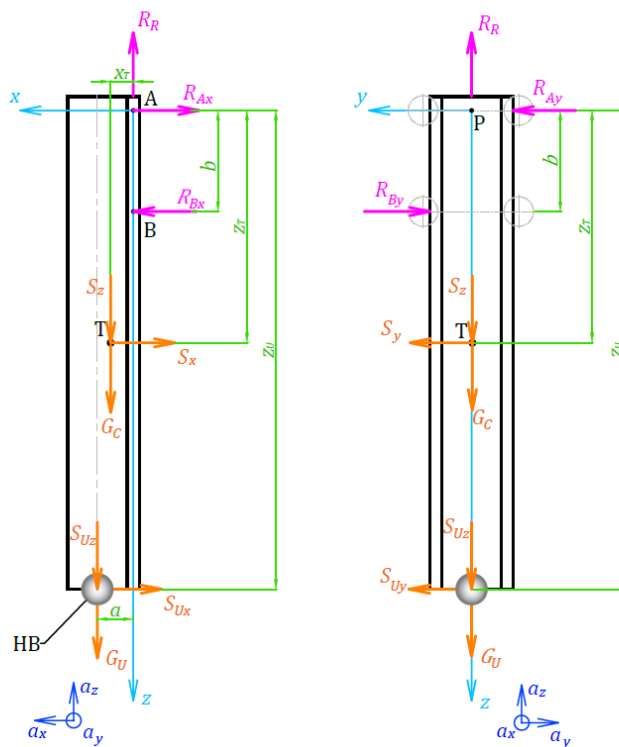
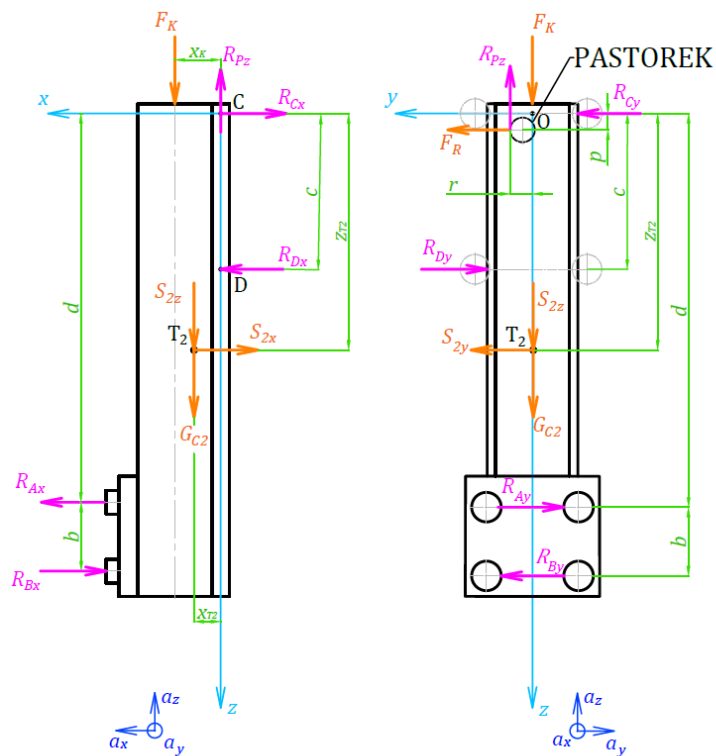
$F_o$  – obvodová síla;  $\alpha = 20^\circ$  (úhel záběru)

$$F_R = F_o \cdot \tan(\alpha) = 721,1 \text{ N}$$

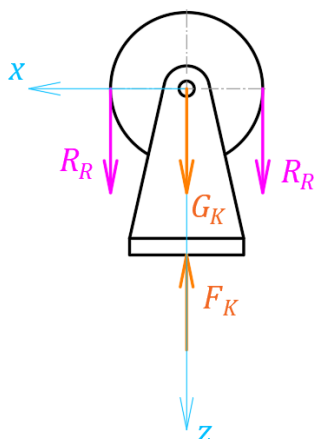
$F_R$  – radiální síla

$$R_{Dy} = \frac{R_{Pz} \cdot r + F_R \cdot p + S_{2y} \cdot z_{T2} - R_{Ay} \cdot d + R_{By} \cdot (b + d)}{c} = 1729,2 \text{ N}$$

$$R_{Cy} = R_{Dy} - F_R - S_{2y} - R_{By} + R_{Ay} = 640,6 \text{ N}$$



Obrázek 25 - Schéma zatížení - pohyb ve směru X+Y+Z - Varianta A1



Obrázek 26 - Schéma zatížení kladky

#### 4.1.2 Přídavné zatížení vodících kladek od setrvačných účinků

Vlivem zrychlení ve směru Y vznikají setrvačné síly, jejichž nositelka neprochází posuvnou vazbou, a tím vzniká klopný moment. Tento klopný moment zachycují kladky v podobě axiálního zatížení.

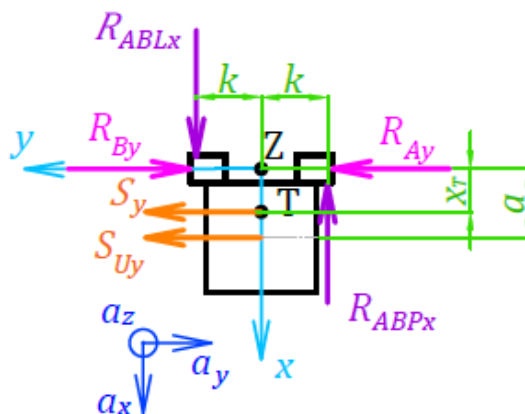
##### Rameno dolní

$$\begin{aligned} \sum F_{ix} &= 0; & R_{ABLx} - R_{ABPx} &= 0 \\ (\sum F_{iy} &= 0; & S_y + S_{Uy} - R_{By} + R_{Ay} &= 0) \\ \sum M_{iZ} &= 0; & R_{ABLx} \cdot k + R_{ABPx} \cdot k - S_y \cdot x_T - S_{Uy} \cdot a &= 0 \end{aligned}$$

$$R_{ABLx} = R_{ABPx}$$

$$R_{ABLx} = \frac{S_y \cdot x_T + S_{Uy} \cdot a}{2 \cdot k} = 96,6 \text{ N}$$

$$R_{ABPx} = R_{ABLx} = 96,6 \text{ N}$$



Obrázek 27 - Schéma příd. zatížení dolního ramena od zrychlení v Y - Varianta A1

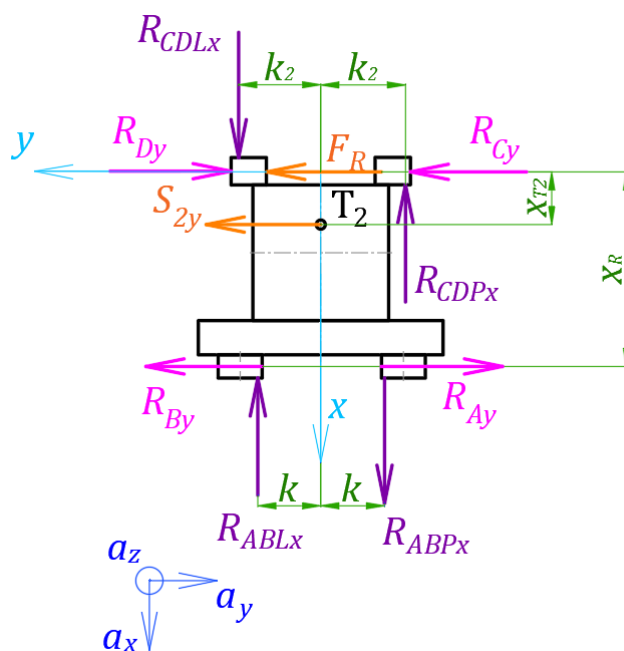
**Rameno horní**

$$\begin{aligned} \sum F_{ix} = 0; & R_{CDLx} - R_{CDPx} - R_{ABLx} + R_{ABPx} = 0 \\ (\sum F_{iy} = 0; & S_{2y} + F_R - R_{Dy} + R_{Cy} + R_{By} - R_{Ay} = 0) \\ \sum M_{iz} = 0; & (R_{CDLx} + R_{CDPx}) \cdot k_2 - (R_{ABLx} + R_{ABPx}) \cdot k - S_{2y} \cdot x_{T2} + (R_{Ay} - R_{By}) \cdot x_R = 0 \end{aligned}$$

$$R_{CDLx} = R_{CDPx}$$

$$R_{CDLx} = \frac{(R_{ABLx} + R_{ABPx}) \cdot k + S_{2y} \cdot x_{T2} - R_{Ay} \cdot x_R + R_{By} \cdot x_R}{2 \cdot k_2} = 428,4 \text{ N}$$

$$R_{CDPx} = R_{CDLx} = 428,4 \text{ N}$$



Obrázek 28 - Schéma před. zatížení horního ramena od zrychlení v Y - Varianta A1

**4.1.3 Kontrola vodících kladek**

Konstrukční řešení varianty A1 disponuje vodícími kladkami o dvou velikostech. Jedná se o kladky s V drážkou FR 15 a FR 20. Kontrolu je třeba provést pro nejvíce zatíženou kladku u každé velikosti. Pro lepší orientaci v indexování je zde Obrázek 29, který zobrazuje způsob indexování jednotlivých vodících kladek.

Dále byla provedena kontrola vodících kladek pojezdu, který umožňuje pohyb ve směru Y. Tento pojezd využívá 4 vodící kladky s V drážkou FR 20. Kontrola byla provedena pro nejvíce zatíženou vodící kladku. Pro orientaci v indexování vodících kladek pojezdu je zde Obrázek 30 zobrazující způsob indexování u pojezdu.

Zatížení jednotlivých vodících kladek bylo vypočteno vektorovým součtem příslušných složek.

**Vodící kladky FR 15**

a) Axiální zatížení

$$F_{aAL} = \frac{R_{Ax}}{2} - \frac{R_{ABLx}}{2} = 146,9 \text{ N}$$

$$F_{aAP} = \frac{R_{Ax}}{2} + \frac{R_{ABPx}}{2} = 243,5 \text{ N}$$

$$F_{aBL} = -\frac{R_{Bx}}{2} - \frac{R_{ABLx}}{2} = -\mathbf{281,5 \text{ N}}$$

$$F_{aBP} = -\frac{R_{Bx}}{2} + \frac{R_{ABPx}}{2} = -184,9 \text{ N}$$

b) Radiální zatížení

$$F_{rAL} = 0 \text{ N}$$

$$F_{rAP} = -R_{Ay} = -679,2 \text{ N}$$

$$F_{rBL} = R_{By} = \mathbf{888,4 \text{ N}}$$

$$F_{rBP} = 0 \text{ N}$$

Nejzatíženější vodící kladkou velikosti FR 15 je kladka s označením BL.

**Vodící kladky FR 20 – osa Z**

a) Axiální zatížení

$$F_{aCL} = \frac{R_{Cx}}{2} - \frac{R_{CDLx}}{2} = 200 \text{ N}$$

$$F_{aCP} = \frac{R_{Cx}}{2} + \frac{R_{CDPx}}{2} = 628,4 \text{ N}$$

$$F_{aDL} = -\frac{R_{Dx}}{2} - \frac{R_{CDLx}}{2} = -\mathbf{666,5 \text{ N}}$$

$$F_{aDP} = -\frac{R_{Dx}}{2} + \frac{R_{CDPx}}{2} = -238 \text{ N}$$

b) Radiální zatížení

$$F_{rCL} = 0 \text{ N}$$

$$F_{rCP} = -R_{Cy} = -640,6 \text{ N}$$

$$F_{rDL} = R_{Dy} = \mathbf{1729,2 \text{ N}}$$

$$F_{rDP} = 0 \text{ N}$$

Nejzatíženější vodící kladkou vedení osy Z velikosti FR 20 je kladka s označením DL.

### Vodící kladky FR 20 - pojezd

Analogicky byla určena zatížení vodících kladek pojezdu. Nejzatíženější vodící kladkou pojezdu je kladka s označením FH.

$$F_{aFH} = -\frac{R_{Fx}}{2} - \frac{R_{EFH}}{2} = -1163,7 \text{ N}$$

$$F_{rFH} = -R_{Fz} = -2349,2 \text{ N}$$

### Kontrolní výpočet dle výrobce

Níže uvedené vztahy jsou převzaty z katalogu výrobce. Podle těchto vztahů byly vypočteny hodnoty, které udává Tabulka 5. Vypočtenou životnost dosáhne podle výrobce 90 % vodících kladek. [10]

$$P = F_r + 3 \cdot F_a$$

$$P_w = f \cdot P$$

$$L = \left(\frac{C_w}{P_w}\right)^3 \cdot 10^5$$

$$f_s = 0,7 \cdot \frac{C_{0w}}{f \cdot (F_r + 3 \cdot F_a)} \quad f_s \geq 1$$

, kde  $F_a$  – Vnější axiální síla na vodící kladku [N]

$F_r$  – Vnější radiální síla na vodící kladku [N]

$P$  – Ekvivalentní dynamické zatížení [N]

$P_w$  – Efektivní zatížení [N]

$C_w$  – Efektivní dynamické zatížení [N]

$L_s$  – Nominální životnost [m]

$f$  – Servisní koeficient [-]

$f_s$  – Koeficient statického zatížení [-]

$C_{0w}$  – Max. statická radiální síla [N]

Servisní koeficient byl zvolen  $f = 1,2$ . [10] Tabulka 4 níže udává hodnoty efektivního dynamického zatížení a maximální statické radiální síly pro obě velikosti vodících kladek.



Kontrolním výpočtem, jehož výsledky shrnuje Tabulka 5, bylo zjištěno, že nejvíce zatížené kladky, které slouží k vedení ramen osy Z, vyhovují. Nevyhovující pro vypočtené zatížení je nejvíce zatížená vodící kladka pojezdu.

Tabulka 4 - Parametry vodících kladek [10]

|              | FR 15 | FR 20 |
|--------------|-------|-------|
| $C_w$ [N]    | 3340  | 4730  |
| $C_{0w}$ [N] | 6800  | 9500  |

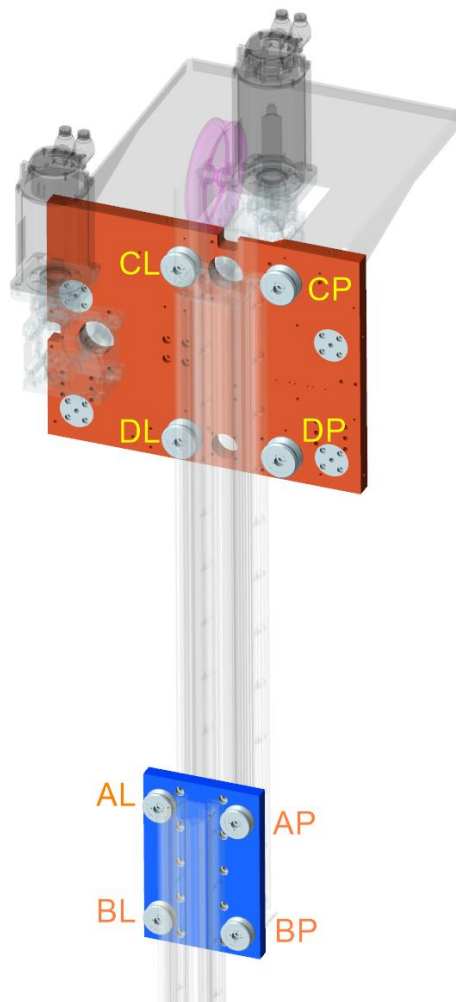
Tabulka 5 - Kontrola vodících kladek - Vypočtené hodnoty - Varianta A1

| Označení vodící kladky | Ekvivalentní dynamické zatížení | Efektivní zatížení | Nominální životnost | Koeficient statického zatížení |
|------------------------|---------------------------------|--------------------|---------------------|--------------------------------|
|                        | $P$                             | $P_w$              | $L_s$               | $f_s$                          |
|                        | [N]                             | [N]                | [m]                 | [-]                            |
| <b>BL</b>              | 1732,9                          | 2079,5             | $4,144 \cdot 10^7$  | 2,289                          |
| <b>DL</b>              | 3728,6                          | 4474,3             | $1,181 \cdot 10^7$  | 1,486                          |
| <b>FH</b>              | 5840,3                          | 7008,4             | $3,074 \cdot 10^6$  | 0,949                          |

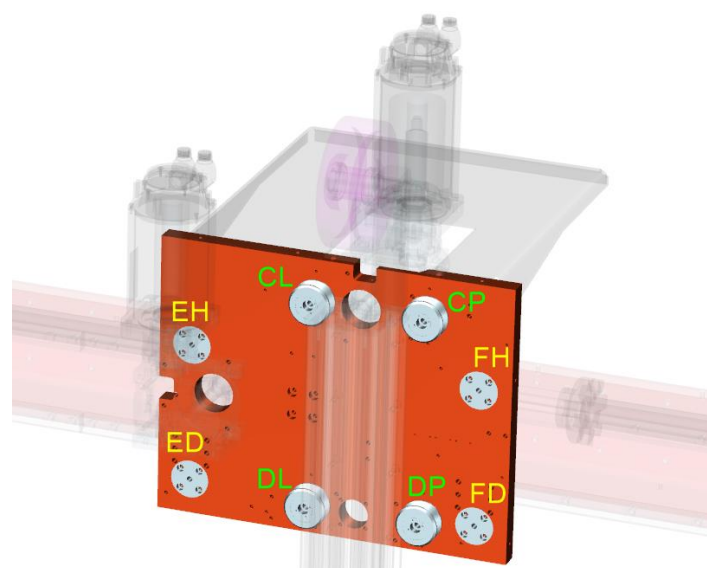
Vzhledem k příliš vysokému zatížení nejvíce zatěžované vodící kladky FH bylo navrženo omezení zrychlení  $a_z$  o 65 %. Toto zrychlení bylo omezeno, protože zdvih osy Z je ze všech nejkratší a čas přejezdu ovlivňuje nejméně. Následně byl proveden kontrolní výpočet pro zatížení při omezeném zrychlení, kde již zatížení všech vodících kladek vyhovují. Tabulka 6 zobrazuje výsledky kontrolního výpočtu, kde bylo uvažováno omezené zrychlení.

Tabulka 6 - Kontrola vodících kladek - Vypočtené hodnoty s omezením

| Označení vodící kladky | Ekvivalentní dynamické zatížení | Efektivní zatížení | Nominální životnost | Koeficient statického zatížení |
|------------------------|---------------------------------|--------------------|---------------------|--------------------------------|
|                        | $P$                             | $P_w$              | $L_s$               | $f_s$                          |
|                        | [N]                             | [N]                | [m]                 | [-]                            |
| <b>BL</b>              | 1662,3                          | 1994,8             | $4,694 \cdot 10^7$  | 2,386                          |
| <b>DL</b>              | 3446,6                          | 4135,9             | $1,496 \cdot 10^7$  | 1,608                          |
| <b>FH</b>              | 4677,6                          | 5613,1             | $5,984 \cdot 10^6$  | 1,185                          |



Obrázek 29 - Indexování vodících kladek - Varianta A1

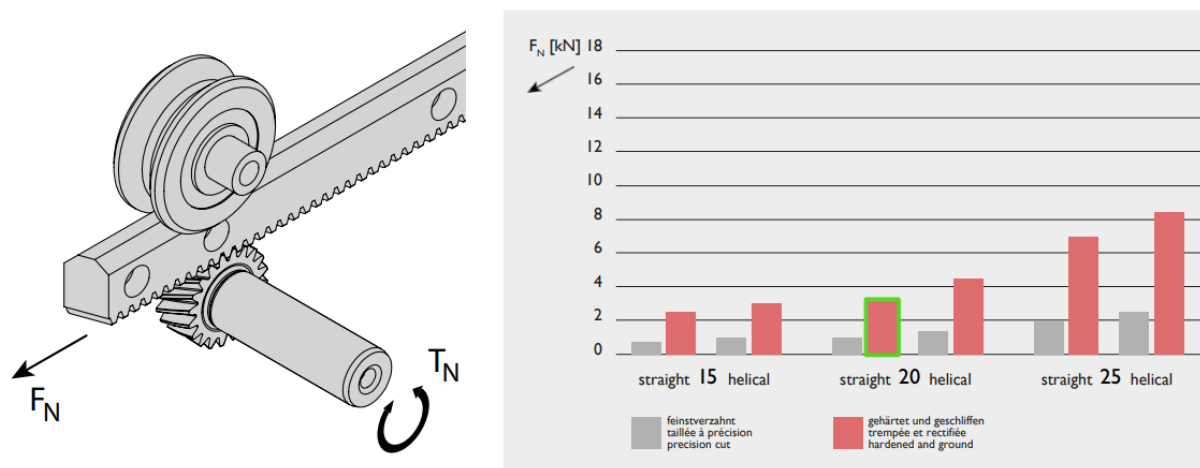


Obrázek 30 - Indexování vodících kladek pojezdu

#### 4.1.4 Kontrola ozubení

Obrázek 31 zobrazuje maximální přenášenou hodnotu síly na poháněný hřeben. Velikost této síly závisí na velikosti hřebene, úhlu sklonu zubů a na tepelném zpracování. Řešený manipulátor disponuje hřebenem o velikosti 20 s nulovým úhlem sklonu zubů a kalenými zuby. Z grafu bylo odečteno, že tato kombinace může přenést až 3,1 kN.

Z výpočtů reakčních účinků varianty A1 bylo zjištěno, že na ozubení působí při největším namáhání síla 1981,2 N. Z toho vyplývá, že ozubení pro variantu A1 vyhovuje.



Obrázek 31 - Maximální přenášená hodnota síly [10]

#### 4.1.5 Posuv dolního a horního ramene

U varianty A1 byly zjišťovány posuvy konců ramen pro pohyb ve směru X, Y a kombinaci X+Y+Z. Posuvy byly počítány zvlášť pro dolní a horní rameno. Hodnoty posuvů byly zjišťovány u pohybů ve směru X a Y vždy ve směru pohybu. U kombinovaného pohybu byly zjišťovány ve směru X i Y. Zatížení profilů vycházelo z analytického výpočtu reakčních účinků, který se nachází v kapitole 1 v příloze 1.

Zjištění posuvů bylo provedeno nejprve analyticky. U analytického výpočtu byl zatěžován samotný nosný profil příslušného ramena bez uvažování lineárního vedení. Tabulka 7 níže udává hodnoty zjištěné analytickým výpočtem. Pro ověření těchto hodnot byl následně proveden výpočet samostatných profilů metodou konečných prvků (MKP). Výsledky tohoto výpočtu a porovnání s výsledky analytických výpočtů jsou v kapitole 1.1.1 v příloze 2.

Tabulka 7 - Posuvy varianty A1 - Analyticky - Profily samostatně

| Zatěžovací stav |               | Rameno |       |          |          |
|-----------------|---------------|--------|-------|----------|----------|
| č.              | Popis         | Dolní  |       | Horní    |          |
|                 |               | $v_x$  | $v_y$ | $v_{2x}$ | $v_{2y}$ |
|                 |               | [mm]   | [mm]  | [mm]     | [mm]     |
| 1               | Pohyb v X     | 0,144  | -     | 0,126    | -        |
| 2               | Pohyb v Y     | -      | 0,355 | -        | 0,348    |
| 3               | Pohyb v X+Y+Z | 0,154  | 0,355 | 0,137    | 0,336    |

#### 4.1.6 Volba řemene

Pro vytvoření převodu mezi dolním a horním ramenem u varianty A1 byl zvolen ozubený řemen. Tento typ řemenu byl zvolen na základě toho, že umožňuje tvarové spojení s upínacím prvem. Pro toto konstrukční řešení byl vybrán polyuretanový řemen s profilem AT, roztečí 10 mm, šířkou 50 mm a s ocelovým tažným kordem od výrobce Elatech.

Na řemen působí při největším namáhání síla 753,4 N. Tabulka 8 udává jednotlivé složky zatížení řemene. Tabulka 9 zobrazuje statické, dynamické i celkové prodloužení řemenů několika šířek. Prodloužení je závislé na délce řemene mezi upnutím, která v tomto případě činí 1324 mm. Celková délka řemene je 1484 mm.

S ohledem na zástavbové rozměry a tuhost řemene byl zvolen řemen o šířce 50 mm. Udávané přípustné zatížení v tahu tohoto řemene je 8580 N a síla na přetržení 33250 N. [11]

Tabulka 8 - Zatížení řemene - Varianta A1

|                 |           |         |
|-----------------|-----------|---------|
| Zatížení řemene | Statické  | 373 N   |
|                 | Dynamické | 380,4 N |
|                 | Celkové   | 753,4 N |

Tabulka 9 - Prodloužení řemenů - Varianta A1 [11]

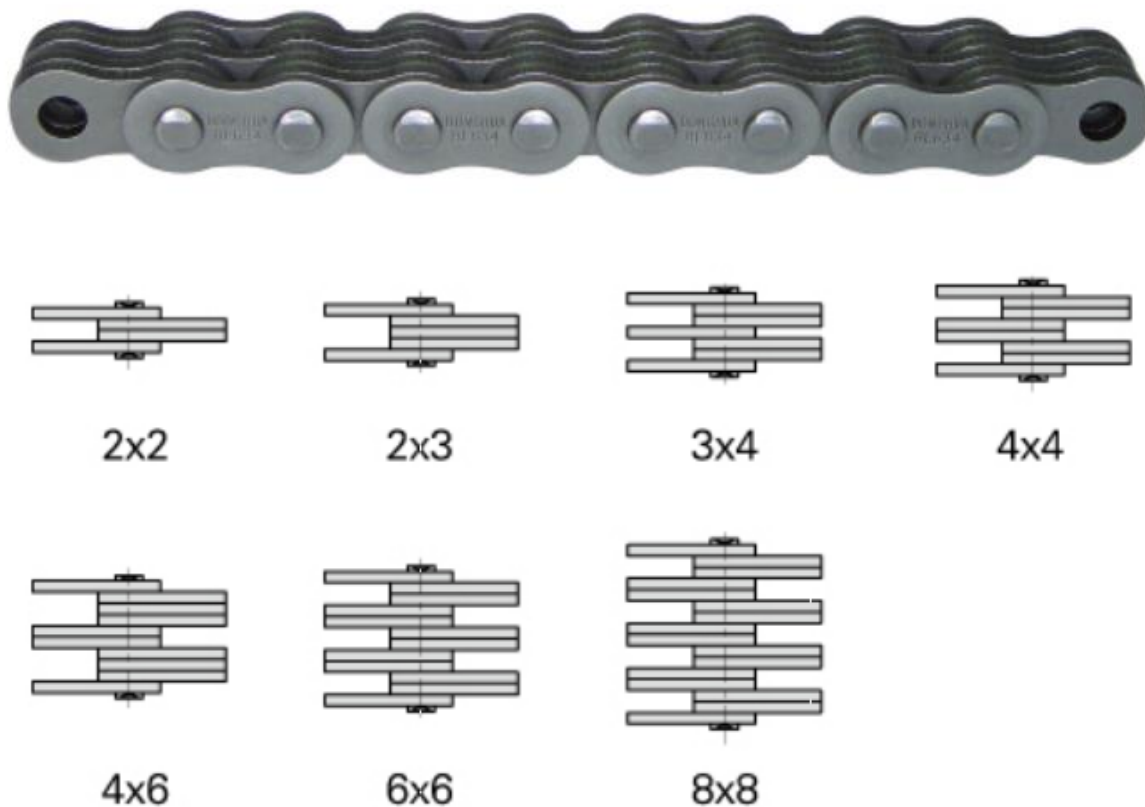
| Profil | Rozteč | Šířka | $\Delta l_{stat}$ | $\Delta l_{dyn}$ | $\Delta l$ |
|--------|--------|-------|-------------------|------------------|------------|
|        |        | [mm]  | [mm]              | [mm]             | [mm]       |
| AT     | 10     | 32    | 0,367             | 0,374            | 0,741      |
|        |        | 50    | 0,231             | 0,235            | 0,466      |
|        |        | 75    | 0,151             | 0,154            | 0,305      |
|        |        | 100   | 0,112             | 0,115            | 0,227      |
|        |        | 150   | 0,075             | 0,076            | 0,151      |

$\Delta l_{stat}$  – prodloužení od statických účinků,  $\Delta l_{dyn}$  – prodloužení od dynamických účinků,  $\Delta l$  – celkové prodloužení

#### 4.1.7 Volba řetězu

Pro vytvoření převodu mezi dolním a horním ramenem u varianty A2 byl zvolen Flyerův řetěz lehké řady LL. Jedná se o řetězy určené ke zdvihání břemen. Konkrétně byl zvolen řetěz s označením LL0822, jehož kombinace destiček je 2 x 2. Minimální síla na přetržení tohoto řetězu je 18,2 kN. [12]

Na řetěz působí při největším zatížení síla 753,4 N. Pro toto zatížení řetěz vyhovuje.



Obrázek 32 - Flyerův řetěz - Kombinace destiček [12]

## 4.2 Výpočet varianty B

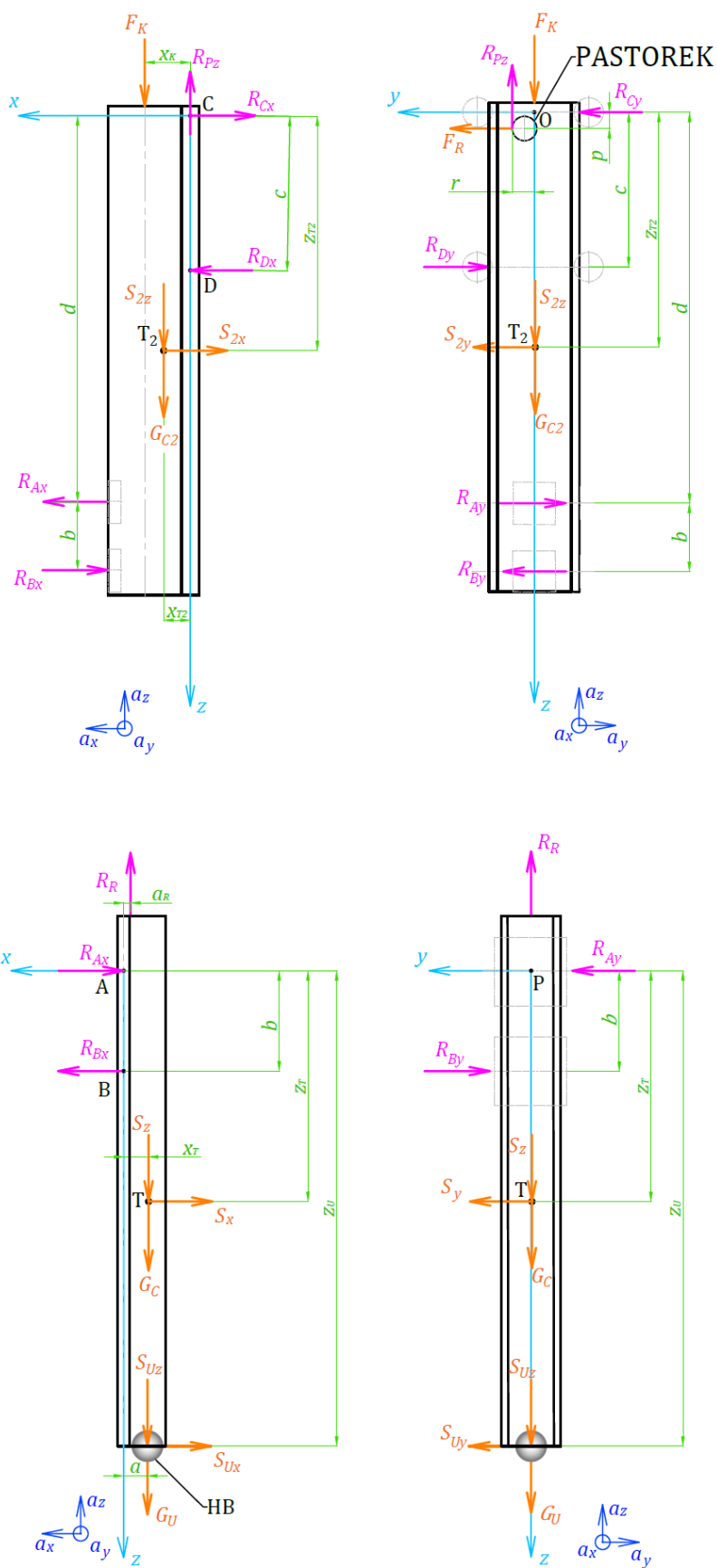
Pro výpočet varianty B bylo konstrukční řešení rozděleno na dvě části. První částí je dolní rameno, které je složeno z hliníkového profilu ITEM 80 x 40 mm a kolejnice WER 35R od výrobce HIWIN. Druhou část tvoří dvě svařené ocelové profily UPE 100, 2 kolejnice z řady MD 20 a 2 vozíky WEH 35CA, které vedou dolní rameno.

Stejně jako u varianty A1 byly řešeny 4 zatěžovací stavy, které se liší směrem pohybu. Jedná se o směry X, Y, Z a kombinaci všech 3 směrů. I zde byly uvažovány pohyby, které nejvíce zatěžují uložení ramen, a maximální možné zrychlení pro každý směr.

Výpočet této varianty v plném rozsahu se nachází v kapitole 2 v příloze 1. Pro lepší orientaci je zde Obrázek 33, který zobrazuje většinu rozměrů a reakčních účinků.

Tabulka 10 - Parametry pro výpočet - Varianta B [8]

|                      | Parametr                     | Značka   | Hodnota | Jednotky  |
|----------------------|------------------------------|----------|---------|-----------|
| Katalog GÜDEL        | Užitečné zatížení            | F        | 250     | [N]       |
|                      | Zrychlení ve směru X         | $a_x$    | 2       | $[m/s^2]$ |
|                      | Zrychlení ve směru Y         | $a_y$    | 5,5     | $[m/s^2]$ |
|                      | Zrychlení ve směru Z         | $a_z$    | 10      | $[m/s^2]$ |
| Z modelu             | Rozměry<br>(viz dané schéma) | a        | 35      | [mm]      |
|                      |                              | $a_R$    | 12      | [mm]      |
|                      |                              | b        | 125     | [mm]      |
|                      |                              | c        | 316     | [mm]      |
|                      |                              | d        | 968     | [mm]      |
|                      |                              | $k_2$    | 57,5    | [mm]      |
|                      |                              | p        | 6       | [mm]      |
|                      |                              | r        | 32,62   | [mm]      |
|                      |                              | $x_K$    | 23,8    | [mm]      |
|                      |                              | $x_R$    | 82,25   | [mm]      |
|                      |                              | $x_T$    | 15,77   | [mm]      |
|                      |                              | $x_{T2}$ | 44,38   | [mm]      |
|                      |                              | $z_T$    | 458,61  | [mm]      |
|                      |                              | $z_{T2}$ | 586,9   | [mm]      |
|                      |                              | $z_U$    | 983     | [mm]      |
|                      | Hmot. dolního ramena         | $m_c$    | 16,303  | [kg]      |
| Hmot. horního ramena | $m_{c2}$                     | 31,428   | [kg]    |           |
| Hmot. kladky         | $m_K$                        | 3,868    | [kg]    |           |



Obrázek 33 - Schéma zatížení - pohyb ve směru X+Y+Z - Varianta B

### 4.2.1 Reakční účinky

Tabulka 11 zobrazuje hodnoty reakčních účinků pro variantu B.

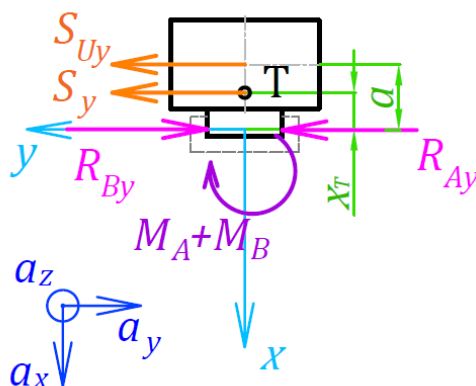
Tabulka 11 - Reakce - Varianta B

| č. | Popis         | Rameno   |          |          |          |       |          |          |          |          |          |
|----|---------------|----------|----------|----------|----------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|
|    |               | Dolní    |          |          |          |       | Horní    |          |          |          |          |
|    |               | $R_{Ax}$ | $R_{Ay}$ | $R_{Bx}$ | $R_{By}$ | $R_R$ | $R_{Cx}$ | $R_{Cy}$ | $R_{Dx}$ | $R_{Dy}$ | $R_{Pz}$ |
|    |               | [N]      | [N]      | [N]      | [N]      | [N]   | [N]      | [N]      | [N]      | [N]      | [N]      |
| 1  | Pohyb v X     | 386,2    | 0        | 469,8    | 0        | 409,9 | 520,1    | 296      | 666,5    | 128,4    | 1165,9   |
| 2  | Pohyb v Y     | -50,8    | 1201,7   | -50,8    | 1431,6   | 409,9 | 87,8     | 892,8    | 87,8     | 1719,9   | 1165,9   |
| 3  | Pohyb v Z     | -182,1   | 0        | -182,1   | 0        | 827,8 | 120,9    | 548      | 120,9    | 237,8    | 2158,9   |
| 4  | Pohyb v X+Y+Z | 334,3    | 1201,7   | 417,9    | 1431,6   | 827,8 | 467,9    | 640,7    | 614,3    | 1829,3   | 2158,9   |

### 4.2.2 Přídavné zatížení lineárního vedení od setrvačných účinků

Vlivem zrychlení ve směru Y vznikají setrvačné síly (již popsáno v kapitole 4.1.2). U tohoto konstrukčního řešení je lineární vedení mezi dolním a horním ramenem uskutečněno pomocí kolejnice WER 35R a dvou vozíků WEH 35CA, a proto se zde zjišťují reakční momenty  $M_A$  a  $M_B$ . Klopný moment od horního ramene zachycují vodící kladky FR 20 v podobě axiálního zatížení.

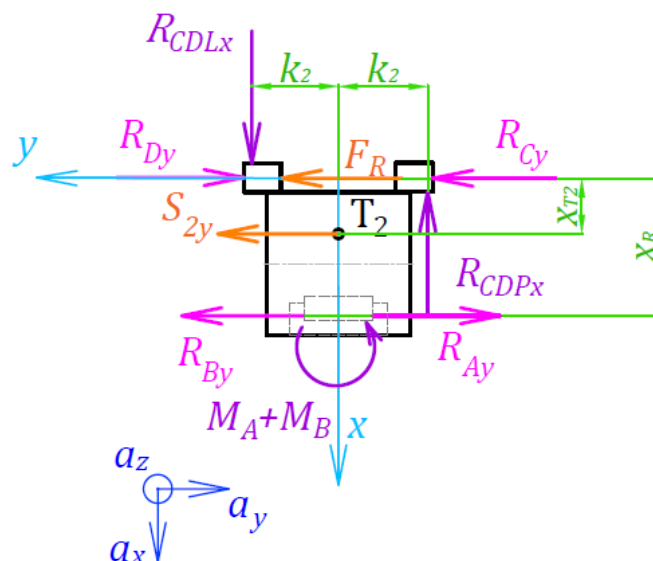
$$M_A = M_B = 3,161 \text{ Nm}$$



Obrázek 34 - Schéma příd. zatížení dolního ramena od zrychlení v Y - Varianta B



$$R_{CDLx} = R_{CDPx} = 176,2 \text{ N}$$



Obrázek 35 - Schéma před. zatížení horního ramena od zrychlení v Y - Varianta B

#### 4.2.3 Kontrola lineárního vedení

U konstrukčního řešení varianty B se nachází dva druhy lineárního vedení, které jsou popsány v předchozí kapitole. Kontrolní výpočty byly provedeny pro nejvíce zatížený vozík a vodící kladku osy Z. Indexování vodících kladek horního ramene je stejné jako u varianty A1. Rozdíl je pouze ve značení vozíků (viz Obrázek 36).

Následně byla provedena kontrola vodících kladek pojezdu jako u varianty A1.

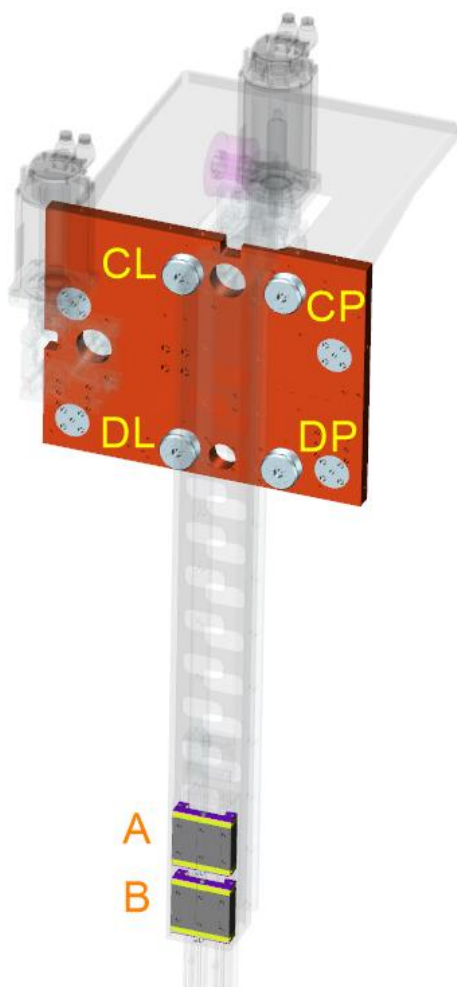
#### Vozík WEH 35CA

Zatížení vozíků bylo zjištěno výpočtem reakčních účinků. Nejvíce zatížený je vozík s indexem B. Tabulka 13 shrnuje hodnoty vypočtené kontrolním výpočtem, který byl proveden pomocí vzorců převzatých z katalogu výrobce [13]. Tento výpočet se nachází v kapitole 2.3.4.7 v příloze 1.

U tohoto výpočtu se rozlišuje statické a dynamické zatížení vozíků. Statické zatížení vozíků vzniká v případě, kdy se kolejnice vzhledem k vozíkům nepohybuje. Dynamické zatížení je uvažováno při kombinaci všech tří pohybů a maximálních zrychleních.

Pro výpočet ekvivalentního zatížení byl zvolen vzorec uvedený pro stálou změnu zatížení, který nejvíce odpovídá zatížení navrhovaného konstrukčního řešení.

Řada WE je schopna odolávat vysokým klopným momentům. Reakční moment  $M_B$  zatěžuje vedení s bezpečností 282 vzhledem k přípustnému dynamickému momentu a 468 vzhledem k přípustnému statickému momentu.



Obrázek 36 - Indexování vodících kladek a vozíků - Varianta B

Tabulka 12 - Parametry lineárního vedení HIWIN řady WE\_35C [13]

|                                   |           |      |       |
|-----------------------------------|-----------|------|-------|
| <b>Dynamická únosnost</b>         | $C_{dyn}$ | [N]  | 29800 |
| <b>Statická únosnost</b>          | $C_0$     | [N]  | 49400 |
| <b>Přípustný dynamický moment</b> | $M_x$     | [Nm] | 893   |
| <b>Přípustný statický moment</b>  | $M_{0x}$  | [Nm] | 1480  |

Tabulka 13 - Kontrola lineárního vedení HIWIN - Vypočtené hodnoty

| Směr     | Ekvivalentní statické zatížení | Ekvivalentní dynamické zatížení | Jmenovitá životnost   | Statická konstrukční bezpečnost |
|----------|--------------------------------|---------------------------------|-----------------------|---------------------------------|
|          | $P_s$                          | $P$                             | $L$                   | $f_{SL}$                        |
|          | [N]                            | [N]                             | [m]                   | [-]                             |
| <b>X</b> | 341,5                          | 280,2                           | $1,782 \cdot 10^{10}$ | 144,6                           |
| <b>Y</b> | 954,4                          | 954,4                           | $4,51 \cdot 10^8$     | 51,8                            |

## Vodící kladky FR 20

Zatížení vodících kladek bylo vypočteno vektorovým součtem příslušných složek. Kontrolní výpočet vodících kladek byl proveden stejně jako v kapitole 4.1.3. Tabulka 14 udává vypočtené hodnoty tohoto výpočtu.

Nejzatíženější vodící kladkou vedení osy Z je kladka s označením DL.

$$F_{aDL} = - 395,2 \text{ N}$$

$$F_{rDL} = 1829,3 \text{ N}$$

Nejzatíženější vodící kladkou pojezdu je kladka s označením FH.

$$F_{aFH} = - 783,7 \text{ N}$$

$$F_{rFH} = - 2505,6 \text{ N}$$

Tabulka 14 - Kontrola vodících kladek - Vypočtené hodnoty - Varianta B

| Označení vodící kladky | Ekvivalentní dynamické zatížení | Efektivní zatížení | Nominální životnost | Koeficient statického zatížení |
|------------------------|---------------------------------|--------------------|---------------------|--------------------------------|
|                        | $P$                             | $P_w$              | $L_s$               | $f_s$                          |
|                        | [N]                             | [N]                | [m]                 | [-]                            |
| <b>DL</b>              | 3014,9                          | 3617,9             | $2,235 \cdot 10^7$  | 1,838                          |
| <b>FH</b>              | 4856,8                          | 5828,2             | $5,346 \cdot 10^6$  | 1,141                          |

### 4.2.4 Kontrola ozubení

Jedním z požadavků je zachování stávajícího vedení osy Z. Součástí tohoto vedení je i hřeben sloužící k pohonu osy Z. Z toho vyplývá, že maximální možná hnací síla, kterou je hřeben schopen přenést, bude 3,1 kN, stejně jako u varianty A1 (viz kapitola 4.1.4).

Z výpočtů reakčních účinků varianty B bylo zjištěno, že na ozubení působí síla 2158,9 N. Z toho vyplývá, že ozubení pro variantu B vyhovuje.

### 4.2.5 Posuv dolního a horního ramene

U varianty B byly zjišťovány posuvy konců ramen pouze pro složený pohyb ve směrech X+Y+Z, při kterém jsou ramena nejvíce zatěžována. Posuvy byly zjišťovány ve směru X a Y, zvlášť pro dolní a horní rameno. Zatížení profilů vycházelo ze zjištěných reakčních účinků.

U této varianty nebyl proveden analytický výpočet, a to z důvodu geometrické složitosti profilu horního ramene a výrazného vlivu kolejniče dolního ramene na tuhost. Tyto vlivy by způsobily značnou odchylku, a proto zde byly provedeny pouze kontaktní úlohy, které zohlednily zmíněné vlivy. Tato úloha je popsána v kapitole 1.2 v příloze 2, kde jsou uvedeny i zjištěné posuvy.

#### 4.2.6 Volba řemene

Pro vytvoření převodu mezi dolním a horním ramenem u varianty B byl zvolen polyuretanový řemen s profilem AT, roztečí 10 mm, šířkou 50 mm a s ocelovým tažným kordem od výrobce Elatech. Tento řemen byl vybrán ze stejných důvodů jako řemen u varianty A1 v kapitole 4.1.6.

Na řemen působí při největším namáhání síla 827,8 N. Tabulka 15 udává jednotlivé složky zatížení řemene. Tabulka 16 zobrazuje statické, dynamické i celkové prodloužení řemenů pro několik šířek. U této varianty bylo potřeba řemen o šířce, která bude vyhovovat upevnění uvnitř profilu, a proto je v možnostech maximální šířka pouze 75 mm. Prodloužení je závislé na délce řemene mezi upnutím, která v tomto případě činí 1209 mm. Celková délka řemene je zde 1369 mm.

S ohledem na zástavbové rozměry a tuhost řemene byl zvolen řemen o šířce 50 mm. Pevnostní parametry tohoto řemene jsou již popsány v kapitole 4.1.6.

Tabulka 15 - Zatížení řemene - Varianta B

|                        |           |         |
|------------------------|-----------|---------|
| <b>Zatížení řemene</b> | Statické  | 409,9 N |
|                        | Dynamické | 418 N   |
|                        | Celkové   | 827,8 N |

Tabulka 16 - Prodloužení řemenů - Varianta B [11]

| <b>Profil</b> | <b>Rozteč</b> | <b>Šířka</b> | <b><math>\Delta l_{stat}</math></b> | <b><math>\Delta l_{dyn}</math></b> | <b><math>\Delta l</math></b> |
|---------------|---------------|--------------|-------------------------------------|------------------------------------|------------------------------|
|               |               | [mm]         | [mm]                                | [mm]                               | [mm]                         |
| AT            | 10            | 32           | 0,368                               | 0,375                              | 0,743                        |
|               |               | 50           | 0,232                               | 0,236                              | 0,468                        |
|               |               | 75           | 0,152                               | 0,155                              | 0,306                        |

$\Delta l_{stat}$  – prodloužení od statických účinků,  $\Delta l_{dyn}$  – prodloužení od dynamických účinků,  $\Delta l$  – celkové prodloužení

### 4.3 Varianta C

Varianta C nebyla dále řešena z důvodu nevyhovujících zástavbových rozměrů a hodnot hmotností. K dosažení potřebné geometrie pro fungující převod hřeben – pastorek – hřeben by bylo potřeba využít prvků, které by navýšily hmotnost. Možnost upevnění pevného hřebenu na desku pojezdu je omezena, neboť potřebný prostor je již využit pro vodící kladky lineárního vedení. Toto upevnění by tak muselo být provedeno pomocí držáků, které by vymezily určitou vzdálenost od desky pojezdu. Hřeben dolního ramena musí být vzhledem k charakteru převodu naproti pevnému hřebenu. Pro dosažení této pozice hřebenu by bylo potřeba dostatečně širokého profilu dolního ramena v kombinaci s distančními prvky. Použití potřebných prvků zvýší hmotnost i složitost celého konstrukčního řešení.

Hmotnost výrazně ovlivňuje i použitý převod pomocí pastorku a 2 hřebenů. Pro výhodnější symetrické namáhání by bylo nutno použít tento převod ze 2 stran, a to by vedlo k dalšímu navýšení hmotnosti.

## 5 Výpočet MKP

Cílem MKP výpočtů bylo ověřit výsledky analytických výpočtů posuvů jednotlivých ramen varianty A1 a zahrnout další vlivy, které analytický výpočet nepostihuje. U varianty B nebyl prováděn analytický výpočet, a to z důvodů, které jsou popsány již v kapitole 4.2.5. Posuvy byly zjištěny pouze pomocí kontaktních úloh. Následně byly provedeny numerické kontaktní úlohy celého konstrukčního řešení osy Z u obou variant.

Zatěžovací stavy vycházejí z analytických výpočtů reakčních účinků ve výpočtové zprávě, která se nachází v příloze. Setrvačné a tíhové zatížení působící v těžišti byla definována pomocí příslušných zrychlení. Výjimkou jsou pouze celkové kontaktní úlohy, kde bylo potřeba rozlišit zrychlení ve směru Z pro horní a dolní rameno. Zde byly setrvačné síly zadány podle výpočtu setrvačných sil a umístěny na všechny uzly příslušných ramen s geometrickým rozložením.

V kontaktních úlohách, kde bylo lineární vedení pomocí vodících kladek a kolejnic, byly vazby provedeny následujícím způsobem. Nejprve byly na úrovni idealizovaného dílu rozděleny plochy kolejnic tak, aby vznikly hrany, které reprezentují čárový styk vodící kladky s kolejnicí (viz např. Obrázek 11 v příloze 2). Tyto hrany posloužily k vytvoření vazeb. Vazby CL a CP (případně AL a AP) byly definovány jako vazby, které zamezují posuvu ve směrech os X, Y a Z, ale umožňují natočení. Vazby DL a DP (případně BL a BP) byly definovány jako vazby, které zamezují posuvu ve směru os X a Y, ale umožňují posuv ve směru osy Z a natočení. Indexování vazeb vychází z indexů vodících kladek (viz Obrázek 29). Vazby CL, CP, DL a DP se nachází u obou řešených variant, protože se jedná o původní lineární vedení, které bylo podle požadavků zachováno (viz Obrázek 16 a Obrázek 24 v příloze 2). Vazby AL, AP, BL a BP se nachází u varianty A1 a reprezentují vodící kladky, které vedou dolní rameno (viz Obrázek 11 v příloze 2). Použitím idealizovaných vazeb představujících čárový styk mohou v okolí vazeb vznikat lokální napěťové špičky vlivem singularit.

Výpočty byly prováděny v řešiči NX Nastran, který je implementován v softwaru Siemens NX 12.

### 5.1 Varianta A1

Oba nosné profily varianty A1 jsou z hliníkové slitiny EN-AW 6060 T6. Kolejnice lineárního vedení jsou zde z oceli 58CrMoV4. Materiálové parametry pro variantu A1 udává Tabulka 17.

Tabulka 17 - Materiálové parametry - Varianta A1 [14] [15]

| Označení materiálu | Hustota              | Youngův modul pružnosti | Poissonovo číslo | Smluvní mez kluzu | Mez pevnosti |
|--------------------|----------------------|-------------------------|------------------|-------------------|--------------|
|                    | $\rho$               | E                       | $\nu$            | $R_{p0,2}$        | $R_m$        |
|                    | [kg/m <sup>3</sup> ] | [GPa]                   | [-]              | [MPa]             | [MPa]        |
| EN-AW 6060 T6      | 2711                 | 69,5                    | 0,33             | 140               | 170          |
| Ocel 58CrMoV4      | 7850                 | 210                     | 0,3              | 1000              | 1200         |

### 5.1.1 Profily samostatně

Pro ověření analytických výpočtů varianty A1 byly provedeny MKP výpočty samostatných profilů. Tyto výpočty jsou popsány v kapitole 1.1.1 v příloze 2.

### 5.1.2 Kontaktní úloha

Pro zpřesnění výsledků posuvů ramen varianty A1 byly provedeny kontaktní úlohy u obou ramen. Tyto výpočty jsou popsány v kapitole 1.1.2 v příloze 2.

### 5.1.3 Celková kontaktní úloha

#### Výpočtové modely

Vstupní sestava pro výpočet celkové kontaktní úlohy varianty A1 se skládá z komponent pro dolní a horní rameno. Navíc byly přidány 4 zjednodušené modely (Obrázek 37 žlutě), kdy model zastupuje sestavu vodící kladky s uložením. Tyto modely propojují horní a dolní rameno a byly uvažovány jako dokonale tuhé, což bylo při výpočtu definováno materiálem vycházejícím z vlastností použité oceli, avšak Youngův modul pružnosti byl nastaven 1000x větší. Na úrovni idealizovaných dílů byla provedena zjednodušení jako u jednotlivých ramen.

#### Tvorba sítě

Zasíťování komponent a nastavení šroubových spojů dolního ramena je totožné jako v kapitole 1.1.2.1 v příloze 2 a horního ramena jako v kapitole 1.1.2.2 v příloze 2. Tělesa představující vodící kladky s uložením byla zasíťována tetrahedry pomocí prvků CTETRA(10) s velikostí prvku 8 mm.

#### Okrajové podmínky

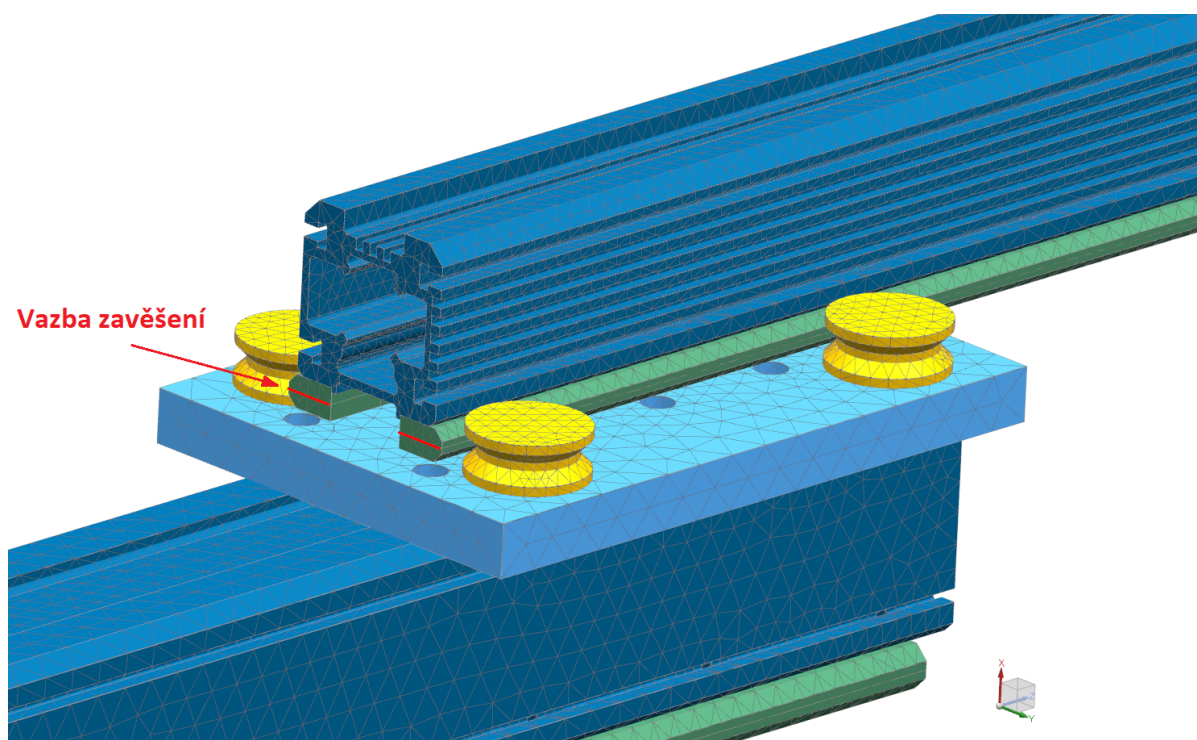
Mezi kolejnicemi a profily byl definován kontakt pomocí „Surface-to-Surface Contact“, kde byl nastaven koeficient statického tření 0,6 (ocel – hliník). Stejným způsobem byl definován kontakt mezi deskou a profilem, kde byl nastaven koeficient statického tření 0,9 (hliník – hliník).

Šrouby byly předepnuty pomocí „Bolt Pre-Load“, u dolního ramena silou 1364 N a horního ramena silou 2691 N (viz 1.1.2.1 a 1.1.2.2 v příloze 2).

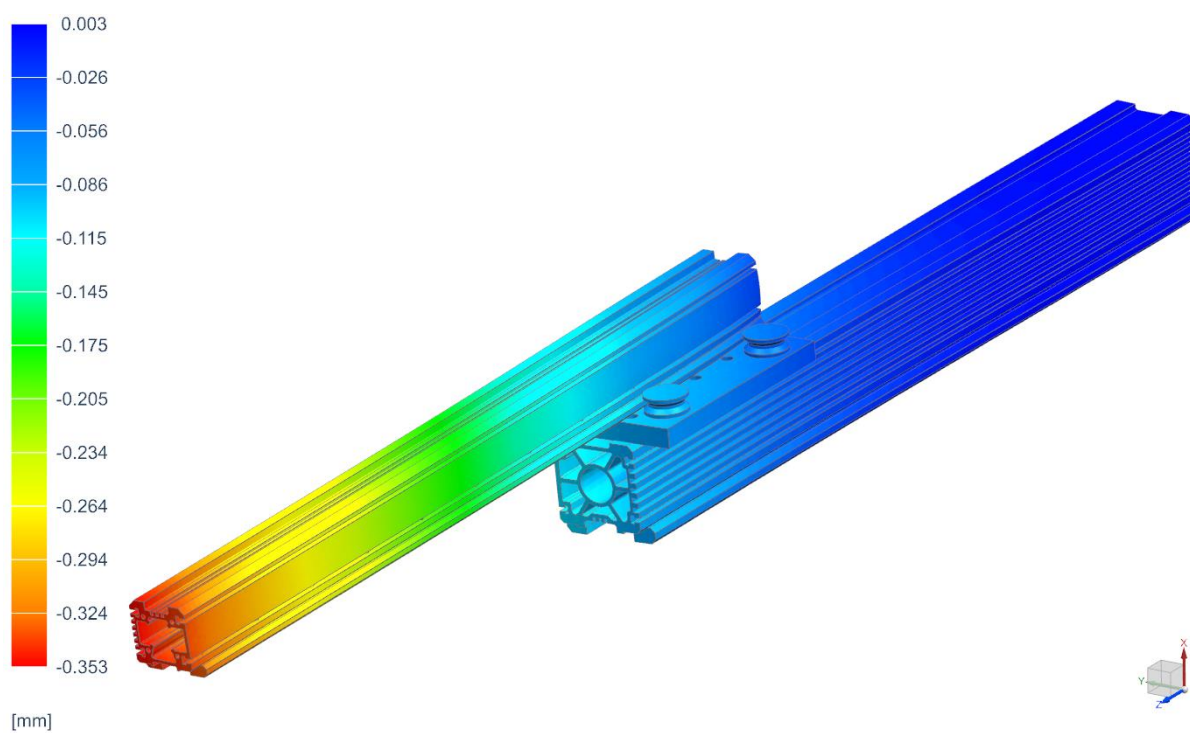
Spojení sestav vodících kladek s deskou bylo definováno pomocí „Surface-to-Surface Gluing“ mezi dosedacími plochami.

Propojení dolního a horního ramena bylo vytvořeno kontaktem mezi vodícími kladkami a kolejnicemi pomocí „Surface-to-Surface Contact“. Jedná se o vedení s valivými elementy, které dosahuje nízkého tření, a proto zde byl nastaven koeficient statického tření 0.

Pohyb dolního ramena ve směru Z zamezuje vazba zavěšení (viz Obrázek 37) odebírající pouze posuv ve směru Z.



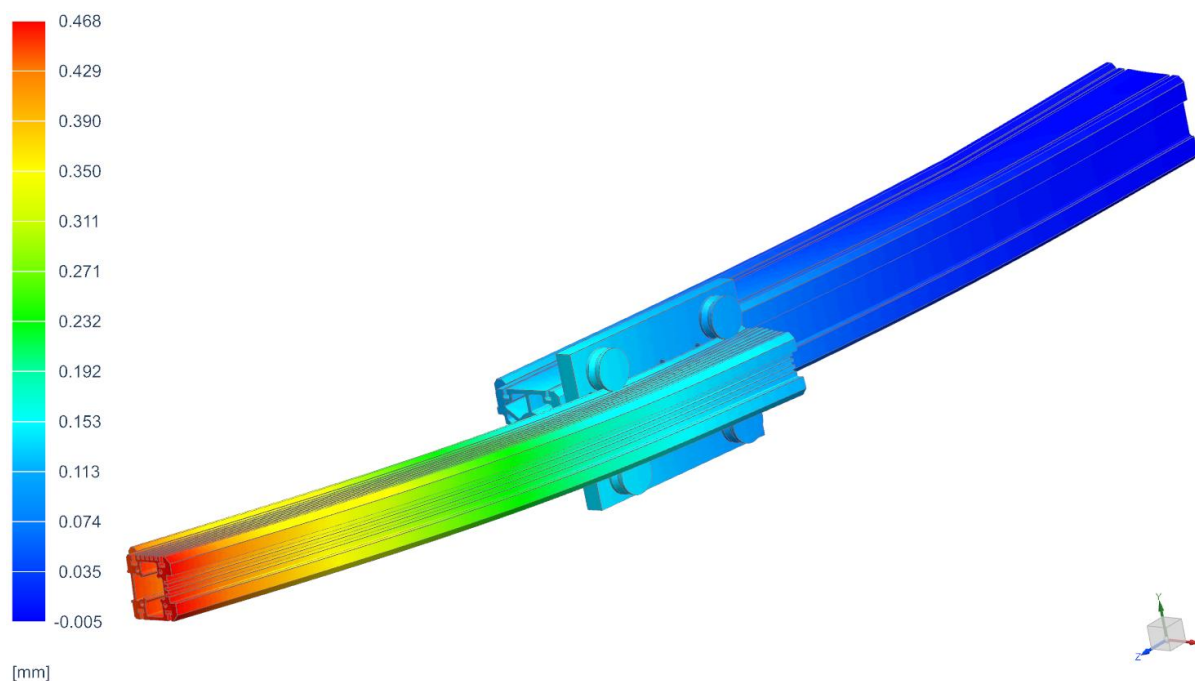
Obrázek 37 - Spojení ramen - Varianta A1



Obrázek 38 - Posuv v X - Pohyb v X+Y+Z - Varianta A1 - Celková úloha

Obrázek 38 zobrazuje posuv ve směru X při pohybu ve směru X+Y+Z u celkové úlohy varianty A1.





Obrázek 39 - Posuv v Y - Pohyb v X+Y+Z - Varianta A1 - Celková úloha

Obrázek 39 zobrazuje posuv ve směru Y při pohybu ve směru X+Y+Z u celkové úlohy varianty A1.

### 5.1.3.1 Zhodnocení výsledků

Celková kontaktní úloha varianty A1 byla provedena pro zjištění posuvů celého konstrukčního řešení při maximálním vysunutí ramen. Celkový posuv je ovlivněn posuvy dolního a horního ramena a zároveň natočením uložení dolního ramena. Podle předchozích úloh pro jednotlivá ramena se dá usuzovat, že zjištěné hodnoty u celkové úlohy jsou reálné. Tyto hodnoty zároveň splňují požadavek na posuvy do 1 mm. Z toho vyplývá, že hodnoty jsou vyhovující. Tabulka 18 shrnuje výsledné hodnoty posuvů varianty A1 pro celkovou kontaktní úlohu.

Tabulka 18 - Posuvy varianty A1 - MKP – Celková kontaktní úloha

| Zatěžovací stav |               | Celkový posuv |       |
|-----------------|---------------|---------------|-------|
| č.              | Popis         | $v_x$         | $v_y$ |
|                 |               | [mm]          | [mm]  |
| 1               | Pohyb v X+Y+Z | 0,353         | 0,468 |

## 5.2 Varianta B

Nosný profil dolního ramena varianty B je z hliníkové slitiny Al Mg Si 0,5 F 25. Kolejnice lineárního vedení dolního ramena je z oceli C55. Nosný profil u horního ramena je z oceli S235JR a kolejnice lineárního vedení horního ramena jsou z oceli 58CrMoV4. Materiálové parametry pro variantu B udává Tabulka 19.

Tabulka 19 - Materiálové parametry - Varianta B [16] [17] [18]

| Označení materiálu | Hustota              | Youngův modul pružnosti | Poissonovo číslo | Smluvní mez kluzu | Mez pevnosti |
|--------------------|----------------------|-------------------------|------------------|-------------------|--------------|
|                    | $\rho$               | E                       | $\nu$            | $R_{p0,2}$        | $R_m$        |
|                    | [kg/m <sup>3</sup> ] | [GPa]                   | [-]              | [MPa]             | [MPa]        |
| Al Mg Si 0.5 F 25  | 2711                 | 69,5                    | 0,33             | 195               | 245          |
| Ocel C55           | 7850                 | 210                     | 0,3              | 480*              | 750          |
| Ocel 58CrMoV4      | 7850                 | 210                     | 0,3              | 1000              | 1200         |
| Ocel S235JR        | 7850                 | 210                     | 0,3              | 235               | 360          |

\*u oceli C55 je udána hodnota meze kluzu  $R_e$  [MPa]

### 5.2.1 Kontaktní úloha

Pro zjištění posuvů ramen varianty B byly provedeny kontaktní úlohy u obou ramen. Tyto výpočty jsou popsány v kapitole 1.2.1 v příloze 2.

### 5.2.2 Celková kontaktní úloha

Pro zjištění posuvů celého konstrukčního řešení při maximálním vysunutí ramen byla provedena celková kontaktní úloha varianty B. Tyto výpočty jsou popsány v kapitole 1.2.2 v příloze 2.

## 6 Aktuální stav modelu manipulátoru

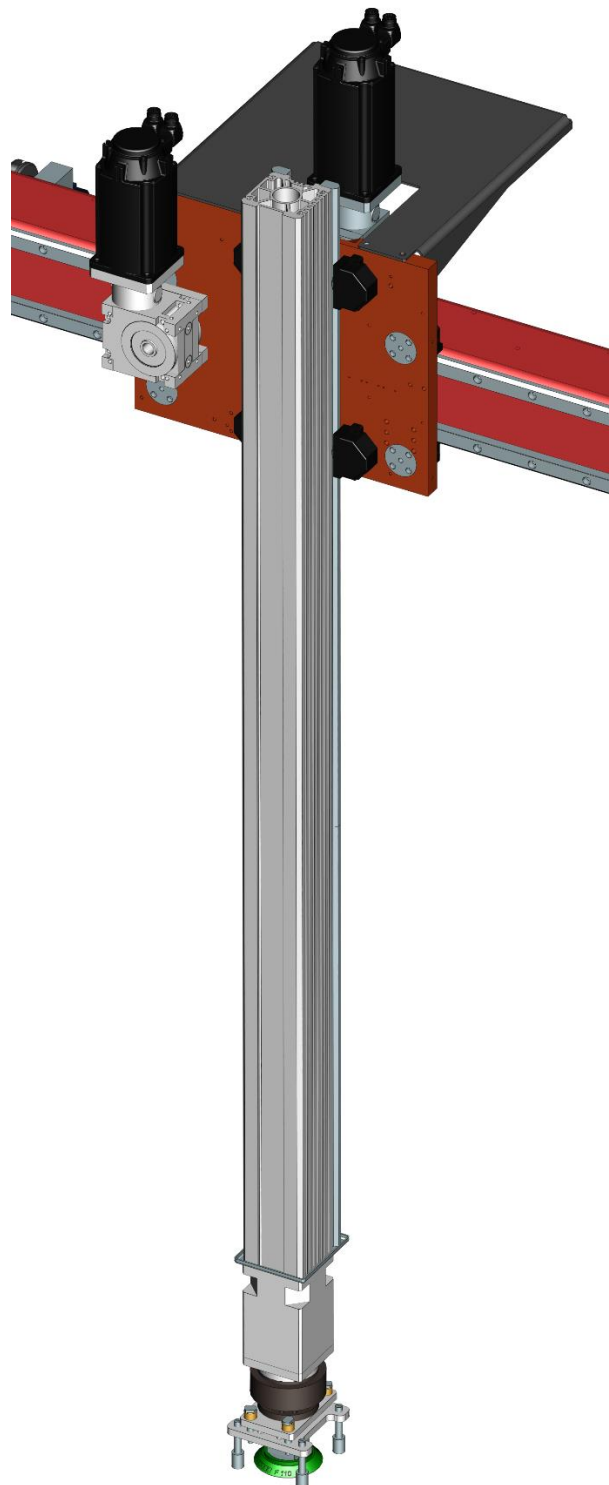
U portálového manipulátoru GÜDEL FP-3 bylo provedeno měření a analýza jednotlivých komponent. Na základě získaných informací byl vytvořen 3D model v softwaru NX 12 od společnosti SIEMENS.

Model manipulátoru je nyní ve fázi, kdy jsou hotové hlavní části. Konkrétně se jedná o ocelovou konstrukci, lineární vedení, dorazy na ose X, motory a převodovky pro všechny 3 osy, efektor včetně odpruženého uložení. V modelu zatím nejsou vytvořeny energetické řetězy a žlaby, ve kterých se pohybují elektrické a pneumatické vedení.

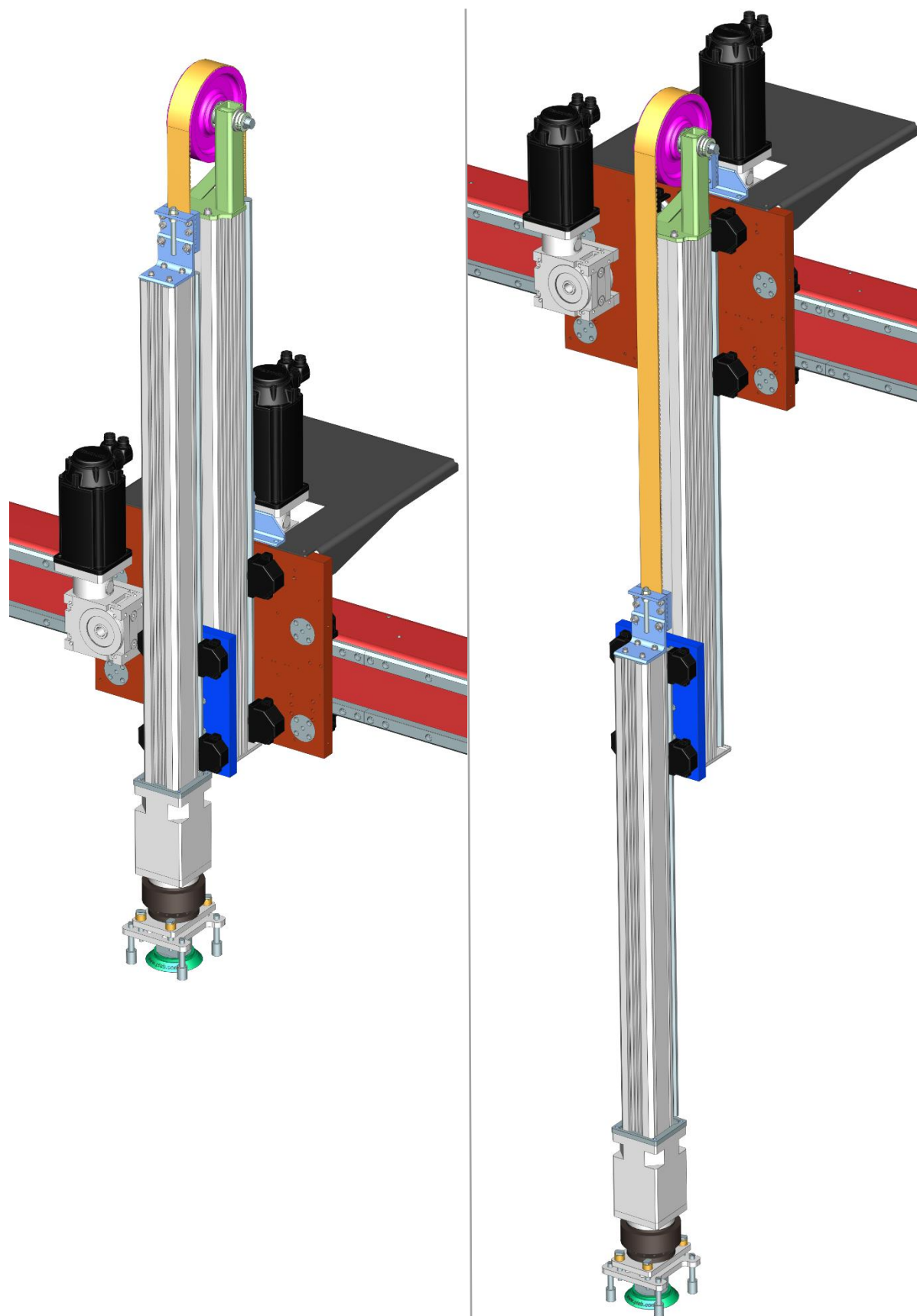


Obrázek 40 - Portálový manipulátor - aktuální stav

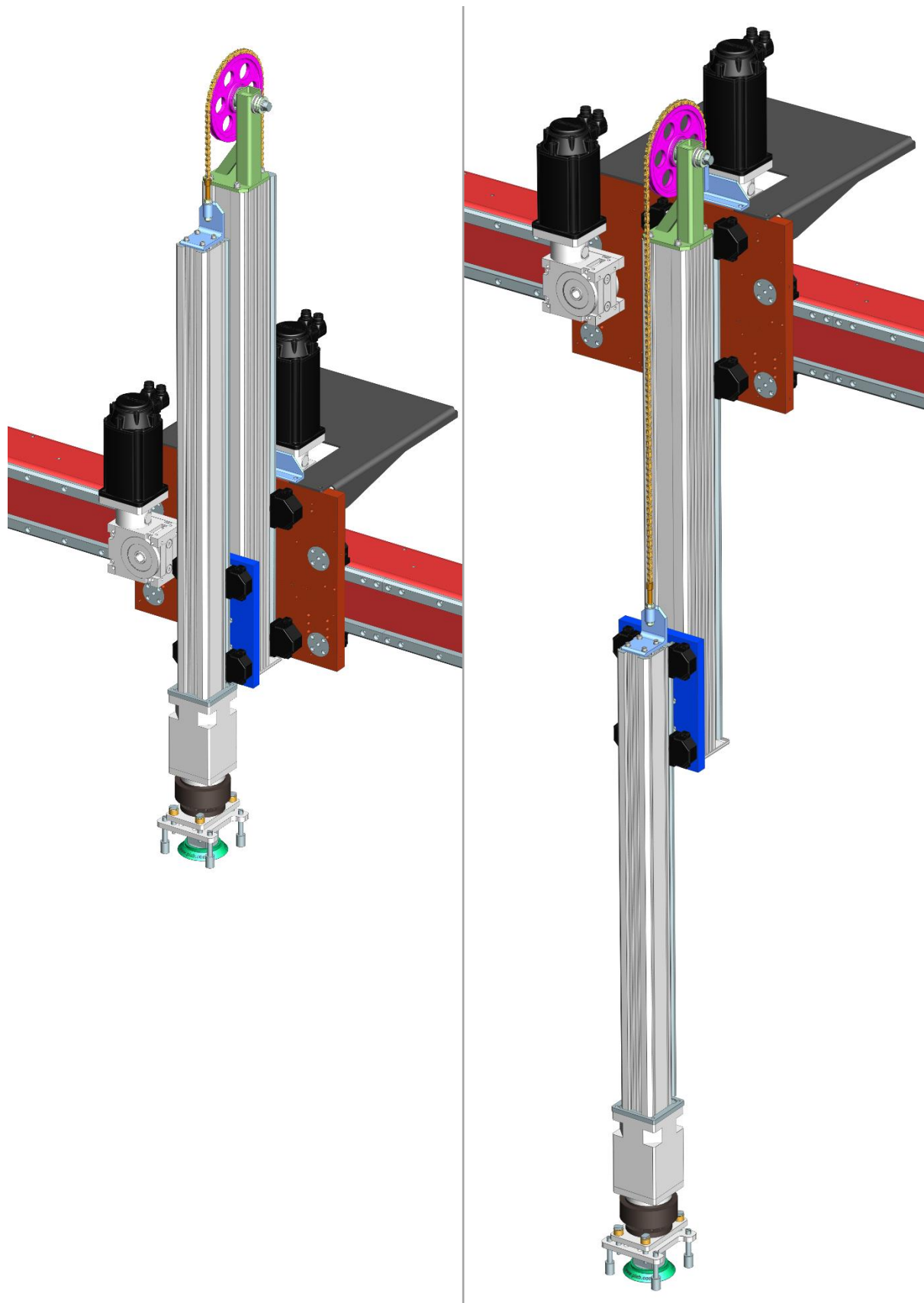
Obrázek 41 zobrazuje původní řešení osy Z. Obrázky níže zobrazují konstrukční řešení varianty A1, A2 a B. Levá část představuje ramena v horní poloze a pravá část v dolní poloze.



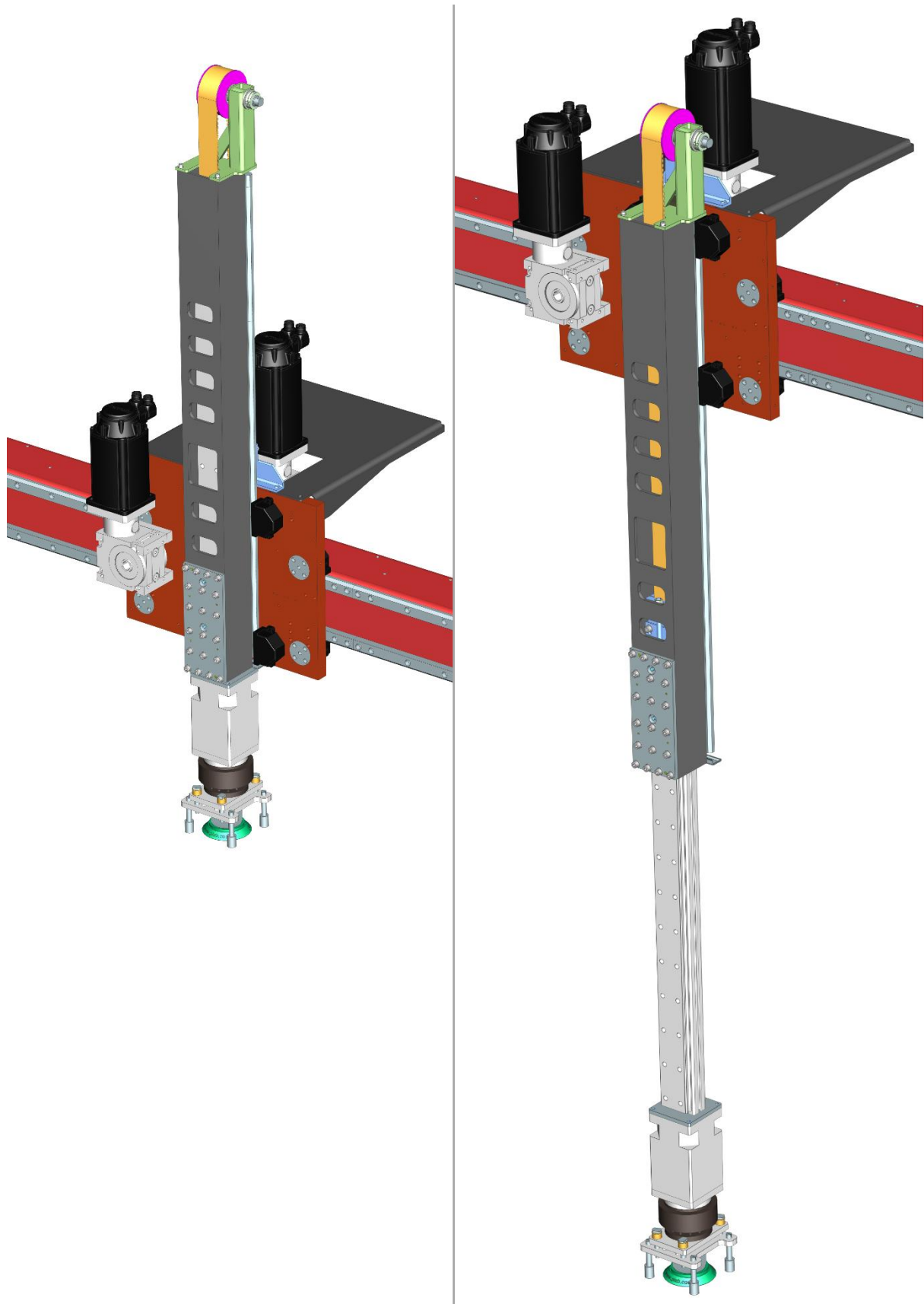
Obrázek 41 - Osa Z – Původní řešení



Obrázek 42 - Osa Z - Varianta A1



Obrázek 43 - Osa Z - Varianta A2



Obrázek 44 - Osa Z - Varianta B

## 7 Hodnocení variant

Varianty A1, A2 a B byly hodnoceny podle několika kritérií. Hodnocena byla hmotnost a tuhost. Tyto hodnoty jsou na sobě do určité míry závislé. Dále se hodnotila náročnost výroby a montáže a potřeba údržby. Následně byly hodnoceny náklady na materiál a na výrobu.

Varianta C nebyla dále rozpracována (viz kapitola 4.3), a proto nebyla ani hodnocena.

### Kritérium hmotnosti

Tabulka 20 shrnuje hmotnosti pro vybrané varianty. Do tohoto shrnutí byla započítána i hmotnost tažného elementu (řemen / řetěz) i s hmotností držáku pro jeho uchycení.

Z pohledu hmotnosti vychází nejlépe varianta A2. Varianta A1 je přibližně o 1 kg těžší a nejtěžší je varianta B, kde na tom má podíl hlavně použitý profil pro horní rameno a masivní kolejnice dolního ramena.

Tabulka 20 - Hmotnosti variant

|               |                            | Varianta |        |        |
|---------------|----------------------------|----------|--------|--------|
|               |                            | A1       | A2     | B      |
| Hmotnost [kg] | Rameno dolní               | 12,545   | 12,545 | 16,303 |
|               | Rameno horní               | 28,777   | 28,777 | 31,428 |
|               | Kladka                     | 4,926    | 4,467  | 3,868  |
|               | Tažný element (+ uchycení) | 1,692    | 1,25   | 1,57   |
|               | Celková                    | 47,94    | 47,039 | 53,169 |

### Kritérium tuhosti

Tabulka 21 udává celkové posuvy pro varianty A1 a B. Posuvy u varianty A2 jsou uvažovány stejné jako u varianty A1, neboť konstrukční řešení se liší pouze tažným členem (viz kapitola 4.1).

Tuhost ve směru X je větší u variant A1 a A2, avšak ve směru Y je tuhost větší u varianty B. Rozdíl posuvů ve směru Y je však minimální v porovnání s rozdílem posuvů ve směru X. Z tohoto důvodu jsou brány varianty A1 a A2 jako varianty s vyšší tuhostí.



Tabulka 21 - Celkové posuvy variant

| Varianta | Celkový posuv |       |
|----------|---------------|-------|
|          | $v_x$         | $v_y$ |
|          | [mm]          | [mm]  |
| A1       | 0,353         | 0,468 |
| B        | 0,797         | 0,432 |

### Kritérium náročnosti výroby

Z hlediska náročnosti výroby jsou nejvýhodnější varianty A1 a A2. Tyto varianty jsou tvořeny nakupovanými profily, do kterých se vytvoří pouze závitové otvory, a hliníkovou deskou, ve které se nachází 10 otvorů s válcovým zahloubením pro šrouby a 4 otvory pro upevnění uložení vodících kladek. Rozdíl mezi variantou A1 a A2 je v kladce. U varianty A1 je kladka nakupovaná a vytváří se pouze odlehčení a otvory pro ložiska. U varianty A2 je kladka vyráběná celá. Z toho vyplývá, že z těchto 2 variant je méně náročná na výrobu varianta A1.

Varianta B je na výrobu náročnější. U profilu dolního ramena jsou vytvořeny pouze 4 otvory se závitem. Profil horního ramena je vytvořen svařením 2 UPE profilů, do kterých jsou následně frézovány otvory pro vložení vozíků, odlehčení a montáž. Dále je potřeba vyrobit ocelovou desku pro upevnění vozíků, ve které je 20 otvorů pro šrouby a 2 otvory pro přístup k maznici, a 2 hliníkové distanční desky, kde je 6 otvorů pro šrouby a závitový otvor pro maznici.

### Kritérium náročnosti montáže

Varianty A1 a A2 se z pohledu montáže liší pouze v uchycení tažného elementu. Za nejsnazší se dá považovat montáž řetězu u varianty A2, který se na obou koncích zajistí čepem. U varianty A1 je řemen uchycen na obou koncích pomocí tvarové desky, která společně s hladkou deskou svírá konec řemenu. K seřízení je potřeba utáhnout 4 a 6 šroubů, a proto je zde montáž považována za náročnější než u varianty A2, kde se pouze vloží a zajistí 2 čepy.

Varianta B je z pohledu montáže nejnáročnější z několika důvodů. Hlavním důvodem je skutečnost, že dolní rameno zajíždí do horního a uchycení řemene je hůře přístupné. Obtížnější je zde i nastavení rovnoběžnosti ramen oproti variantám A1 a A2, kde se to provádí pomocí excentrického uložení kladek.

### Kritérium údržby

Údržba je zde posuzována podle potřeby mazání tažného elementu a lineárního vedení. Tažný element je potřeba mazat jen u varianty A2, kde je použit řetěz. Varianta A1 a A2 mají vodící kladky mazány automatickým systémem, který má společný zásobník pro všechna vedení. U varianty B je prováděno pomocí mazacího lisu.

### Kritérium nákladů na materiál

Náklady na materiál pro varianty A1 a A2 jsou uvažovány stejné. Je předpoklad, že největší podíl na nákladech na materiál tvoří ceny nosných profilů. U variant A1 a A2 jsou oba nosné profily extrudované z hliníkové slitiny. U varianty B je dolní profil také extrudovaný

z hliníkové slitiny a horní profil je tvořen klasickým ocelovým profilem UPE. Dá se tedy předpokládat, že nákladnější budou varianty A1 a A2.

### Kritérium nákladů na výrobu

Náklady na výrobu se odvíjí od náročnosti výroby výše. Na základě toho byly varianty hodnoceny jako u tohoto kritéria.

Tabulka 22 - Hodnocení variant

| Varianta          |                           | A1   | A2   | B    | Ideál |
|-------------------|---------------------------|------|------|------|-------|
| Kritéria kvality  | Hmotnost                  | 2    | 3    | 1    | 3     |
|                   | Tuhost                    | 3    | 3    | 2    | 3     |
|                   | Náročnost výroby          | 3    | 2    | 1    | 3     |
|                   | Náročnost montáže         | 2    | 3    | 1    | 3     |
|                   | Údržba                    | 3    | 1    | 2    | 3     |
|                   | Celkový součet            | 13   | 12   | 7    | 15    |
|                   | Celková normovaná hodnota | 0,87 | 0,80 | 0,47 | 1     |
| Kritérium nákladů | Náklady na materiál       | 2    | 2    | 3    | 3     |
|                   | Náklady na výrobu         | 3    | 2    | 1    | 3     |
|                   | Celkový součet            | 5    | 4    | 4    | 6     |
|                   | Celková normovaná hodnota | 0,83 | 0,67 | 0,67 | 1     |
| Celková hodnota   |                           | 0,85 | 0,73 | 0,57 | 1     |
| Pořadí            |                           | 1    | 2    | 3    |       |

Tabulka 22 zobrazuje hodnocení variant podle zvolených kritérií. Nejvhodnější variantou podle tohoto hodnocení je varianta A1.

## Technické hodnocení a závěr

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout teleskopickou osu Z a vytvořit 3D model portálového manipulátoru. Při tomto návrhu byla provedena analýza a výpočet zatěžování lineárního vedení a byly zjištěny posuvy jednotlivých ramen i celých konstrukčních řešení. Současně byla vypracována výkresová dokumentace vybraného uzlu.

Nejprve byly specifikovány požadavky. Poté byly navrženy varianty konstrukčního řešení A1, A2, B a C. Následně byly provedeny analytické výpočty a výpočty pomocí MKP pro variantu A1 a B. Varianta A2 nebyla počítána, protože varianta A2 se od varianty A1 liší pouze tažným členem a díly, které jsou s ním v interakci, a proto jsou zde uvažovány totožné posuvy. U varianty C bylo již před výpočtem zjištěno, že se nejedná o vhodnou variantu pro dané požadavky, a tak nebyla počítána. Na závěr byly zhodnoceny varianty A1, A2 a B podle zvolených kritérií. Varianta A1 byla určena pomocí tohoto hodnocení jako nejvhodnější.

Pro vytvoření 3D modelů byl použit software NX 12. V příloze se nachází část výrobní dokumentace.

Analytické výpočty byly provedeny pomocí softwaru Mathcad, kde při změně vstupních parametrů stačí pouze tyto parametry upravit a software předdefinované vztahy přepočítá. Tyto výpočty se nachází ve výpočtové zprávě v příloze.

Pomocí MKP výpočtů byly ověřeny analytické výpočty posuvů a byly zjištěny posuvy celých konstrukčních řešení kontaktní úlohou. Výpočty byly provedeny v řešiči NX Nastran, který je implementován v softwaru Siemens NX 12. Okrajové podmínky a výsledky MKP výpočtu jsou v příloze.

## Citovaná literatura

- [1] **Güdel, a.s.** Naše firma. *Güdel*. [Online] [Citace: 10. 3 2021.] <https://cz.gudel.com/>.
- [2] **Skařupa, Jiří.** Průmyslové roboty a manipulátory. *elearn.vsb.cz*. [Online] 2007. [Citace: 14. 1 2021.] [http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/PRM/Text/Skripta\\_PRaM.pdf](http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/PRM/Text/Skripta_PRaM.pdf).
- [3] **Čermák, Roman.** ZRO pr01 Uvod. *Courseware*. [Online] 2009. [Citace: 15. 1 2021.] <https://portal.zcu.cz/portal/studium/courseware/kks/zro/prednasky.html>.
- [4] **Bullová, Marie.** Rozvoj robotiky a její vliv na zaměstnanost. *Repozitář závěrečných prací*. [Online] 2016. [Citace: 16. 1 2021.] <https://is.cuni.cz/webapps/zzp/detail/164969/>.
- [5] **KUKA.** KR 6 R500 Z200. *kuka.com*. [Online] 17. 12 2020. [Citace: 16. 1 2021.] [https://www.kuka.com/-/media/kuka-downloads/imported/6b77eecacfe542d3b736af377562ecaa/0000333069\\_cs.pdf?rev=42d9eaea226f415fa7c7a31771b2fe50&hash=D27F317ABAC5B431FFA7F97F637245D4](https://www.kuka.com/-/media/kuka-downloads/imported/6b77eecacfe542d3b736af377562ecaa/0000333069_cs.pdf?rev=42d9eaea226f415fa7c7a31771b2fe50&hash=D27F317ABAC5B431FFA7F97F637245D4).
- [6] **ABB.** IRB 120. *search.abb.com/*. [Online] 11. 11 2019. [Citace: 16. 1 2021.] [https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=ROBO149EN\\_D&LanguageCode=en&DocumentPartId=2&Action=Launch](https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=ROBO149EN_D&LanguageCode=en&DocumentPartId=2&Action=Launch).
- [7] **Rothenbühler, Mario.** Güdel's linear modules for gantry robots. *gudel.picturepark.com*. [Online] 6. 9 2013. [Citace: 16. 1 2021.] <https://gudel.picturepark.com/Website/?AssetId=6847>.
- [8] **Güdel, AG.** *Robotics*. [PDF] Langenthal : GÜDEL, 2017. 0112130.
- [9] **Rothenbühler, Mario.** OPERATING MANUAL FP 3-4 V4. *gudel.picturepark.com*. [Online] 9. 7 2010. [Citace: 2. 1 2021.] <https://gudel.picturepark.com/Website/?AssetId=665>.
- [10] **Güdel, Till.** Guideway system for medium duty applications. *gudel.picturepark.com*. [Online] 29. 3 2017. [Citace: 7. 1 2021.] <https://gudel.picturepark.com/Website/?AssetId=10357>.
- [11] **Polyurethane belts.** *Elatech*. [Online] 2019. [Citace: 5. 3 2021.] <https://elatech.com/wp-content/uploads/polyurethane-belts-complete-catalogue-elatech.pdf>.
- [12] **DONGHUA.** Leaf chains. *donghua.co.uk*. [Online] [Citace: 22. 3 2021.] <https://www.donghua.co.uk/leaf-chain/>.
- [13] **HIWIN.** Lineární vedení. *hiwin.cz*. [Online] 2018. [Citace: 3. 3 2021.] <https://www.hiwin.cz/download/f15e7f7288ce2f9b68bdea6ad92df5e5>.
- [14] **Saarstahl.** Saarlöcher - 58CrMoV4. *saarstahl.de*. [Online] [Citace: 28. 2 2021.] <http://www.saarstahl.de/sag/downloads/download/11573>.
- [15] **ALUMINCO.** Aluminium alloy EN-AW 6060. *aluminco.com*. [Online] [Citace: 28. 2 2021.] [https://www.aluminco.com/media/155961/ALUMINIUM-ALLOY-EN-AW-6060\\_MATERIAL-DATA-SHEET\\_ALUMINCO.pdf](https://www.aluminco.com/media/155961/ALUMINIUM-ALLOY-EN-AW-6060_MATERIAL-DATA-SHEET_ALUMINCO.pdf).
- [16] **item.** Technical Data for Profiles. *cz-catalog.item24.com*. [Online] [Citace: 21. 3 2021.] [https://cz-catalog.item24.com/images/medienelemente/DOK/DATA/DOK\\_DATA\\_profil-tech-daten\\_\\_SEN\\_\\_AIN\\_\\_V3.pdf?\\_ga=2.15291254.1155965101.1616346256-270193331.1611310791](https://cz-catalog.item24.com/images/medienelemente/DOK/DATA/DOK_DATA_profil-tech-daten__SEN__AIN__V3.pdf?_ga=2.15291254.1155965101.1616346256-270193331.1611310791).

- [17] **Material, World.** EN 1.0038 Steel S235JR Material Equivalent. *theworldmaterial.com*. [Online] [Citace: 21. 3 2021.] <https://www.theworldmaterial.com/1-0038-steel-s235jr-material/>.
- [18] **STEEL, CZ FERRO.** ČSN 12060 – ocel k zušlechťování. <http://www.czferrosteel.cz/>. [Online] [Citace: 21. 3 2021.] <http://www.czferrosteel.cz/pdf/tyce-12060.pdf>.

## Použitý software

MICROSOFT, Microsoft Word 2016

MICROSOFT, Microsoft Excel 2016

SIEMENS, NX 12

AUTODESK, Inventor 2020

AUTODESK, AutoCAD 2020

AUTODESK, SketchBook

SKILLBRAINS, LightShot

MICROSOFT, Paint

PTC, Mathcad Prime 6.0.0.0

## Seznam obrázků

|  |    |
|--|----|
| Obrázek 1 - Cylindrický pracovní prostor [3] .....                     | 3  |
| Obrázek 2 - Sférický pracovní prostor [3] [4] .....                    | 3  |
| Obrázek 3 - Pracovní prostor pro typ SCARA [3] [5] .....               | 4  |
| Obrázek 4 - Pracovní prostor pro angulární typ [3] [6] .....           | 4  |
| Obrázek 5 - Pracovní prostor pro kartézský typ [3] [7] .....           | 4  |
| Obrázek 6 - Portál .....   | 6  |
| Obrázek 7 - Spojení servomotoru a převodovky zubovou spojkou [9] ..... | 7  |
| Obrázek 8 – Pohon osy X .....  | 7  |
| Obrázek 9 - Nosník na 2 podporách .....                                | 8  |
| Obrázek 10 - Kolejnice V [10] .....                                    | 9  |
| Obrázek 11 - Kolejnice V s ozubeným hřebenem [10] .....                | 9  |
| Obrázek 12 - Kolejnice plochá [10] .....                               | 9  |
| Obrázek 13 - Kolejnice plochá s ozubeným hřebenem [10] .....           | 9  |
| Obrázek 14 - Kladka pro kolejnici V [10] .....                         | 10 |
| Obrázek 15 - Kladka pro kolejnici plochou [10] .....                   | 10 |

|  |    |
|--|----|
| Obrázek 16 - Schéma mazacího systému [10].....   | 11 |
| Obrázek 17 - Hliníkový profil s vedením [10] .....                                     | 11 |
| Obrázek 18 - Schéma bezpečné zóny .....  | 12 |
| Obrázek 19 - Struktura variant A1 a A2.....  | 14 |
| Obrázek 20 - Struktura varianty B.....   | 15 |
| Obrázek 21 - Struktura varianty C.....   | 16 |
| Obrázek 22 - Schéma zatížení - pohyb ve směru X - Varianta A1.....                     | 21 |
| Obrázek 23 - Schéma zatížení - pohyb ve směru Y - Varianta A1.....                     | 23 |
| Obrázek 24 - Schéma zatížení - pohyb ve směru Z - Varianta A1 .....                    | 25 |
| Obrázek 25 - Schéma zatížení - pohyb ve směru X+Y+Z - Varianta A1.....                 | 27 |
| Obrázek 26 - Schéma zatížení kladky .....  | 28 |
| Obrázek 27 - Schéma příd. zatížení dolního ramena od zrychlení v Y - Varianta A1 ..... | 28 |
| Obrázek 28 - Schéma příd. zatížení horního ramena od zrychlení v Y - Varianta A1 ..... | 29 |
| Obrázek 29 - Indexování vodících kladek - Varianta A1 .....                            | 33 |
| Obrázek 30 - Indexování vodících kladek pojezdu .....                                  | 33 |
| Obrázek 31 - Maximální přenášená hodnota síly [10].....                                | 34 |
| Obrázek 32 - Flyerův řetěz - Kombinace destiček [12].....                              | 36 |
| Obrázek 33 - Schéma zatížení - pohyb ve směru X+Y+Z - Varianta B.....                  | 38 |
| Obrázek 34 - Schéma příd. zatížení dolního ramena od zrychlení v Y - Varianta B .....  | 39 |
| Obrázek 35 - Schéma příd. zatížení horního ramena od zrychlení v Y - Varianta B .....  | 40 |
| Obrázek 36 - Indexování vodících kladek a vozíků - Varianta B.....                     | 41 |
| Obrázek 37 - Spojení ramen - Varianta A1 .....   | 47 |
| Obrázek 38 - Posuv v X - Pohyb v X+Y+Z - Varianta A1 - Celková úloha.....              | 47 |
| Obrázek 39 - Posuv v Y - Pohyb v X+Y+Z - Varianta A1 - Celková úloha.....              | 48 |
| Obrázek 40 - Portálový manipulátor - aktuální stav.....                                | 50 |
| Obrázek 41 - Osa Z – Původní řešení.....   | 51 |
| Obrázek 42 - Osa Z - Varianta A1.....  | 52 |
| Obrázek 43 - Osa Z - Varianta A2.....  | 53 |
| Obrázek 44 - Osa Z - Varianta B.....   | 54 |

## Seznam tabulek

|  |    |
|--|----|
| Tabulka 1 - Parametry manipulátoru FP-3 [8].....                             | 5  |
| Tabulka 2 - Možnosti řešení jednotlivých uzlů .....                          | 13 |
| Tabulka 3 - Parametry pro výpočet - Varianta A1 [8].....                     | 18 |
| Tabulka 4 - Parametry vodících kladek [10] .....                             | 32 |
| Tabulka 5 - Kontrola vodících kladek - Vypočtené hodnoty - Varianta A1 ..... | 32 |
| Tabulka 6 - Kontrola vodících kladek - Vypočtené hodnoty s omezením .....    | 32 |
| Tabulka 7 - Posuvy varianta A1 - Analyticky - Profily samostatně .....       | 35 |
| Tabulka 8 - Zatížení řemene - Varianta A1 .....                              | 35 |
| Tabulka 9 - Prodloužení řemenů - Varianta A1 [11].....                       | 35 |
| Tabulka 10 - Parametry pro výpočet - Varianta B [8].....                     | 37 |
| Tabulka 11 - Reakce - Varianta B .....                                       | 39 |
| Tabulka 12 - Parametry lineárního vedení HIWIN řady WE_35C [13].....         | 41 |
| Tabulka 13 - Kontrola lineárního vedení HIWIN - Vypočtené hodnoty.....       | 41 |
| Tabulka 14 - Kontrola vodících kladek - Vypočtené hodnoty - Varianta B.....  | 42 |
| Tabulka 15 - Zatížení řemene - Varianta B .....                              | 43 |
| Tabulka 16 - Prodloužení řemenů - Varianta B [11] .....                      | 43 |
| Tabulka 17 - Materiálové parametry - Varianta A1 [14] [15].....              | 45 |
| Tabulka 18 - Posuvy varianty A1 - MKP – Celková kontaktní úloha.....         | 48 |
| Tabulka 19 - Materiálové parametry - Varianta B [16] [17] [18] .....         | 49 |
| Tabulka 20 - Hmotnosti variant.....  | 55 |
| Tabulka 21 - Celkové posuvy variant.....                                     | 56 |
| Tabulka 22 - Hodnocení variant .....   | 57 |

## Seznam příloh

- Příloha č.1 – Výpočtová zpráva
- Příloha č.2 – Výpočty MKP

## Výkresová dokumentace

- Výkres sestavy – PORTALOVY MANIPULATOR – KKS2021-01-00-00
- Výkres podsestavy – OSA Z – VARIANTA A1 – KKS2021-01-01-00
- Výrobní výkres – DESKA ULOZENI – KKS2021-01-01-01-01-01

## **PŘÍLOHA č. 1**

### **Výpočtová zpráva**



# Obsah

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Varianta A1</b> .....                                      | <b>1</b>  |
| 1.1      | Technické parametry .....                                     | 1         |
| 1.1.1    | Rozměrové parametry .....                                     | 1         |
| 1.1.2    | Hmotnostní parametry .....                                    | 1         |
| 1.1.3    | Parametry z katalogu .....                                    | 2         |
| 1.1.4    | Materiálové parametry pro EN-AW 6060 .....                    | 2         |
| 1.2      | Zatěžující účinky .....                                       | 3         |
| 1.2.1    | Zatížení od hmotnosti .....                                   | 3         |
| 1.2.2    | Setrvačné účinky .....  | 3         |
| 1.3      | Zatěžovací stavy .....  | 5         |
| 1.3.1    | Pohyb ve směru X .....  | 5         |
| 1.3.1.1  | Reakční účinky .....  | 5         |
| 1.3.1.2  | Posuv ve směru X – Castiglianova věta .....                   | 8         |
| 1.3.2    | Pohyb ve směru Y .....  | 11        |
| 1.3.2.1  | Reakční účinky .....  | 11        |
| 1.3.2.2  | Přídavné zatížení vodících kladek od setrvačných účinků ..... | 14        |
| 1.3.2.3  | Kontrola vodících kladek .....                                | 15        |
| 1.3.2.4  | Posuv ve směru Y – Castiglianova věta .....                   | 16        |
| 1.3.3    | Pohyb ve směru Z .....  | 20        |
| 1.3.3.1  | Reakční účinky .....  | 20        |
| 1.3.4    | Pohyb ve směru X+Y+Z .....                                    | 22        |
| 1.3.4.1  | Reakční účinky .....  | 22        |
| 1.3.4.2  | Přídavné zatížení vodících kladek od setrvačných účinků ..... | 23        |
| 1.3.4.3  | Reakční účinky – Pojezd .....                                 | 25        |
| 1.3.4.4  | Kontrola vodících kladek .....                                | 28        |
| 1.3.4.5  | Omezení zrychlení .....                                       | 29        |
| 1.3.4.6  | Posuv ve směru X – Castiglianova věta .....                   | 34        |
| 1.3.4.7  | Posuv ve směru Y – Castiglianova věta .....                   | 37        |
| <b>2</b> | <b>Varianta B</b> .....                                       | <b>41</b> |
| 2.1      | Technické parametry .....                                     | 41        |
| 2.1.1    | Rozměrové parametry .....                                     | 41        |
| 2.1.2    | Hmotnostní parametry .....                                    | 41        |
| 2.1.3    | Parametry z katalogu .....                                    | 42        |
| 2.2      | Zatěžující účinky .....                                       | 42        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 2.2.1    | Zatížení od hmotnosti .....                                     | 42        |
| 2.2.2    | Setrvačné účinky .....  | 42        |
| 2.3      | Zatěžovací stavy .....  | 43        |
| 2.3.1    | Pohyb ve směru X .....  | 43        |
| 2.3.1.1  | Reakční účinky .....  | 43        |
| 2.3.2    | Pohyb ve směru Y .....  | 45        |
| 2.3.2.1  | Reakční účinky .....  | 45        |
| 2.3.3    | Pohyb ve směru Z .....  | 48        |
| 2.3.3.1  | Reakční účinky .....  | 48        |
| 2.3.4    | Pohyb ve směru X+Y+Z .....                                      | 50        |
| 2.3.4.1  | Reakční účinky .....  | 50        |
| 2.3.4.2  | Přídavné zatížení lineárního vedení od setrvačných účinků ..... | 53        |
| 2.3.4.3  | Zatížení lineárního vedení HIWIN .....                          | 53        |
| 2.3.4.4  | Zatížení jednotlivých vodících kladek – osa Z .....             | 55        |
| 2.3.4.5  | Reakční účinky – Pojezd .....                                   | 56        |
| 2.3.4.6  | Zatížení jednotlivých vodících kladek – pojezd .....            | 58        |
| 2.3.4.7  | Kontrola lineárního vedení HIWIN – WEH35CA .....                | 59        |
| 2.3.4.8  | Kontrola vodících kladek .....                                  | 60        |
| <b>3</b> | <b>Předepnutí šroubových spojů .....</b>                        | <b>61</b> |
| 3.1      | Varianta A1 .....   | 61        |
| 3.1.1    | Dolní rameno .....  | 61        |
| 3.1.2    | Horní rameno .....  | 62        |
| 3.2      | Varianta B .....  | 64        |
| 3.2.1    | Dolní rameno .....  | 64        |
| 3.2.2    | Horní rameno .....  | 65        |

# 1 Varianta A1

## 1.1 Technické parametry

### 1.1.1 Rozměrové parametry

Rozměrové parametry byly odměřeny v softwaru NX 12. Níže jsou zobrazeny v příslušných schématech.

Rozměry dolního ramena

$$\begin{aligned}a &:= 45.25 \text{ mm} \\b &:= 205 \text{ mm} \\x_T &:= 26.34 \text{ mm} \\z_T &:= 506.77 \text{ mm} \\z_U &:= 1049.5 \text{ mm} \\k &:= 42.25 \text{ mm}\end{aligned}$$

Rozměry horního ramena

$$\begin{aligned}c &:= 316 \text{ mm} \\d &:= 907.5 \text{ mm} \\x_K &:= 62.25 \text{ mm} \\x_R &:= 153.25 \text{ mm} \\x_{T2} &:= 57.17 \text{ mm} \\z_{T2} &:= 666.58 \text{ mm} \\z_{K2} &:= 1170 \text{ mm} \\p &:= 6 \text{ mm} \\k_2 &:= 57.5 \text{ mm} \\y_r &:= 16.7 \text{ mm} \\d_v &:= 31.83 \text{ mm} \\r &:= y_r + \frac{d_v}{2} = 32.615 \text{ mm}\end{aligned}$$

### 1.1.2 Hmotnostní parametry

Hmotnostní parametry byly zjištěny pomocí analýzy hmotnosti v softwaru NX 12.

Hmotnost dolního ramena

$$m_c := 12.545 \text{ kg}$$

Hmotnost horního ramena

$$m_{c2} := 28.777 \text{ kg}$$

Hmotnost kladky

$$m_K := 4.926 \text{ kg}$$

Hmotnost celková

$$m_{celk} := m_c + m_{c2} + m_K = 46.248 \text{ kg}$$

### 1.1.3 Parametry z katalogu

|  |                                     |
|--|-------------------------------------|
| Zrychlení ve směru X                                   | $a_x := 2 \frac{m}{s^2}$            |
| Zrychlení ve směru Y                                   | $a_y := 5.5 \frac{m}{s^2}$          |
| Zrychlení ve směru Z                                   | $a_z := 10 \frac{m}{s^2}$           |
| Užitečné zatížení manipulátoru                         | $F := 250 \text{ N}$                |
| Kvadratické momenty průřezu<br>profilu Güdel 80 x 80   | $I_{x80} := 176.2511 \text{ cm}^4$  |
|  | $I_{y80} := 169.3521 \text{ cm}^4$  |
| Kvadratické momenty průřezu<br>profilu Güdel 110 x 110 | $I_{x110} := 593.8861 \text{ cm}^4$ |
|  | $I_{y110} := 580.4029 \text{ cm}^4$ |

*Pozn.: označení os X a Y je zde podle souřadného systému modelu - opačně než v katalogu.*

### 1.1.4 Materiálové parametry pro EN-AW 6060

Profil dolního ramena (80 x 80) i horního ramena (110 x 110) je z hliníkové slitiny EN-AW 6060. Parametry byly převzaty z hlavní části diplomové práce.

|                                |                         |
|--------------------------------|-------------------------|
| Youngův modul pružnosti v tahu | $E := 69.5 \text{ GPa}$ |
|--------------------------------|-------------------------|

## 1.2 Zatěžující účinky

### 1.2.1 Zatížení od hmotnosti

|                                  |  |
|----------------------------------|--|
| Tíhové zatížení dolního ramena   | $G_c := m_c \cdot g = 123.024 \text{ N}$       |
| Tíhové zatížení horního ramena   | $G_{c2} := m_{c2} \cdot g = 282.206 \text{ N}$ |
| Tíhové zatížení od kladky        | $G_K := m_K \cdot g = 48.308 \text{ N}$        |
| Tíhové zatížení od hmotného bodu | $G_U := F = 250 \text{ N}$                     |
| Hmotnost hmotného bodu (HB)      | $m_U := \frac{G_U}{g} = 25.493 \text{ kg}$     |

### 1.2.2 Setrvačné účinky

Z převodu pomocí kladky a řemene vychází následující závislost mezi zrychlením ve směru osy Z horního a dolního ramena. Zdůvodnění je uvedeno v hlavní části diplomové práce.

Zrychlení ve směru Z horního ramena  $a_{z2} := \frac{a_z}{2} = 5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

#### Setrvačné síly od $a_x$

- Na dolní rameno  $S_x := m_c \cdot a_x = 25.09 \text{ N}$
- Na horní rameno  $S_{2x} := m_{c2} \cdot a_x = 57.554 \text{ N}$
- Na HB  $S_{Ux} := m_U \cdot a_x = 50.986 \text{ N}$

#### Setrvačné síly od $a_y$

- Na dolní rameno  $S_y := m_c \cdot a_y = 68.998 \text{ N}$
- Na horní rameno  $S_{2y} := m_{c2} \cdot a_y = 158.274 \text{ N}$
- Na HB  $S_{Uy} := m_U \cdot a_y = 140.211 \text{ N}$

#### Setrvačné síly od $a_z$

- Na dolní rameno  $S_z := m_c \cdot a_z = 125.45 \text{ N}$
- Na horní rameno  $S_{2z} := m_{c2} \cdot a_{z2} = 143.885 \text{ N}$
- Na HB  $S_{Uz} := m_U \cdot a_z = 254.929 \text{ N}$

### Ohybové momenty - průhyb

Pro výpočet průhybu byly zavedeny ohybové momenty od sil v ose Z od HB, které způsobují ohybové zatížení.

$$M_{GU} := G_U \cdot (a - x_T) = 4727.5 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

$$M_{S_{Uz}} := S_{Uz} \cdot (a - x_T) = 4820.708 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Created with PTC Mathcad Express. See [www.mathcad.com](http://www.mathcad.com) for more information.

## 1.3 Zatěžovací stavy

Pro přehlednější zápis (posuvů) byly zavedeny následující vztahy:

$$l := z_U - z_T = 542.73 \text{ mm}$$

$$m := z_T - b = 301.77 \text{ mm}$$

$$g := z_{K2} - (b + d) = 57.5 \text{ mm}$$

$$t := d - z_{T2} = 240.92 \text{ mm}$$

$$e := z_{T2} - c = 350.58 \text{ mm}$$

Pro zjištění velikosti posunutí konce horního ramena byla zavedena fiktivní síla:

$$F_{fikt} := 0 \text{ N}$$

### 1.3.1 Pohyb ve směru X

#### 1.3.1.1 Reakční účinky

##### Rameno dolní

$$\Sigma F_{ix} = 0; \quad R_{Bx} - R_{Ax} - S_x - S_{Ux} = 0$$

$$\Sigma F_{iz} = 0; \quad G_U - R_R + G_c = 0$$

$$\Sigma M_{iA} = 0; \quad G_U \cdot a + S_{Ux} \cdot z_U + G_c \cdot x_T + S_x \cdot z_T - R_{Bx} \cdot b = 0$$

$$R_{Bx} := \frac{G_U \cdot a + S_{Ux} \cdot z_U + G_c \cdot x_T + S_x \cdot z_T}{b} = 394.036 \text{ N}$$

$$R_{Ax} := R_{Bx} - S_x - S_{Ux} = 317.96 \text{ N}$$

$$R_R := G_c + G_U = 373.024 \text{ N}$$

$$\text{Síla od kladky} \quad F_K := G_K + 2 \cdot R_R = 794.356 \text{ N}$$

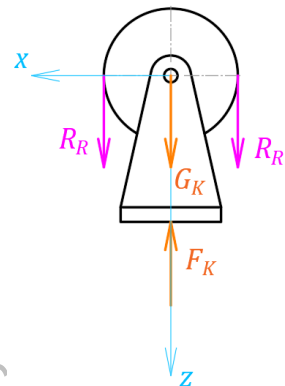


Schéma zatížení kladky

##### Rameno horní

$$\Sigma F_{ix} = 0; \quad R_{Dx} - R_{Cx} - S_{2x} - R_{Bx} + R_{Ax} = 0$$

$$\Sigma F_{iy} = 0; \quad F_R - R_{Cy} - R_{Dy} = 0$$

$$\Sigma F_{iz} = 0; \quad F_K - R_{Pz} + G_{c2} = 0$$

$$\Sigma M_{iC} = 0; \quad F_K \cdot x_K - R_{Dx} \cdot c + G_{c2} \cdot x_{T2} + S_{2x} \cdot z_{T2} - R_{Ax} \cdot d + R_{Bx} \cdot (b + d) = 0$$

$$\Sigma M_{iO} = 0; \quad R_{Dy} \cdot c - R_{Pz} \cdot r - F_R \cdot p = 0$$

Síly v ozubení

$$F_o = R_{Pz}$$

$$F_R = F_o \cdot \tan(\alpha)$$

$$\alpha := 20^\circ$$

Úhel záběru

$$R_{Dx} := \frac{F_K \cdot x_K + G_{c2} \cdot x_{T2} + S_{2x} \cdot z_{T2} - R_{Ax} \cdot d + R_{Bx} \cdot (b + d)}{c} = 803.047 \text{ N}$$

$$R_{Cx} := R_{Dx} - S_{2x} - R_{Bx} + R_{Ax} = 669.418 \text{ N}$$

$$R_{Pz} := F_K + G_{c2} = 1076.562 \text{ N}$$

$$F_o := R_{Pz} = 1076.562 \text{ N}$$

$$F_R := F_o \cdot \tan(\alpha) = 391.837 \text{ N}$$

$$R_{Dy} := \frac{R_{Pz} \cdot r + F_R \cdot p}{c} = 118.554 \text{ N}$$

$$R_{Cy} := F_R - R_{Dy} = 273.283 \text{ N}$$



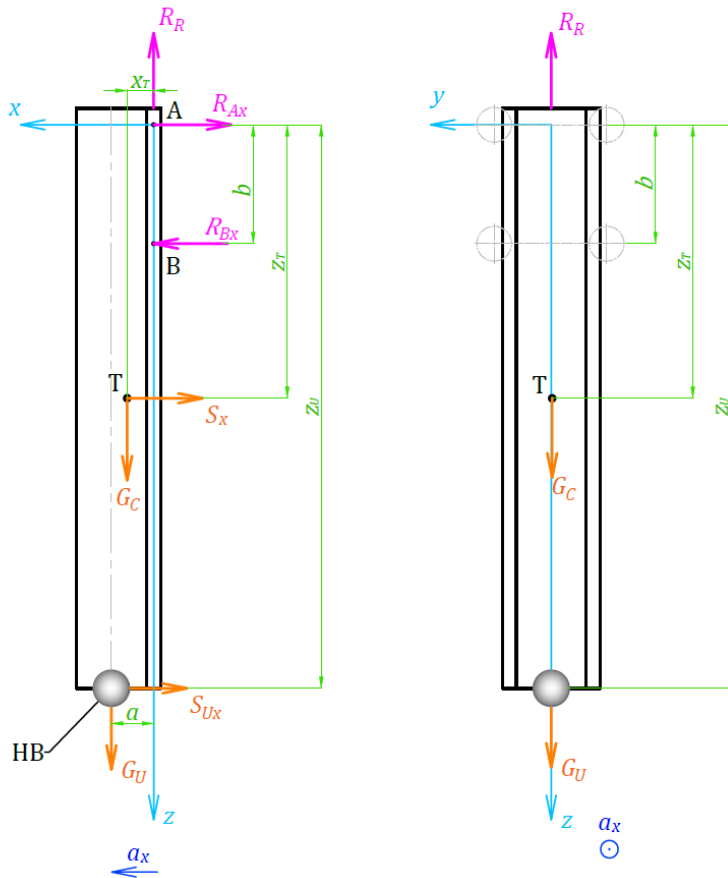
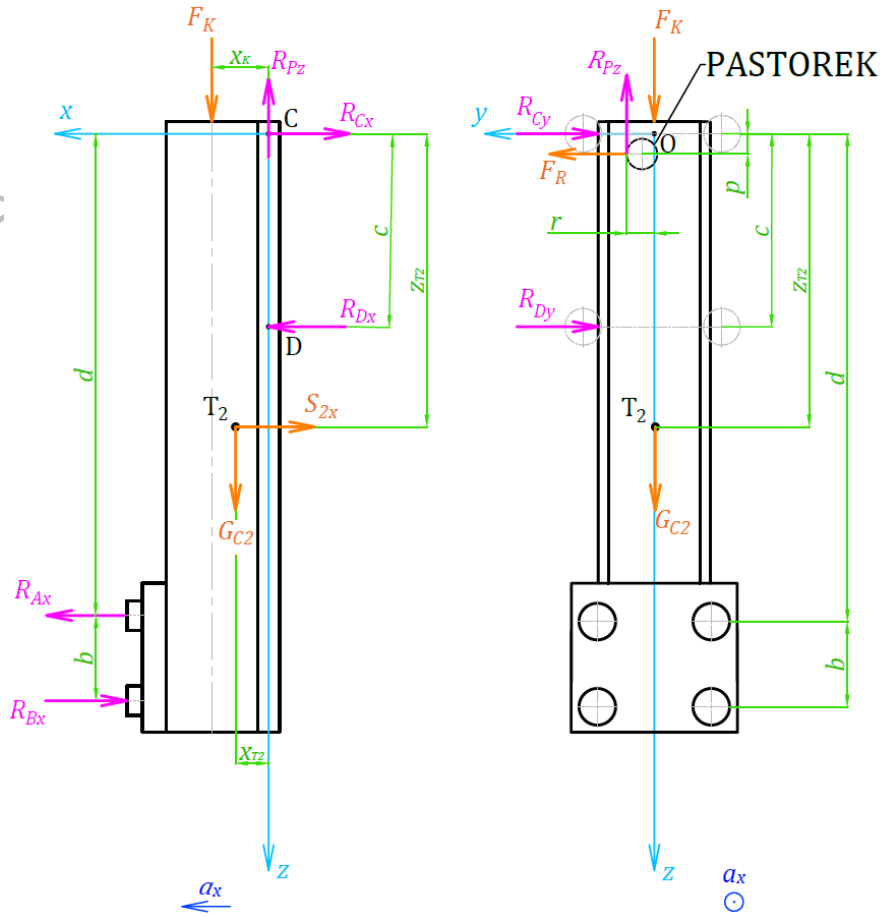


Schéma zatížení - pohyb ve směru X

### 1.3.1.2 Posuv ve směru X - Castiglianova věta

Castiglianova věta - obecně

$$w = \frac{1}{E \cdot I} \cdot \int_l^{\text{II}} M(z) \cdot \left( \frac{\partial M(z)}{\partial F} \right) dz$$

#### Rameno dolní

**Pole I:**  $z_1 \in \langle 0; l \rangle$

$$M_I(z_1) = S_{Ux} \cdot z_1 + M_{GU}$$

$$\frac{\partial M_I}{\partial S_{Ux}} = z_1$$

$$v_{xI} := \frac{1}{E \cdot I_{y80}} \cdot \int_0^l (S_{Ux} \cdot z_1 + M_{GU}) \cdot z_1 dz_1 = 0.029 \text{ mm}$$

**Pole II:**  $z_2 \in \langle 0; m \rangle$

$$M_{II}(z_2) = S_{Ux} \cdot (l + z_2) + M_{GU} + S_x \cdot z_2 + M_{GC}$$

$$\frac{\partial M_{II}}{\partial S_{Ux}} = (l + z_2)$$

$$v_{xII} := \frac{1}{E \cdot I_{y80}} \cdot \int_0^m (S_{Ux} \cdot (l + z_2) + M_{GU} + S_x \cdot z_2) \cdot (l + z_2) dz_2 = 0.08 \text{ mm}$$

**Pole III:**  $z_3 \in \langle 0; b \rangle$

$$M_{III}(z_3) = S_{Ux} \cdot (l + m + z_3) + M_{GU} + S_x \cdot (m + z_3) - R_{Bx} \cdot z_3$$

$$\frac{\partial M_{III}}{\partial S_{Ux}} = (l + m + z_3)$$

$$v_{xIII} := \frac{1}{E \cdot I_{y80}} \cdot \int_0^b \left( S_{Ux} \cdot (l + m + z_3) + M_{GU} + S_x \cdot (m + z_3) - R_{Bx} \cdot z_3 \right) \cdot (l + m + z_3) dz_3 = 0.036 \text{ mm}$$

#### Celkový posuv

$$v_x := v_{xI} + v_{xII} + v_{xIII} = 0.144 \text{ mm}$$

## Rameno horní

**Pole I:**  $z_1 \in \langle 0; g \rangle$

$$M_I(z_1) = F_{fikt} \cdot z_1$$

$$\frac{\partial M_I}{\partial F_{fikt}} = z_1$$

$$v_{2xI} := \frac{1}{E \cdot I_{y110}} \cdot \int_0^g F_{fikt} \cdot z_1 \cdot z_1 \, dz_1 = 0 \text{ mm}$$

**Pole II:**  $z_2 \in \langle 0; b \rangle$

$$M_{II}(z_2) = F_{fikt} \cdot (g + z_2) + R_{Bx} \cdot z_2$$

$$\frac{\partial M_{II}}{\partial F_{fikt}} = (g + z_2)$$

$$v_{2xII} := \frac{1}{E \cdot I_{y110}} \cdot \int_0^b (F_{fikt} \cdot (g + z_2) + R_{Bx} \cdot z_2) \cdot (g + z_2) \, dz_2 = 0.004 \text{ mm}$$

**Pole III:**  $z_3 \in \langle 0; t \rangle$

$$M_{III}(z_3) = F_{fikt} \cdot (g + b + z_3) + R_{Bx} \cdot (b + z_3) - R_{Ax} \cdot z_3$$

$$\frac{\partial M_{III}}{\partial F_{fikt}} = (g + b + z_3)$$

$$v_{2xIII} := \frac{1}{E \cdot I_{y110}} \cdot \int_0^t \left( F_{fikt} \cdot (g + b + z_3) + R_{Bx} \cdot (b + z_3) - R_{Ax} \cdot z_3 \right) \cdot (g + b + z_3) \, dz_3 = 0.021 \text{ mm}$$

**Pole IV:**  $z_4 \in \langle 0; e \rangle$

$$M_{IV}(z_4) = F_{fikt} \cdot (g + b + t + z_4) + R_{Bx} \cdot (b + t + z_4) - R_{Ax} \cdot (t + z_4) + S_{2x} \cdot z_4 + M_{GC2}$$

$$\frac{\partial M_{IV}}{\partial F_{fikt}} = (g + b + t + z_4)$$

$$v_{2xIV} := \frac{1}{E \cdot I_{y110}} \cdot \int_0^e \left( F_{fikt} \cdot (g + b + t + z_4) + R_{Bx} \cdot (b + t + z_4) - R_{Ax} \cdot (t + z_4) + S_{2x} \cdot z_4 \right) \cdot (g + b + t + z_4) \, dz_4 = 0.073 \text{ mm}$$

**Pole V:**  $z_5 \in (0; c)$

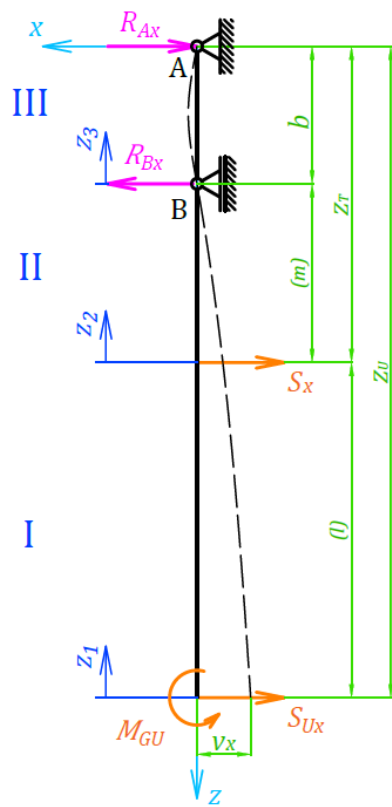
$$M_V(z_5) = F_{fikt} \cdot (g + b + t + e + z_5) + R_{Bx} \cdot (b + t + e + z_5) \downarrow \\ - R_{Ax} \cdot (t + e + z_5) + S_{2x} \cdot (e + z_5) + M_{GC2} - R_{Dx} \cdot z_5$$

$$\frac{\partial M_V}{\partial F_{fikt}} = (g + b + t + e + z_5)$$

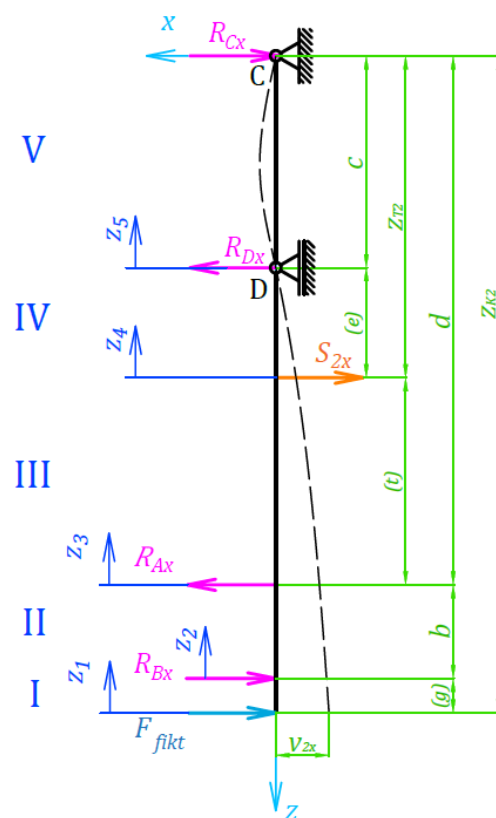
$$v_{2xV} := \frac{1}{E \cdot I_{y110}} \cdot \int_0^c \left( \begin{matrix} F_{fikt} \cdot (g + b + t + e + z_5) \downarrow \\ + R_{Bx} \cdot (b + t + e + z_5) \downarrow \\ - R_{Ax} \cdot (t + e + z_5) + S_{2x} \cdot (e + z_5) \downarrow \\ - R_{Dx} \cdot z_5 \end{matrix} \right) \cdot \left( \begin{matrix} (g + b + t) \downarrow \\ + (e + z_5) \end{matrix} \right) dz_5 = 0.027 \text{ mm}$$

**Celkový posuv**

$$v_{2x} := v_{2xI} + v_{2xII} + v_{2xIII} + v_{2xIV} + v_{2xV} = 0.126 \text{ mm}$$



Dolní rameno



Horní rameno

Schéma pro výpočet posuvů v X - pohyb ve směru X

## 1.3.2 Pohyb ve směru Y

### 1.3.2.1 Reakční účinky

#### Rameno dolní

$$\Sigma F_{ix} = 0; \quad R_{Bx} - R_{Ax} = 0$$

$$\Sigma F_{iy} = 0; \quad S_y + S_{Uy} - R_{By} + R_{Ay} = 0$$

$$\Sigma F_{iz} = 0; \quad G_U - R_R + G_c = 0$$

$$\Sigma M_{iA} = 0; \quad G_U \cdot a + G_c \cdot x_T - R_{Bx} \cdot b = 0$$

$$\Sigma M_{iP} = 0; \quad R_{By} \cdot b - S_{Uy} \cdot z_U - S_y \cdot z_T = 0$$

$$R_{Bx} := \frac{G_U \cdot a + G_c \cdot x_T}{b} = 70.99 \text{ N}$$

$$R_{Ax} := R_{Bx} = 70.99 \text{ N}$$

$$R_{By} := \frac{S_{Uy} \cdot z_U + S_y \cdot z_T}{b} = 888.377 \text{ N}$$

$$R_{Ay} := R_{By} - S_{Uy} - S_y = 679.169 \text{ N}$$

$$R_R := G_c + G_U = 373.024 \text{ N}$$

$$\text{Síla od kladky} \quad F_K := G_K + 2 \cdot R_R = 794.356 \text{ N}$$

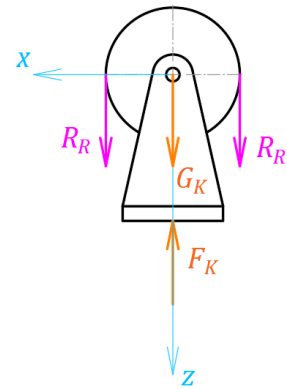


Schéma zatížení kladky

#### Rameno horní

$$\Sigma F_{ix} = 0; \quad R_{Dx} - R_{Cx} - R_{Bx} + R_{Ax} = 0$$

$$\Sigma F_{iy} = 0; \quad F_R + R_{Cy} - R_{Dy} + S_{2y} + R_{By} - R_{Ay} = 0$$

$$\Sigma F_{iz} = 0; \quad F_K - R_{Pz} + G_{C2} = 0$$

$$\Sigma M_{iC} = 0; \quad F_K \cdot x_K - R_{Dx} \cdot c + G_{c2} \cdot x_{T2} - R_{Ax} \cdot d + R_{Bx} \cdot (b + d) = 0$$

$$\Sigma M_{iO} = 0; \quad R_{Dy} \cdot c - R_{Pz} \cdot r - F_R \cdot p - S_{2y} \cdot z_{T2} - R_{By} \cdot (b + d) + R_{Ay} \cdot d = 0$$

Síly v ozubení

$$F_o = R_{Pz}$$

$$F_R = F_o \cdot \tan(\alpha)$$

$$\alpha := 20^\circ$$

Úhel záběru

$$R_{Dx} := \frac{F_K \cdot x_K + G_{c2} \cdot x_{T2} - R_{Ax} \cdot d + R_{Bx} \cdot (b + d)}{c} = 253.593 \text{ N}$$

$$R_{Cx} := R_{Dx} - R_{Bx} + R_{Ax} = 253.593 \text{ N}$$

$$R_{Pz} := F_K + G_{c2} = 1076.562 \text{ N}$$

$$F_o := R_{Pz} = 1076.562 \text{ N}$$

$$F_R := F_o \cdot \tan(\alpha) = 391.837 \text{ N}$$

$$R_{Dy} := \frac{R_{Pz} \cdot r + F_R \cdot p + S_{2y} \cdot z_{T2} + R_{By} \cdot (b + d) - R_{Ay} \cdot d}{c} = 1629.554 \text{ N}$$

$$R_{Cy} := R_{Dy} - F_R - S_{2y} - R_{By} + R_{Ay} = 870.235 \text{ N}$$

Created with PTC Mathcad Express. See [www.mathcad.com](http://www.mathcad.com) for more information.

Created with

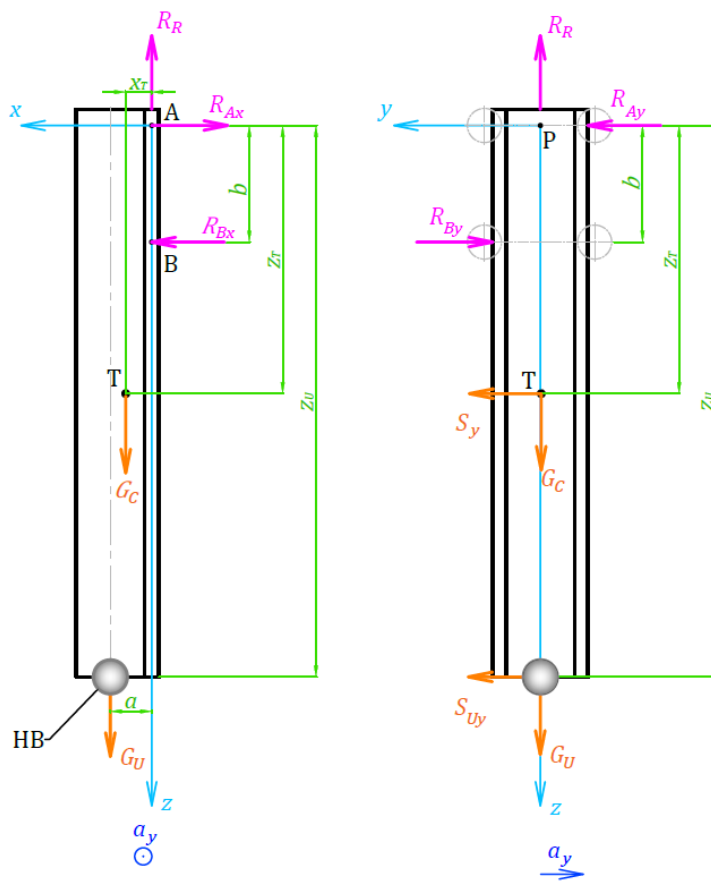
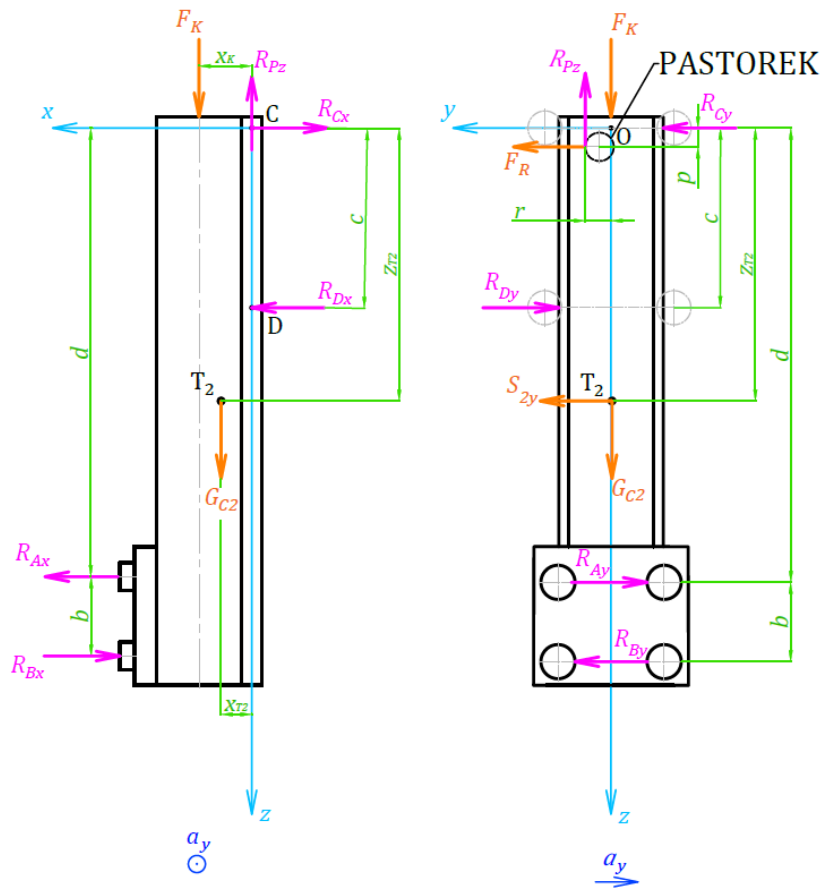


Schéma zatížení - pohyb ve směru Y

formation.

### 1.3.2.2 Přídavné zatížení vodících kladek od setrvačných účinků

Vlivem zrychlení ve směru Y vznikají setrvačné síly, jejichž nositelka neprochází posuvnou vazbou, a tím vzniká klopný moment. Tento klopný moment zachycují kladky v podobě axiálního zatížení.

#### Rameno dolní

$$\begin{aligned} \Sigma F_{ix} &= 0; & R_{ABLx} - R_{ABPx} &= 0 \\ (\Sigma F_{iy} &= 0; & S_y + S_{Uy} - R_{By} + R_{Ay} &= 0) \\ \Sigma M_{iZ} &= 0; & R_{ABLx} \cdot k + R_{ABPx} \cdot k - S_y \cdot x_T - S_{Uy} \cdot a &= 0 \end{aligned}$$

$$R_{ABLx} = R_{ABPx}$$

$$R_{ABLx} := \frac{S_y \cdot x_T + S_{Uy} \cdot a}{2 \cdot k} = 96.591 \text{ N}$$

$$R_{ABPx} := R_{ABLx} = 96.591 \text{ N}$$

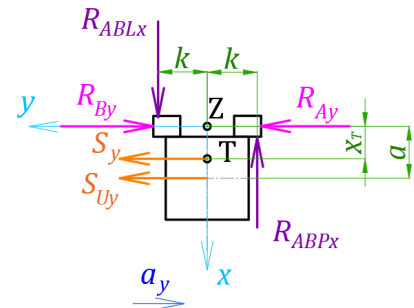


Schéma přídavného zatížení dolního ramena při zrychlení ve směru Y

#### Rameno horní

$$\begin{aligned} \Sigma F_{ix} &= 0; & R_{CDLx} - R_{CDPx} - R_{ABLx} + R_{ABPx} &= 0 \\ (\Sigma F_{iy} &= 0; & S_{2y} + F_R - R_{Dy} + R_{Cy} + R_{By} - R_{Ay} &= 0) \\ \Sigma M_{iZ} &= 0; & R_{CDLx} \cdot k_2 + R_{CDPx} \cdot k_2 - (R_{ABLx} + R_{ABPx}) \cdot k - S_{2y} \cdot x_{T2} + R_{Ay} \cdot x_R - R_{By} \cdot x_R &= 0 \end{aligned}$$

$$R_{CDPx} = R_{CDLx} \quad R_{ABLx} = R_{ABPx}$$

$$R_{CDLx} := \frac{S_{2y} \cdot x_{T2} + R_{By} \cdot x_R - R_{Ay} \cdot x_R + (R_{ABLx} + R_{ABPx}) \cdot k}{2 \cdot k_2} = 428.449 \text{ N}$$

$$R_{CDPx} := R_{CDLx} - R_{ABLx} + R_{ABPx} = 428.449 \text{ N}$$

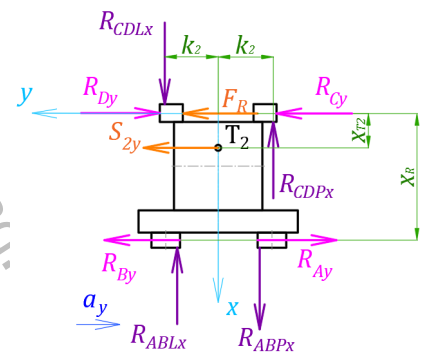


Schéma přídavného zatížení horního ramena při zrychlení ve směru Y

#### Zatížení jednotlivých vodících kladek

$$R_{ABLx} = 96.591 \text{ N} \quad R_{CDLx} = 428.449 \text{ N} \quad F_a - \text{Axiální síla na vodící kladku}$$

$$R_{ABPx} = 96.591 \text{ N} \quad R_{CDPx} = 428.449 \text{ N} \quad F_r - \text{Radiální síla na vodící kladku}$$

$$F_{aAL} := \frac{R_{Ax}}{2} - \frac{R_{ABLx}}{2} = -12.8 \text{ N}$$

$$F_{rAL} := 0 \text{ N}$$

$$F_{aAP} := \frac{R_{Ax}}{2} + \frac{R_{ABPx}}{2} = 83.791 \text{ N}$$

$$F_{rAP} := -R_{Ay} = -679.169 \text{ N}$$

$$F_{aBL} := -\frac{R_{Bx}}{2} - \frac{R_{ABLx}}{2} = -83.791 \text{ N}$$

$$F_{rBL} := R_{By} = 888.377 \text{ N}$$



$$F_{aBP} := -\frac{R_{Bx}}{2} + \frac{R_{ABPx}}{2} = 12.8 \text{ N}$$

$$F_{rBP} := 0 \text{ N}$$

$$F_{aCL} := \frac{R_{Cx}}{2} - \frac{R_{CDLx}}{2} = -87.428 \text{ N}$$

$$F_{rCL} := 0 \text{ N}$$

$$F_{aCP} := \frac{R_{Cx}}{2} + \frac{R_{CDPx}}{2} = 341.021 \text{ N}$$

$$F_{rCP} := -R_{Cy} = -870.235 \text{ N}$$

$$F_{aDL} := -\frac{R_{Dx}}{2} - \frac{R_{CDLx}}{2} = -341.021 \text{ N}$$

$$F_{rDL} := R_{Dy} = 1629.554 \text{ N}$$

$$F_{aDP} := -\frac{R_{Dx}}{2} + \frac{R_{CDPx}}{2} = 87.428 \text{ N}$$

$$F_{rDP} := 0 \text{ N}$$

### 1.3.2.3 Kontrola vodících kladek

Servisní koeficient zvolen  $f := 1.2$

$$C_{W15} := 3340 \text{ N} \quad C_{0W15} := 6800 \text{ N}$$

$C_W$  – Efektivní dyn. zatížení

$$C_{W20} := 4730 \text{ N} \quad C_{0W20} := 9500 \text{ N}$$

$C_{0W}$  – max. statická radiální síla

#### FR15

$$P_{BL} := |F_{rBL}| + 3 \cdot |F_{aBL}| = 1139.749 \text{ N}$$

$P$  – Ekvivalentní dynamické zatížení

$$P_{BLW} := f \cdot P_{BL} = 1367.698 \text{ N}$$

$P_W$  – Efektivní zatížení

$$L_{SBL} := \left( \frac{C_{W15}}{P_{BLW}} \right)^3 \cdot 10^7 = 1.456 \cdot 10^8 \text{ m}$$

$L_S$  – Nominální životnost

$f$  – Servisní koeficient

$f_S$  – Koeficient statického zatížení

$$f_{SBL} := 0.7 \cdot \frac{C_{0W15}}{f \cdot (|F_{rBL}| + 3 \cdot |F_{aBL}|)} = 3.48$$

$\geq 1 \Rightarrow$  **VYHOVUJE**

#### FR20

$$P_{DL} := |F_{rDL}| + 3 \cdot |F_{aDL}| = 2652.617 \text{ N}$$

$$P_{DLW} := f \cdot P_{DL} = 3183.14 \text{ N}$$

$$L_S := \left( \frac{C_{W20}}{P_{DLW}} \right)^3 \cdot 10^7 = 3.281 \cdot 10^7 \text{ m}$$

$$f_{SDL} := 0.7 \cdot \frac{C_{0W20}}{f \cdot (|F_{rDL}| + 3 \cdot |F_{aDL}|)} = 2.089$$

$\geq 1 \Rightarrow$  **VYHOVUJE**

### 1.3.2.4 Posuv ve směru Y - Castiglianova věta

#### Rameno dolní

**Pole I:**  $z_1 \in \langle 0; l \rangle$

$$M_I(z_1) = -S_{Uy} \cdot z_1$$

$$\frac{\partial M_I}{\partial S_{Uy}} = -z_1$$

$$v_{yI} := \frac{1}{E \cdot I_{x80}} \cdot \int_0^l (-S_{Uy} \cdot z_1) \cdot (-z_1) dz_1 = 0.061 \text{ mm}$$

**Pole II:**  $z_2 \in \langle 0; m \rangle$

$$M_{II}(z_2) = -S_{Uy} \cdot (l + z_2) - S_y \cdot z_2$$

$$\frac{\partial M_{II}}{\partial S_{Uy}} = (-l - z_2)$$

$$v_{yII} := \frac{1}{E \cdot I_{x80}} \cdot \int_0^m (-S_{Uy} \cdot (l + z_2) - S_y \cdot z_2) \cdot (-l - z_2) dz_2 = 0.188 \text{ mm}$$

**Pole III:**  $z_3 \in \langle 0; b \rangle$

$$M_{III}(z_3) = -S_{Uy} \cdot (l + m + z_3) - S_y \cdot (m + z_3) + R_{By} \cdot z_3$$

$$\frac{\partial M_{III}}{\partial S_{Uy}} = (-l - m - z_3)$$

$$v_{yIII} := \frac{1}{E \cdot I_{x80}} \cdot \int_0^b \begin{pmatrix} -S_{Uy} \cdot (l + m + z_3) \\ -S_y \cdot (m + z_3) + R_{By} \cdot z_3 \end{pmatrix} \cdot (-l - m - z_3) dz_3 = 0.106 \text{ mm}$$

#### Celkový posuv

$$v_y := v_{yI} + v_{yII} + v_{yIII} = 0.355 \text{ mm}$$

## Rameno horní

**Pole I:**  $z_1 \in \langle 0; g \rangle$

$$M_I(z_1) = -F_{fikt} \cdot z_1$$

$$\frac{\partial M_I}{\partial F_{fikt}} = -z_1$$

$$v_{2yI} := \frac{1}{E \cdot I_{x110}} \cdot \int_0^g (-F_{fikt} \cdot z_1) \cdot (-z_1) dz_1 = 0 \text{ mm}$$

**Pole II:**  $z_2 \in \langle 0; b \rangle$

$$M_{II}(z_2) = -F_{fikt} \cdot (g + z_2) - R_{By} \cdot z_2$$

$$\frac{\partial M_{II}}{\partial F_{fikt}} = (-g - z_2)$$

$$v_{2yII} := \frac{1}{E \cdot I_{x110}} \cdot \int_0^b (-F_{fikt} \cdot (g + z_2) - R_{By} \cdot z_2) \cdot (-g - z_2) dz_2 = 0.009 \text{ mm}$$

**Pole III:**  $z_3 \in \langle 0; t \rangle$

$$M_{III}(z_3) = -F_{fikt} \cdot (g + b + z_3) - R_{By} \cdot (b + z_3) + R_{Ay} \cdot z_3$$

$$\frac{\partial M_{III}}{\partial F_{fikt}} = (-g - b - z_3)$$

$$v_{2yIII} := \frac{1}{E \cdot I_{x110}} \cdot \int_0^t \left( \begin{array}{l} -F_{fikt} \cdot (g + b + z_3) \\ -R_{By} \cdot (b + z_3) + R_{Ay} \cdot z_3 \end{array} \right) \cdot (-g - b - z_3) dz_3 = 0.047 \text{ mm}$$

**Pole IV:**  $z_4 \in \langle 0; e \rangle$

$$M_{IV}(z_4) = -F_{fikt} \cdot (g + b + t + z_4) - R_{By} \cdot (b + t + z_4) \\ + R_{Ay} \cdot (t + z_4) - S_{2y} \cdot z_4$$

$$\frac{\partial M_{IV}}{\partial F_{fikt}} = (-g - b - t - z_4)$$

$$v_{2yIV} := \frac{1}{E \cdot I_{x110}} \cdot \int_0^e \left( \begin{array}{l} -F_{fikt} \cdot (g + b + t + z_4) \\ -R_{By} \cdot (b + t + z_4) \\ + R_{Ay} \cdot (t + z_4) - S_{2y} \cdot z_4 \end{array} \right) \cdot \left( \begin{array}{l} -g - b \\ -t - z_4 \end{array} \right) dz_4 = 0.174 \text{ mm}$$

**Pole V:**  $z_5 \in \langle 0; (c-p) \rangle$

$$M_V(z_5) = -F_{fikt} \cdot (g+b+t+e+z_5) - R_{By} \cdot (b+t+e+z_5) \downarrow \\ + R_{Ay} \cdot (t+e+z_5) - S_{2y} \cdot (e+z_5) + R_{Dy} \cdot z_5$$

$$\frac{\partial M_V}{\partial F_{fikt}} = (-g-b-t-e-z_5)$$

$$v_{2yV} := \frac{1}{E \cdot I_{x110}} \cdot \int_0^{(c-p)} \begin{pmatrix} -F_{fikt} \cdot (g+b+t+e+z_5) \downarrow \\ -R_{By} \cdot (b+t+e+z_5) \downarrow \\ +R_{Ay} \cdot (t+e+z_5) \downarrow \\ -S_{2y} \cdot (e+z_5) + R_{Dy} \cdot z_5 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} -g-b \downarrow \\ -t-e-z_5 \end{pmatrix} dz_5 = 0.118 \text{ mm}$$

**Pole VI:**  $z_6 \in \langle 0; p \rangle$

$$M_{VI}(z_6) = -F_{fikt} \cdot (g+b+t+e+c-p+z_6) \downarrow \\ - R_{By} \cdot (b+t+e+c-p+z_6) \downarrow \\ + R_{Ay} \cdot (t+e+c-p+z_6) - S_{2y} \cdot (e+c-p+z_6) \downarrow \\ + R_{Dy} \cdot (c-p+z_6) - M_{RPz} - F_R \cdot z_6$$

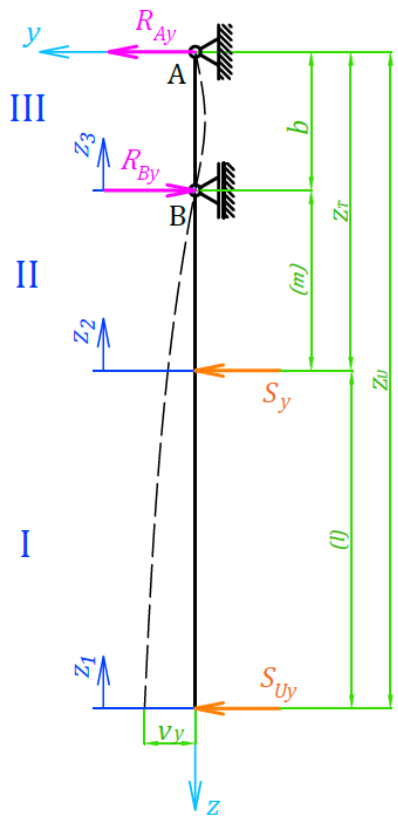
$$M_{RPz} := R_{Pz} \cdot r = 35112.082 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

$$\frac{\partial M_{VI}}{\partial F_{fikt}} = (-g-b-t-e-c+p-z_6)$$

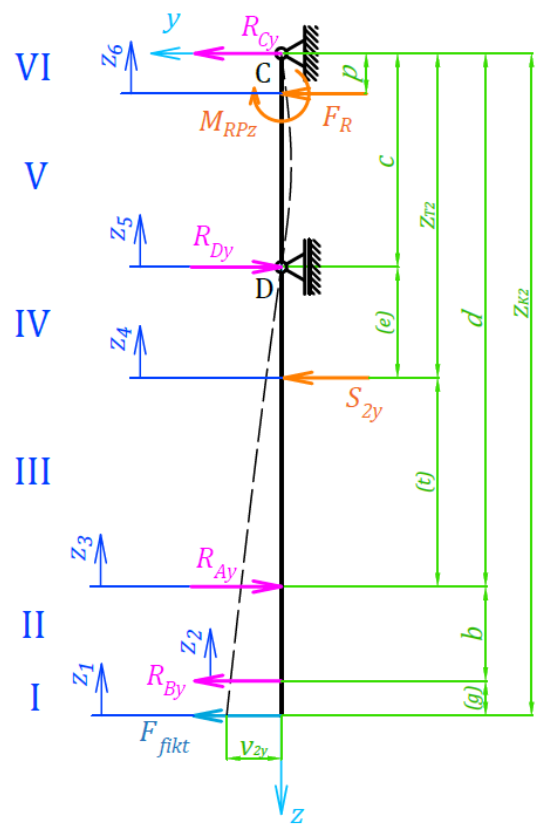
$$v_{2yVI} := \frac{1}{E \cdot I_{x110}} \cdot \int_0^p \begin{pmatrix} -F_{fikt} \cdot (g+b+t+e+c \downarrow) \downarrow \\ -R_{By} \cdot (b+t+e+c \downarrow) \downarrow \\ +R_{Ay} \cdot (t+e+c-p+z_6) \downarrow \\ -S_{2y} \cdot (e+c-p+z_6) \downarrow \\ +R_{Dy} \cdot (c-p+z_6) - M_{RPz} \downarrow \\ -F_R \cdot z_6 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} -g-b \downarrow \\ -t \downarrow \\ -e-c \downarrow \\ +p \downarrow \\ -z_6 \end{pmatrix} dz_6 = (4.425 \cdot 10^{-5}) \text{ mm}$$

**Celkový posuv**

$$v_{2y} := v_{2yI} + v_{2yII} + v_{2yIII} + v_{2yIV} + v_{2yV} + v_{2yVI} = 0.348 \text{ mm}$$



Dolní rameno



Horní rameno

Schéma pro výpočet posuvů v Y - pohyb ve směru Y

www.mathcad.com for more information.

### 1.3.3 Pohyb ve směru Z

#### 1.3.3.1 Reakční účinky

##### Rameno dolní

$$\begin{aligned}\Sigma F_{ix} &= 0; & R_{Bx} - R_{Ax} &= 0 \\ \Sigma F_{iz} &= 0; & G_U + S_{Uz} + S_z + G_c - R_R &= 0 \\ \Sigma M_{iA} &= 0; & G_U \cdot a + S_{Uz} \cdot a + G_c \cdot x_T + S_z \cdot x_T - R_{Bx} \cdot b &= 0\end{aligned}$$

$$R_{Bx} := \frac{G_U \cdot a + S_{Uz} \cdot a + G_c \cdot x_T + S_z \cdot x_T}{b} = 143.38 \text{ N}$$

$$R_{Ax} := R_{Bx} = 143.38 \text{ N}$$

$$R_R := G_U + S_{Uz} + S_z + G_c = 753.403 \text{ N}$$

$$\text{Síla od kladky} \quad F_K := G_K + 2 \cdot R_R = 1555.115 \text{ N}$$

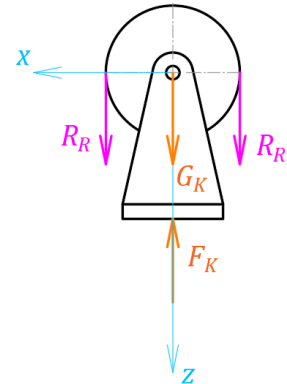


Schéma zatížení kladky

##### Rameno horní

$$\begin{aligned}\Sigma F_{ix} &= 0; & R_{Dx} - R_{Cx} - R_{Bx} + R_{Ax} &= 0 \\ \Sigma F_{iy} &= 0; & F_R - R_{Cy} - R_{Dy} &= 0 \\ \Sigma F_{iz} &= 0; & F_K - R_{Pz} + G_{c2} + S_{2z} &= 0 \\ \Sigma M_{iC} &= 0; & F_K \cdot x_K - R_{Dx} \cdot c + G_{c2} \cdot x_{T2} + S_{2z} \cdot x_{T2} - R_{Ax} \cdot d + R_{Bx} \cdot (b + d) &= 0 \\ \Sigma M_{iO} &= 0; & R_{Dy} \cdot c - R_{Pz} \cdot r - F_R \cdot p &= 0\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Síly v ozubení} \quad & F_o = R_{Pz} & \alpha &:= 20^\circ & \text{Úhel záběru} \\ & F_R = F_o \cdot \tan(\alpha)\end{aligned}$$

$$R_{Dx} := \frac{F_K \cdot x_K + G_{c2} \cdot x_{T2} + S_{2z} \cdot x_{T2} - R_{Ax} \cdot d + R_{Bx} \cdot (b + d)}{c} = 476.45 \text{ N}$$

$$R_{Cx} := R_{Dx} - R_{Bx} + R_{Ax} = 476.45 \text{ N}$$

$$R_{Pz} := F_K + G_{c2} + S_{2z} = 1981.205 \text{ N}$$

$$F_o := R_{Pz} = 1981.205 \text{ N}$$

$$F_R := F_o \cdot \tan(\alpha) = 721.1 \text{ N}$$

$$R_{Dy} := \frac{R_{Pz} \cdot r + F_R \cdot p}{c} = 218.176 \text{ N}$$

$$R_{Cy} := F_R - R_{Dy} = 502.924 \text{ N}$$

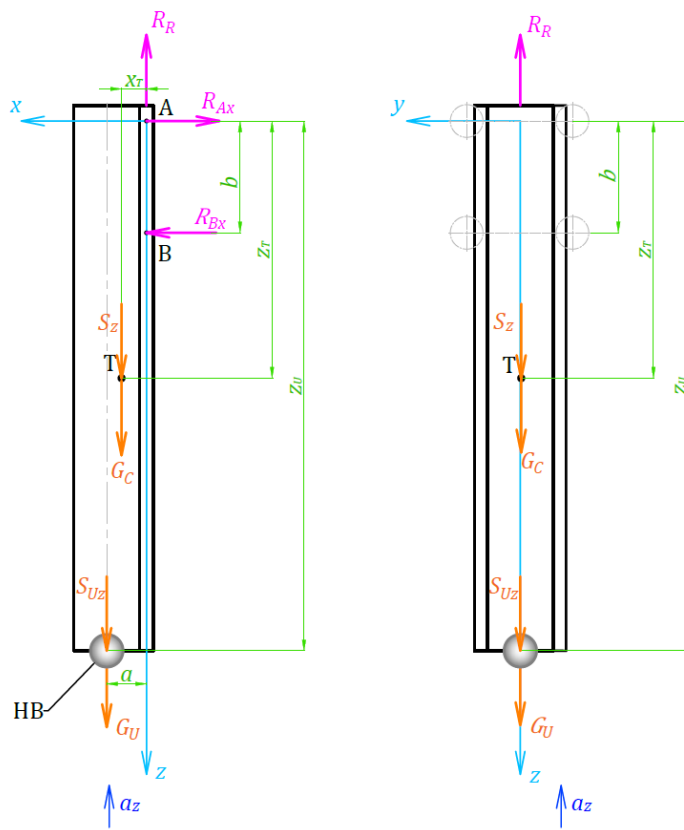
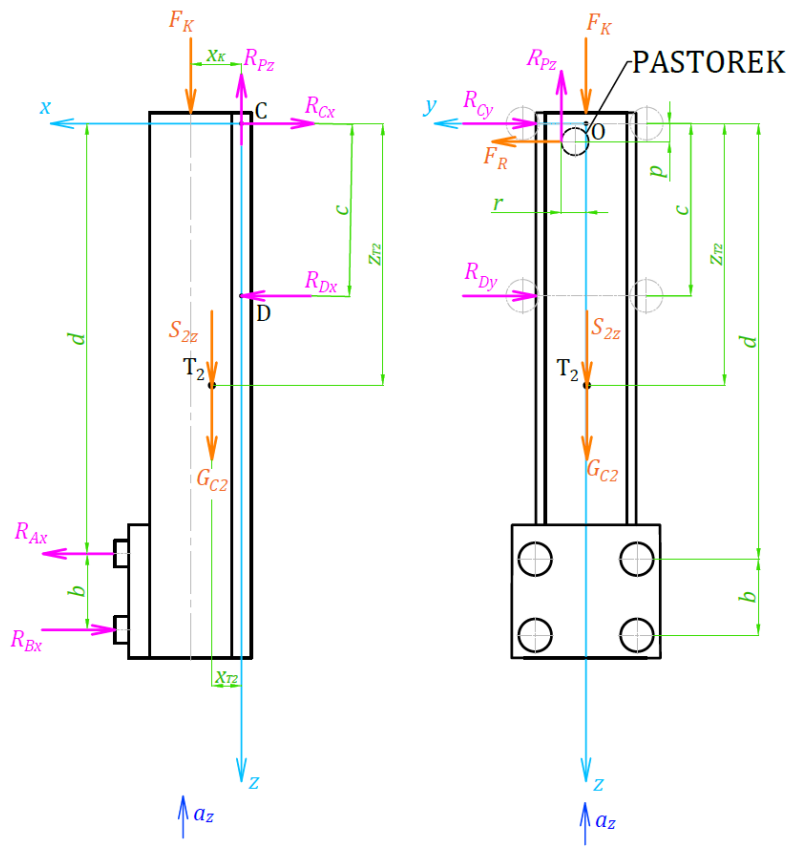


Schéma zatížení - pohyb ve směru Z

### 1.3.4 Pohyb ve směru X+Y+Z

#### 1.3.4.1 Reakční účinky

##### Rameno dolní

$$\begin{aligned} \Sigma F_{ix} &= 0; & R_{Bx} - R_{Ax} - S_x - S_{Ux} &= 0 \\ \Sigma F_{iy} &= 0; & S_y + S_{Uy} - R_{By} + R_{Ay} &= 0 \\ \Sigma F_{iz} &= 0; & G_U + S_{Uz} + S_z + G_c - R_R &= 0 \\ \Sigma M_{iA} &= 0; & G_U \cdot a + S_{Uz} \cdot a + S_{Ux} \cdot z_U + G_c \cdot x_T + S_z \cdot x_T + S_x \cdot z_T - R_{Bx} \cdot b &= 0 \\ \Sigma M_{iP} &= 0; & R_{By} \cdot b - S_{Uy} \cdot z_U - S_y \cdot z_T &= 0 \end{aligned}$$

$$R_{Bx} := \frac{G_U \cdot a + S_{Uz} \cdot a + S_{Ux} \cdot z_U + G_c \cdot x_T + S_z \cdot x_T + S_x \cdot z_T}{b} = 466.426 \text{ N}$$

$$R_{Ax} := R_{Bx} - S_{Ux} - S_x = 390.35 \text{ N}$$

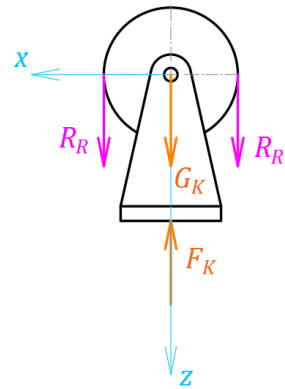
$$R_R := G_U + S_{Uz} + S_z + G_c = 753.403 \text{ N}$$

$$R_{Rstat} := G_U + G_c = 373.024 \text{ N}$$

$$R_{Rdyn} := S_{Uz} + S_z = 380.379 \text{ N}$$

$$R_{By} := \frac{S_{Uy} \cdot z_U + S_y \cdot z_T}{b} = 888.377 \text{ N}$$

$$R_{Ay} := R_{By} - S_y - S_{Uy} = 679.169 \text{ N}$$



$$\text{Síla od kladky} \quad F_K := G_K + 2 \cdot R_R = 1555.115 \text{ N}$$

Schéma zatížení kladky

##### Rameno horní

$$\begin{aligned} \Sigma F_{ix} &= 0; & R_{Dx} - R_{Cx} - R_{Bx} + R_{Ax} - S_{2x} &= 0 \\ \Sigma F_{iy} &= 0; & F_R + R_{Cy} - R_{Dy} + S_{2y} + R_{By} - R_{Ay} &= 0 \\ \Sigma F_{iz} &= 0; & F_K - R_{Pz} + G_{c2} + S_{2z} &= 0 \\ \Sigma M_{iC} &= 0; & F_K \cdot x_K - R_{Dx} \cdot c + G_{c2} \cdot x_{T2} + S_{2z} \cdot x_{T2} - R_{Ax} \cdot d + R_{Bx} \cdot (b+d) &= 0 \\ \Sigma M_{iO} &= 0; & R_{Dy} \cdot c - R_{Pz} \cdot r - F_R \cdot p - S_{2y} \cdot z_{T2} - R_{By} \cdot (b+d) + R_{Ay} \cdot d &= 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Síly v ozubení} \quad & F_o = R_{Pz} & \alpha &:= 20^\circ & \text{Úhel záběru} \\ & F_R = F_o \cdot \tan(\alpha) & & & \end{aligned}$$

$$R_{Dx} := \frac{F_K \cdot x_K + G_{c2} \cdot x_{T2} + S_{2z} \cdot x_{T2} - R_{Ax} \cdot d + R_{Bx} \cdot (b+d)}{c} = 904.499 \text{ N}$$



$$R_{Cx} := R_{Dx} - R_{Bx} + R_{Ax} = 828.423 \text{ N}$$

$$R_{Pz} := F_K + G_{c2} + S_{2z} = 1981.205 \text{ N}$$

$$F_o := R_{Pz} = (1.981 \cdot 10^3) \text{ N}$$

$$F_R := F_o \cdot \tan(\alpha) = 721.1 \text{ N}$$

$$R_{Dy} := \frac{R_{Pz} \cdot r + F_R \cdot p + S_{2y} \cdot z_{T2} + R_{By} \cdot (b + d) - R_{Ay} \cdot d}{c} = 1729.176 \text{ N}$$

$$R_{Cy} := R_{Dy} - F_R - S_{2y} - R_{By} + R_{Ay} = 640.594 \text{ N}$$

### 1.3.4.2 Přídavné zatížení vodících kladek od setrvačných účinků

#### Rameno dolní

$$\Sigma F_{ix} = 0;$$

$$R_{ABLx} - R_{ABPx} = 0$$

$$(\Sigma F_{iy} = 0;$$

$$S_y + S_{Uy} - R_{By} + R_{Ay} = 0)$$

$$\Sigma M_{iZ} = 0;$$

$$R_{ABLx} \cdot k + R_{ABPx} \cdot k - S_y \cdot x_T - S_{Uy} \cdot a = 0$$

$$R_{ABLx} = R_{ABPx}$$

$$R_{ABLx} := \frac{S_y \cdot x_T + S_{Uy} \cdot a}{2 \cdot k} = 96.591 \text{ N}$$

$$R_{ABPx} := R_{ABLx} = 96.591 \text{ N}$$

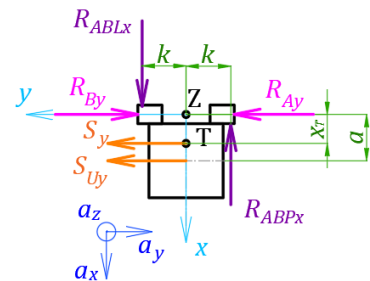


Schéma přídavného zatížení dolního ramena při zrychlení ve směru X+Y+Z

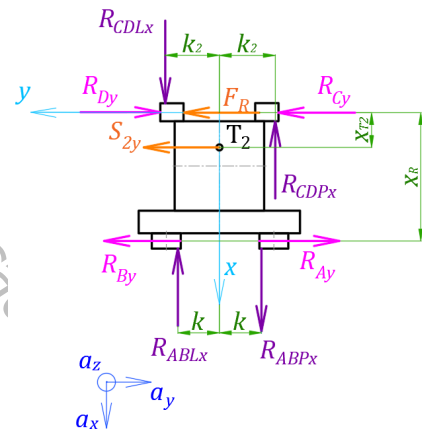


Schéma přídavného zatížení horního ramena při zrychlení ve směru X+Y+Z

#### Rameno horní

$$\Sigma F_{ix} = 0;$$

$$R_{CDLx} - R_{CDPx} - R_{ABLx} + R_{ABPx} = 0$$

$$(\Sigma F_{iy} = 0;$$

$$S_{2y} + F_R - R_{Dy} + R_{Cy} + R_{By} - R_{Ay} = 0)$$

$$\Sigma M_{iZ} = 0;$$

$$R_{CDLx} \cdot k_2 + R_{CDPx} \cdot k_2 - R_{ABLx} \cdot k - R_{ABPx} \cdot k - S_{2y} \cdot x_{T2} + R_{Ay} \cdot x_R - R_{By} \cdot x_R = 0$$

$$R_{CDLx} = R_{CDPx}$$

$$R_{CDLx} := \frac{R_{ABLx} \cdot k + R_{ABPx} \cdot k + S_{2y} \cdot x_{T2} + R_{By} \cdot x_R - R_{Ay} \cdot x_R}{2 \cdot k_2} = 428.449 \text{ N}$$

$$R_{CDPx} := R_{CDLx} = 428.449 \text{ N}$$

Created with

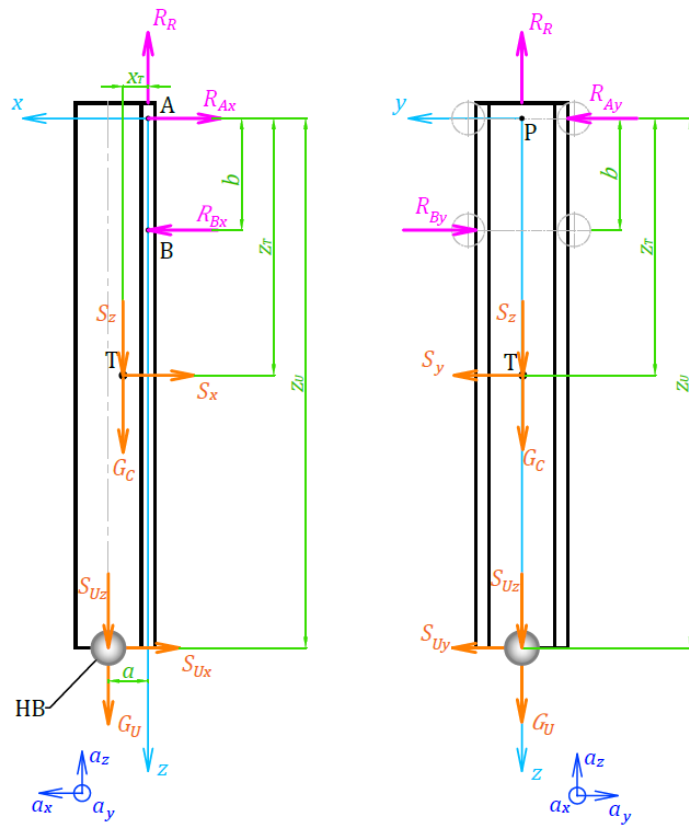
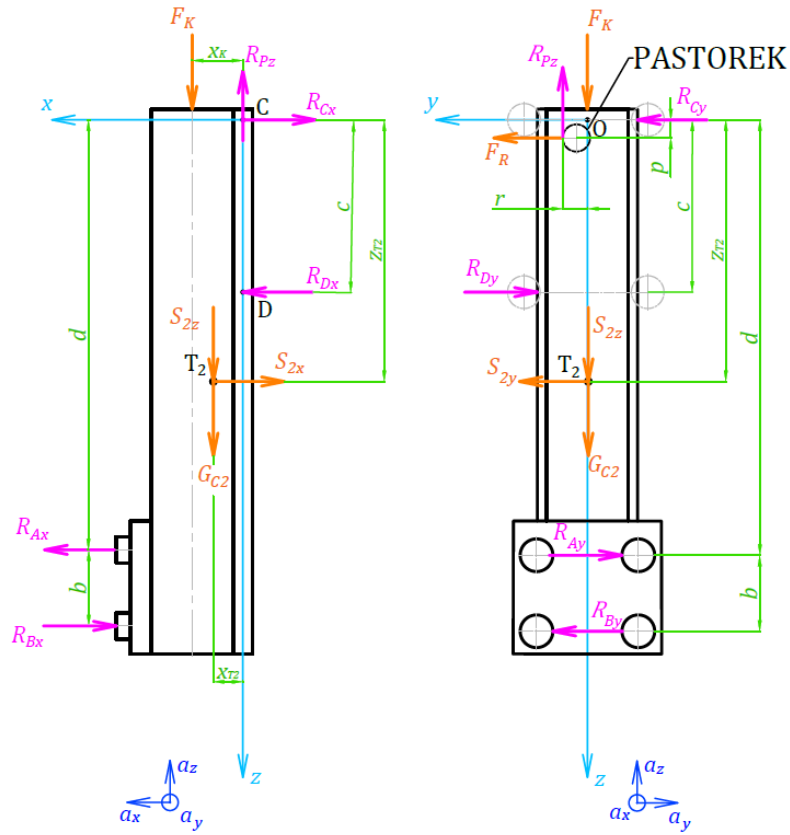


Schéma zatížení - pohyb ve směru X+Y+Z

information.

### Zatížení jednotlivých vodících kladek - osa Z

$$\begin{aligned} R_{ABLx} &= 96.591 \text{ N} & R_{CDLx} &= 428.449 \text{ N} & F_a &- \text{Axiální síla na vodící kladku} \\ R_{ABPx} &= 96.591 \text{ N} & R_{CDPx} &= 428.449 \text{ N} & F_r &- \text{Radiální síla na vodící kladku} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{aAL} &:= \frac{R_{Ax}}{2} - \frac{R_{ABLx}}{2} = 146.88 \text{ N} & F_{rAL} &:= 0 \text{ N} \\ F_{aAP} &:= \frac{R_{Ax}}{2} + \frac{R_{ABPx}}{2} = 243.471 \text{ N} & F_{rAP} &:= -R_{Ay} = -679.169 \text{ N} \\ F_{aBL} &:= -\frac{R_{Bx}}{2} - \frac{R_{ABLx}}{2} = -281.508 \text{ N} & F_{rBL} &:= R_{By} = 888.377 \text{ N} \\ F_{aBP} &:= -\frac{R_{Bx}}{2} + \frac{R_{ABPx}}{2} = -184.917 \text{ N} & F_{rBP} &:= 0 \text{ N} \\ F_{aCL} &:= \frac{R_{Cx}}{2} - \frac{R_{CDLx}}{2} = 199.987 \text{ N} & F_{rCL} &:= 0 \text{ N} \\ F_{aCP} &:= \frac{R_{Cx}}{2} + \frac{R_{CDPx}}{2} = 628.436 \text{ N} & F_{rCP} &:= -R_{Cy} = -640.594 \text{ N} \\ F_{aDL} &:= -\frac{R_{Dx}}{2} - \frac{R_{CDLx}}{2} = -666.474 \text{ N} & F_{rDL} &:= R_{Dy} = 1729.176 \text{ N} \\ F_{aDP} &:= -\frac{R_{Dx}}{2} + \frac{R_{CDPx}}{2} = -238.025 \text{ N} & F_{rDP} &:= 0 \text{ N} \end{aligned}$$

#### 1.3.4.3 Reakční účinky - Pojezd

Pomocí hmotnostní analýzy byl pojezd nahrazen hmotným bodem, který v sobě zahrnuje hlavní části, jako motory s převodovkami, držák příslušenství, vodící kladky a základní desku.

Rozměrové parametry

$$h := 188.7 \text{ mm}$$

$$h_2 := 251.3 \text{ mm}$$

$$j := 284.2 \text{ mm}$$

$$p = 6 \text{ mm}$$

$$r_k := 28.8 \text{ mm}$$

$$r_p := 53.685 \text{ mm}$$

$$r_{p2} := 155.585 \text{ mm}$$

$$s := 130.2 \text{ mm}$$

$$x_{Tp} := 37.6 \text{ mm}$$

$$y_{Tp} := 2.36 \text{ mm}$$

$$z_{Tp} := 22.6 \text{ mm}$$

$$w := 30.5 \text{ mm}$$

Hmotnost pojazdu

$$m_p := 59.979 \text{ kg}$$

### Zatížení od hmotnosti

$$G_p := m_p \cdot g = 588.193 \text{ N}$$

### Setrvačné účinky

$$S_{px} := m_p \cdot a_x = 119.958 \text{ N}$$

$$S_{py} := m_p \cdot a_y = 329.885 \text{ N}$$

### Reakce

$$\Sigma F_{ixXZ} = 0; \quad |F_{aCL}| + |F_{aCP}| - (|F_{aDL}| + |F_{aDP}|) + R_{EFD} - R_{EFH} - S_{px} = 0$$

$$\Sigma F_{izXZ} = 0; \quad R_{Pz} + G_p + R_{Ez} - R_{Fz} = 0$$

$$\Sigma M_{iy} = 0; \quad (R_{Pz} - R_{Ez} + R_{Fz}) \cdot w - G_p \cdot x_{Tp} + S_{px} \cdot z_{Tp} - R_{EFD} \cdot j \downarrow + R_{EFH} \cdot s + (|F_{aDL}| + |F_{aDP}|) \cdot c = 0$$

$$\Sigma F_{iyYZ} = 0; \quad -R_{Py} - F_R + S_{py} - |F_{rCP}| + |F_{rDL}| = 0$$

$$(\Sigma F_{izYZ} = 0; \quad R_{Pz} + G_p + R_{Ez} - R_{Fz} = 0)$$

$$\Sigma M_{ix} = 0; \quad R_{Py} \cdot r_{p2} + R_{Ez} \cdot h + R_{Fz} \cdot h_2 + F_R \cdot p - S_{py} \cdot z_{Tp} \downarrow - G_p \cdot y_{Tp} - |F_{rDL}| \cdot c - R_{Pz} \cdot r_p = 0$$

$$\Sigma F_{ixXY} = 0; \quad (|F_{aCL}| - |F_{aDL}|) + (|F_{aCP}| - |F_{aDP}|) - R_{Ex} - R_{Fx} - S_{px} = 0$$

$$(\Sigma F_{iyXY} = 0; \quad -R_{Py} - F_R + S_{py} - |F_{rCP}| + |F_{rDL}| = 0)$$

$$\Sigma M_{iz} = 0; \quad (|F_{rCP}| - |F_{rDL}| - R_{Py} + F_R) \cdot w + S_{py} \cdot x_{Tp} + S_{px} \cdot y_{Tp} - R_{Ex} \cdot h \downarrow + R_{Fx} \cdot h_2 - (|F_{aCL}| - |F_{aDL}|) \cdot r_k - (|F_{aCP}| - |F_{aDP}|) \cdot (r_k + 2 \cdot k_2) = 0$$

$$R_{Fz} = R_{Pz} + G_p + R_{Ez}$$

$$R_{Py} := -F_R + S_{py} - |F_{rCP}| + |F_{rDL}| = 697.366 \text{ N}$$

$$R_{Py} \cdot r_{p2} + R_{Ez} \cdot h + R_{Fz} \cdot h_2 + (R_{Pz} + G_p) \cdot h_2 + F_R \cdot p \downarrow - S_{py} \cdot z_{Tp} - G_p \cdot y_{Tp} - |F_{rDL}| \cdot c - R_{Pz} \cdot r_p = 0$$

$$R_{Ez} := \frac{-(R_{Py} \cdot r_{p2}) - (R_{Pz} + G_p) \cdot h_2 - F_R \cdot p \downarrow + S_{py} \cdot z_{Tp} + G_p \cdot y_{Tp} + |F_{rDL}| \cdot c + R_{Pz} \cdot r_p}{h + h_2} = -220.209 \text{ N}$$

$$R_{Fz} := R_{Pz} + G_p + R_{Ez} = 2349.189 \text{ N}$$

$$R_{Fx} = (|F_{aCL}| - |F_{aDL}|) + (|F_{aCP}| - |F_{aDP}|) - R_{Ex} - S_{px}$$

$$\begin{aligned}
& (|F_{rCP}| - |F_{rDL}| - R_{Py} + F_R) \cdot w + S_{py} \cdot x_{Tp} + S_{px} \cdot y_{Tp} - R_{Ex} \cdot h \downarrow = 0 \\
& + ((|F_{aCL}| - |F_{aDL}|) + (|F_{aCP}| - |F_{aDP}|) - S_{px}) \cdot h_2 - R_{Ex} \cdot h_2 \downarrow \\
& - (|F_{aCL}| - |F_{aDL}|) \cdot r_k - (|F_{aCP}| - |F_{aDP}|) \cdot (r_k + 2 \cdot k_2) \\
R_{Ex} := & \frac{(|F_{rCP}| - |F_{rDL}| - R_{Py} + F_R) \cdot w + S_{py} \cdot x_{Tp} + S_{px} \cdot y_{Tp} \downarrow \\
& + ((|F_{aCL}| - |F_{aDL}|) + (|F_{aCP}| - |F_{aDP}|) - S_{px}) \cdot h_2 \downarrow \\
& - (|F_{aCL}| - |F_{aDL}|) \cdot r_k - (|F_{aCP}| - |F_{aDP}|) \cdot (r_k + 2 \cdot k_2)}{h + h_2} = -254.002 \text{ N}
\end{aligned}$$

$$R_{Fx} := (|F_{aCL}| - |F_{aDL}|) + (|F_{aCP}| - |F_{aDP}|) - R_{Ex} - S_{px} = 57.968 \text{ N}$$

$$\begin{aligned}
R_{EFD} = & -|F_{aCL}| - |F_{aCP}| + (|F_{aDL}| + |F_{aDP}|) + R_{EFH} + S_{px} \\
(R_{Pz} - R_{Ez} + R_{Fz}) \cdot w - G_p \cdot x_{Tp} + S_{px} \cdot z_{Tp} \downarrow & = 0 \\
- ( -|F_{aCL}| - |F_{aCP}| + (|F_{aDL}| + |F_{aDP}|) + S_{px}) \cdot j - R_{EFH} \cdot j \downarrow & \\
+ R_{EFH} \cdot s + (|F_{aDL}| + |F_{aDP}|) \cdot c & \\
R_{EFH} := & \frac{(R_{Pz} - R_{Ez} + R_{Fz}) \cdot w - G_p \cdot x_{Tp} + S_{px} \cdot z_{Tp} \downarrow \\
& - ( -|F_{aCL}| - |F_{aCP}| + (|F_{aDL}| + |F_{aDP}|) + S_{px}) \cdot j \downarrow \\
& + (|F_{aDL}| + |F_{aDP}|) \cdot c}{j - s} = 2269.463 \text{ N}
\end{aligned}$$

$$R_{EFD} := -|F_{aCL}| - |F_{aCP}| + (|F_{aDL}| + |F_{aDP}|) + R_{EFH} + S_{px} = 2465.496 \text{ N}$$

### Zatížení jednotlivých vodících kladek - pojezd

$$\begin{array}{lll}
R_{Ex} = -254.002 \text{ N} & R_{EFH} = 2269.463 \text{ N} & F_a - \text{Axiální síla na vodící kladku} \\
R_{Fx} = 57.968 \text{ N} & R_{EFD} = 2465.496 \text{ N} & F_r - \text{Radiální síla na vodící kladku}
\end{array}$$

$$F_{aEH} := -\frac{R_{Ex}}{2} - \frac{R_{EFH}}{2} = -1007.73 \text{ N} \quad F_{rEH} := R_{Ez} = -220.209 \text{ N}$$

$$F_{aED} := -\frac{R_{Ex}}{2} + \frac{R_{EFD}}{2} = 1359.749 \text{ N} \quad F_{rED} := 0 \text{ N}$$

$$F_{aFH} := -\frac{R_{Fx}}{2} - \frac{R_{EFH}}{2} = -1163.715 \text{ N} \quad F_{rFH} := -R_{Fz} = -2349.189 \text{ N}$$

$$F_{aFD} := -\frac{R_{Fx}}{2} + \frac{R_{EFD}}{2} = 1203.764 \text{ N} \quad F_{rFD} := 0 \text{ N}$$

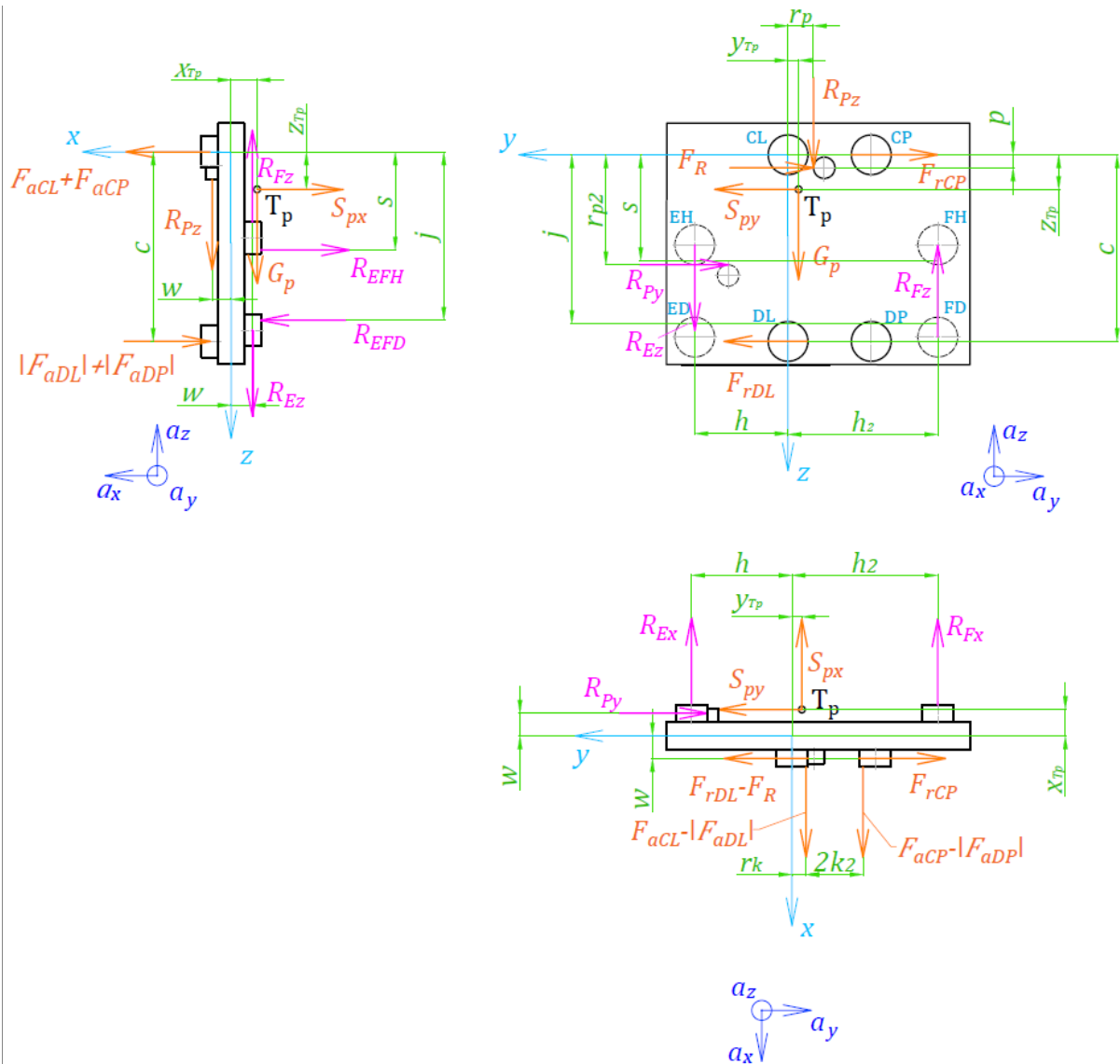


Schéma zatížení - pojezd - pohyb ve směru X+Y+Z

### 1.3.4.4 Kontrola vodících kladek

Servisní koeficient zvolen  $f := 1.2$

$$C_{W15} := 3340 \text{ N} \quad C_{0W15} := 6800 \text{ N}$$

$$C_{W20} := 4730 \text{ N} \quad C_{0W20} := 9500 \text{ N}$$

$C_W$  – Efektivní dyn. zatížení

$C_{0W}$  – max. statická radiální síla

#### FR15

$$P_{BL} := |F_{rBL}| + 3 \cdot |F_{aBL}| = 1732.902 \text{ N}$$

$$P_{BLW} := f \cdot P_{BL} = 2079.483 \text{ N}$$

$$L_{SBL} := \left( \frac{C_{W15}}{P_{BLW}} \right)^3 \cdot 10^7 = 4.144 \cdot 10^7 \text{ m}$$

$P$  – Ekvivalentní dynamické zatížení

$P_W$  – Efektivní zatížení

$L_S$  – Nominální životnost

$f$  – Servisní koeficient

$f_S$  – Koeficient statického zatížení

$$f_{SBL} := 0.7 \cdot \frac{C_{0W15}}{f \cdot (|F_{rBL}| + 3 \cdot |F_{aBL}|)} = 2.289 \quad \boxed{\geq 1 \Rightarrow \text{VYHOVUJE}}$$

### FR20 - osa Z

$$P_{DL} := |F_{rDL}| + 3 \cdot |F_{aDL}| = 3728.597 \text{ N}$$

$$P_{DLW} := f \cdot P_{DL} = 4474.317 \text{ N}$$

$$L_S := \left( \frac{C_{W20}}{P_{DLW}} \right)^3 \cdot 10^7 = 1.181 \cdot 10^7 \text{ m}$$

$$f_{SDL} := 0.7 \cdot \frac{C_{0W20}}{f \cdot (|F_{rDL}| + 3 \cdot |F_{aDL}|)} = 1.486 \quad \boxed{\geq 1 \Rightarrow \text{VYHOVUJE}}$$

### FR20 - pojezd

$$P_{FH} := |F_{rFH}| + 3 \cdot |F_{aFH}| = 5840.335 \text{ N}$$

$$P_{FHW} := f \cdot P_{FH} = 7008.402 \text{ N}$$

$$L_S := \left( \frac{C_{W20}}{P_{FHW}} \right)^3 \cdot 10^7 = 3.074 \cdot 10^6 \text{ m}$$

$$f_{SFH} := 0.7 \cdot \frac{C_{0W20}}{f \cdot (|F_{rFH}| + 3 \cdot |F_{aFH}|)} = 0.949 \quad \boxed{< 1 \Rightarrow \text{NEVYHOVUJE}}$$

#### 1.3.4.5 Omezení zrychlení

Z důvodu příliš vysokého zatížení vodící kladky pojezdu FH je třeba omezit zrychlení. Tím dojde ke snížení setrvačných sil => reakcí pojezdu.

#### Zrychlení původní

$$a_x = 2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$a_y = 5.5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$a_z = 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

#### Podíl zrychlení

$$p_{ax} := 100\%$$

$$p_{ay} := 100\%$$

$$p_{az} := 35\%$$

#### Zrychlení omezené

$$a_{xo} := p_{ax} \cdot a_x = 2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$a_{yo} := p_{ay} \cdot a_y = 5.5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$a_{zo} := p_{az} \cdot a_z = 3.5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

## Omezené setrvačné účinky

Omez. zrychlení ve směru Z horního ramena

$$a_{z2o} := \frac{a_{zo}}{2} = 1.75 \frac{m}{s^2}$$

### Setrvačné síly od $a_{xo}$

- Na dolní rameno
- Na horní rameno
- Na HB

$$S_x := m_c \cdot a_{xo} = 25.09 \text{ N}$$

$$S_{2x} := m_{c2} \cdot a_{xo} = 57.554 \text{ N}$$

$$S_{Ux} := m_U \cdot a_{xo} = 50.986 \text{ N}$$

### Setrvačné síly od $a_{yo}$

- Na dolní rameno
- Na horní rameno
- Na HB

$$S_y := m_c \cdot a_{yo} = 68.998 \text{ N}$$

$$S_{2y} := m_{c2} \cdot a_{yo} = 158.274 \text{ N}$$

$$S_{Uy} := m_U \cdot a_{yo} = 140.211 \text{ N}$$

### Setrvačné síly od $a_{zo}$

- Na dolní rameno
- Na horní rameno
- Na HB

$$S_z := m_c \cdot a_{zo} = 43.908 \text{ N}$$

$$S_{2z} := m_{c2} \cdot a_{zo} = 50.36 \text{ N}$$

$$S_{Uz} := m_U \cdot a_{zo} = 89.225 \text{ N}$$

## Reakční účinky - omezené

Vztahy pro určení reakcí převzaty z výše uvedeného výpočtu reakčních účinků pro pohyb ve směru X+Y+Z.

### Rameno dolní

$$R_{Bx} := \frac{G_U \cdot a + S_{Uz} \cdot a + S_{Ux} \cdot z_U + G_c \cdot x_T + S_z \cdot x_T + S_x \cdot z_T}{b} = 419.373 \text{ N}$$

$$R_{Ax} := R_{Bx} - S_{Ux} - S_x = 343.297 \text{ N}$$

$$R_R := G_U + S_{Uz} + S_z + G_c = 506.157 \text{ N}$$

$$R_{Rstat} := G_U + G_c = 373.024 \text{ N}$$

$$R_{Rdym} := S_{Uz} + S_z = 133.133 \text{ N}$$

$$R_{By} := \frac{S_{Uy} \cdot z_U + S_y \cdot z_T}{b} = 888.377 \text{ N}$$

$$R_{Ay} := R_{By} - S_y - S_{Uy} = 679.169 \text{ N}$$



Síla od kladky  $F_K := G_K + 2 \cdot R_R = 1060.622 \text{ N}$

### Rameno horní

$$R_{Dx} := \frac{F_K \cdot x_K + G_{c2} \cdot x_{T2} + S_{2z} \cdot x_{T2} - R_{Ax} \cdot d + R_{Bx} \cdot (b + d)}{c} = 759.641 \text{ N}$$

$$R_{Cx} := R_{Dx} - R_{Bx} + R_{Ax} = 683.566 \text{ N}$$

$$R_{Pz} := F_K + G_{c2} + S_{2z} = 1393.187 \text{ N}$$

$$F_o := R_{Pz} = (1.393 \cdot 10^3) \text{ N}$$

$$F_R := F_o \cdot \tan(\alpha) = 507.079 \text{ N}$$

$$R_{Dy} := \frac{R_{Pz} \cdot r + F_R \cdot p + S_{2y} \cdot z_{T2} + R_{By} \cdot (b + d) - R_{Ay} \cdot d}{c} = 1664.422 \text{ N}$$

$$R_{Cy} := R_{Dy} - F_R - S_{2y} - R_{By} + R_{Ay} = 789.861 \text{ N}$$

### Přídavné zatížení od setrvačných účinků

#### Rameno dolní

$$R_{ABLx} := \frac{S_y \cdot x_T + S_{Uy} \cdot a}{2 \cdot k} = 96.591 \text{ N}$$

$$R_{ABPx} := R_{ABLx} = 96.591 \text{ N}$$

#### Rameno horní

$$R_{CDLx} := \frac{R_{ABLx} \cdot k + R_{ABPx} \cdot k + S_{2y} \cdot x_{T2} + R_{By} \cdot x_R - R_{Ay} \cdot x_R}{2 \cdot k_2} = 428.449 \text{ N}$$

$$R_{CDPx} := R_{CDLx} = 428.449 \text{ N}$$

## Zatížení jednotlivých vodičích kladek - osa Z

$$\begin{aligned}
 F_{aAL} &:= \frac{R_{Ax}}{2} - \frac{R_{ABLx}}{2} = 123.353 \text{ N} & F_{rAL} &:= 0 \text{ N} \\
 F_{aAP} &:= \frac{R_{Ax}}{2} + \frac{R_{ABPx}}{2} = 219.944 \text{ N} & F_{rAP} &:= -R_{Ay} = -679.169 \text{ N} \\
 F_{aBL} &:= -\frac{R_{Bx}}{2} - \frac{R_{ABLx}}{2} = -257.982 \text{ N} & F_{rBL} &:= R_{By} = 888.377 \text{ N} \\
 F_{aBP} &:= -\frac{R_{Bx}}{2} + \frac{R_{ABPx}}{2} = -161.391 \text{ N} & F_{rBP} &:= 0 \text{ N} \\
 F_{aCL} &:= \frac{R_{Cx}}{2} - \frac{R_{CDLx}}{2} = 127.558 \text{ N} & F_{rCL} &:= 0 \text{ N} \\
 F_{aCP} &:= \frac{R_{Cx}}{2} + \frac{R_{CDPx}}{2} = 556.007 \text{ N} & F_{rCP} &:= -R_{Cy} = -789.861 \text{ N} \\
 F_{aDL} &:= -\frac{R_{Dx}}{2} - \frac{R_{CDLx}}{2} = -594.045 \text{ N} & F_{rDL} &:= R_{Dy} = 1664.422 \text{ N} \\
 F_{aDP} &:= -\frac{R_{Dx}}{2} + \frac{R_{CDPx}}{2} = -165.596 \text{ N} & F_{rDP} &:= 0 \text{ N}
 \end{aligned}$$

## Reakční účinky - Pojezd

### Omezené setrvačné účinky

$$S_{px} := m_p \cdot a_{x0} = 119.958 \text{ N}$$

$$S_{py} := m_p \cdot a_{y0} = 329.885 \text{ N}$$

### Reakce

$$R_{Py} := -F_R + S_{py} - |F_{rCP}| + |F_{rDL}| = 697.366 \text{ N}$$

$$\begin{aligned}
 R_{Ez} &:= \frac{-(R_{Py} \cdot r_{p2}) - (R_{Pz} + G_p) \cdot h_2 - F_R \cdot p \downarrow + S_{py} \cdot z_{Tp} + G_p \cdot y_{Tp} + |F_{rDL}| \cdot c + R_{Pz} \cdot r_p}{h + h_2} = 0.297 \text{ N}
 \end{aligned}$$

$$R_{Fz} := R_{Pz} + G_p + R_{Ez} = 1981.678 \text{ N}$$

$$\begin{aligned}
 R_{Ex} &:= \frac{(|F_{rCP}| - |F_{rDL}| - R_{Py} + F_R) \cdot w + S_{py} \cdot x_{Tp} + S_{px} \cdot y_{Tp} \downarrow + (|F_{aCL}| - |F_{aDL}|) + (|F_{aCP}| - |F_{aDP}|) - S_{px} \cdot h_2 \downarrow - (|F_{aCL}| - |F_{aDL}|) \cdot r_k - (|F_{aCP}| - |F_{aDP}|) \cdot (r_k + 2 \cdot k_2)}{h + h_2} = -254.002 \text{ N}
 \end{aligned}$$

$$R_{Fx} := (|F_{aCL}| - |F_{aDL}|) + (|F_{aCP}| - |F_{aDP}|) - R_{Ex} - S_{px} = 57.968 \text{ N}$$

$$R_{EFH} := \frac{(R_{Pz} - R_{Ez} + R_{Fz}) \cdot w - G_p \cdot x_{Tp} + S_{px} \cdot z_{Tp} \downarrow - (|F_{aCL}| - |F_{aCP}| + (|F_{aDL}| + |F_{aDP}|) + S_{px}) \cdot j \downarrow + (|F_{aDL}| + |F_{aDP}|) \cdot c}{j - s} = 1739.306 \text{ N}$$

$$R_{EFD} := |F_{aCL}| - |F_{aCP}| + (|F_{aDL}| + |F_{aDP}|) + R_{EFH} + S_{px} = 1935.34 \text{ N}$$

### Zatížení jednotlivých vodících kladek - pojezd

$$F_{aEH} := -\frac{R_{Ex}}{2} - \frac{R_{EFH}}{2} = -742.652 \text{ N} \quad F_{rEH} := R_{Ez} = 0.297 \text{ N}$$

$$F_{aED} := -\frac{R_{Ex}}{2} + \frac{R_{EFD}}{2} = 1094.671 \text{ N} \quad F_{rED} := 0 \text{ N}$$

$$F_{aFH} := -\frac{R_{Fx}}{2} - \frac{R_{EFH}}{2} = -898.637 \text{ N} \quad F_{rFH} := -R_{Fz} = -1981.678 \text{ N}$$

$$F_{aFD} := -\frac{R_{Fx}}{2} + \frac{R_{EFD}}{2} = 938.686 \text{ N} \quad F_{rFD} := 0 \text{ N}$$

### Kontrola vodících kladek

#### FR15

$$P_{BL} := |F_{rBL}| + 3 \cdot |F_{aBL}| = 1662.323 \text{ N}$$

$P$  – Ekvivalentní dynamické zatížení

$$P_{BLW} := f \cdot P_{BL} = 1994.787 \text{ N}$$

$P_W$  – Efektivní zatížení

$$L_{SBL} := \left( \frac{C_{W15}}{P_{BLW}} \right)^3 \cdot 10^7 = 4.694 \cdot 10^7 \text{ m}$$

$L_S$  – Nominální životnost

$f$  – Servisní koeficient

$f_s$  – Koeficient statického zatížení

$$f_{SBL} := 0.7 \cdot \frac{C_{0W15}}{f \cdot (|F_{rBL}| + 3 \cdot |F_{aBL}|)} = 2.386$$

$\geq 1 \Rightarrow \text{VYHOVUJE}$

#### FR20 - osa Z

$$P_{DL} := |F_{rDL}| + 3 \cdot |F_{aDL}| = 3446.557 \text{ N}$$

$$P_{DLW} := f \cdot P_{DL} = 4135.869 \text{ N}$$

$$L_S := \left( \frac{C_{W20}}{P_{DLW}} \right)^3 \cdot 10^7 = 1.496 \cdot 10^7 \text{ m}$$

$$f_{SDL} := 0.7 \cdot \frac{C_{0W20}}{f \cdot (|F_{rDL}| + 3 \cdot |F_{aDL}|)} = 1.608$$

$\geq 1 \Rightarrow \text{VYHOVUJE}$

## FR20 - pojezd

$$P_{FH} := |F_{rFH}| + 3 \cdot |F_{aFH}| = 4677.589 \text{ N}$$

$$P_{FHW} := f \cdot P_{FH} = 5613.107 \text{ N}$$

$$L_S := \left( \frac{C_{W20}}{P_{FHW}} \right)^3 \cdot 10^7 = 5.984 \cdot 10^6 \text{ m}$$

$$f_{SFH} := 0.7 \cdot \frac{C_{0W20}}{f \cdot (|F_{rFH}| + 3 \cdot |F_{aFH}|)} = 1.185 \quad \geq 1 \Rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

### 1.3.4.6 Posuv ve směru X - Castiglianova věta

#### Rameno dolní

**Pole I:**  $z_1 \in \langle 0; l \rangle$

$$M_I(z_1) = S_{Ux} \cdot z_1 + M_{GU} + M_{SUz}$$

$$\frac{\partial M_I}{\partial S_{Ux}} = z_1$$

$$v_{xI} := \frac{1}{E \cdot I_{y80}} \cdot \int_0^l (S_{Ux} \cdot z_1 + M_{GU} + M_{SUz}) \cdot z_1 \, dz_1 = 0.035 \text{ mm}$$

**Pole II:**  $z_2 \in \langle 0; m \rangle$

$$M_{II}(z_2) = S_{Ux} \cdot (l + z_2) + M_{GU} + M_{SUz} + S_x \cdot z_2$$

$$\frac{\partial M_{II}}{\partial S_{Ux}} = (l + z_2)$$

$$v_{xII} := \frac{1}{E \cdot I_{y80}} \cdot \int_0^m (S_{Ux} \cdot (l + z_2) + M_{GU} + M_{SUz} + S_x \cdot z_2) \cdot (l + z_2) \, dz_2 = 0.088 \text{ mm}$$

**Pole III:**  $z_3 \in \langle 0; b \rangle$

$$M_{III}(z_3) = S_{Ux} \cdot (l + m + z_3) + M_{GU} + M_{SUz} + S_x \cdot (m + z_3) - R_{Bx} \cdot z_3$$

$$\frac{\partial M_{III}}{\partial S_{Ux}} = (l + m + z_3)$$

$$v_{xIII} := \frac{1}{E \cdot I_{y80}} \cdot \int_0^b \left( \begin{array}{l} S_{Ux} \cdot (l + m + z_3) \downarrow \\ + S_x \cdot (m + z_3) - R_{Bx} \cdot z_3 \downarrow \\ + M_{GU} + M_{S\dot{U}z} \end{array} \right) \cdot (l + m + z_3) dz_3 = 0.039 \text{ mm}$$

### Celkový posuv

$$v_x := v_{xI} + v_{xII} + v_{xIII} = 0.162 \text{ mm}$$

### Rameno horní

**Pole I:**  $z_1 \in \langle 0; g \rangle$

$$M_I(z_1) = F_{fikt} \cdot z_1$$

$$\frac{\partial M_I}{\partial F_{fikt}} = z_1$$

$$v_{2xI} := \frac{1}{E \cdot I_{y110}} \cdot \int_0^g F_{fikt} \cdot z_1 \cdot z_1 dz_1 = 0 \text{ mm}$$

**Pole II:**  $z_2 \in \langle 0; b \rangle$

$$M_{II}(z_2) = F_{fikt} \cdot (g + z_2) + R_{Bx} \cdot z_2$$

$$\frac{\partial M_{II}}{\partial F_{fikt}} = (g + z_2)$$

$$v_{2xII} := \frac{1}{E \cdot I_{y110}} \cdot \int_0^b (F_{fikt} \cdot (g + z_2) + R_{Bx} \cdot z_2) \cdot (g + z_2) dz_2 = 0.004 \text{ mm}$$

**Pole III:**  $z_3 \in \langle 0; t \rangle$

$$M_{III}(z_3) = F_{fikt} \cdot (g + b + z_3) + R_{Bx} \cdot (b + z_3) - R_{Ax} \cdot z_3$$

$$\frac{\partial M_{III}}{\partial F_{fikt}} = (g + b + z_3)$$

$$v_{2xIII} := \frac{1}{E \cdot I_{y110}} \cdot \int_0^t \left( \begin{array}{l} F_{fikt} \cdot (g + b + z_3) \downarrow \\ + R_{Bx} \cdot (b + z_3) - R_{Ax} \cdot z_3 \end{array} \right) \cdot (g + b + z_3) dz_3 = 0.022 \text{ mm}$$

**Pole IV:**  $z_4 \in (0; e)$

$$M_{IV}(z_4) = F_{fikt} \cdot (g + b + t + z_4) + R_{Bx} \cdot (b + t + z_4) - R_{Ax} \cdot (t + z_4) + S_{2x} \cdot z_4$$

$$\frac{\partial M_{IV}}{\partial F_{fikt}} = (g + b + t + z_4)$$

$$v_{2xIV} := \frac{1}{E \cdot I_{y110}} \cdot \int_0^e \begin{pmatrix} F_{fikt} \cdot (g + b + t + z_4) \\ + R_{Bx} \cdot (b + t + z_4) \\ - R_{Ax} \cdot (t + z_4) + S_{2x} \cdot z_4 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} g + b \\ + t + z_4 \end{pmatrix} dz_4 = 0.077 \text{ mm}$$

**Pole V:**  $z_5 \in (0; c)$

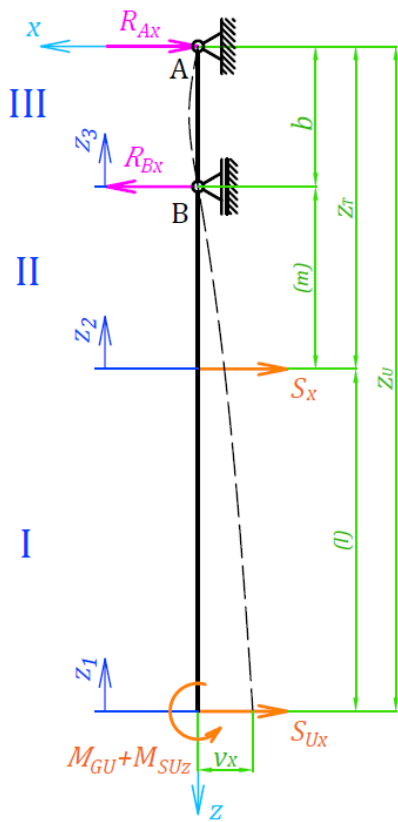
$$M_V(z_5) = F_{fikt} \cdot (g + b + t + e + z_5) + R_{Bx} \cdot (b + t + e + z_5) - R_{Ax} \cdot (t + e + z_5) + S_{2x} \cdot (e + z_5) - R_{Dx} \cdot z_5$$

$$\frac{\partial M_V}{\partial F_{fikt}} = (g + b + t + e + z_5)$$

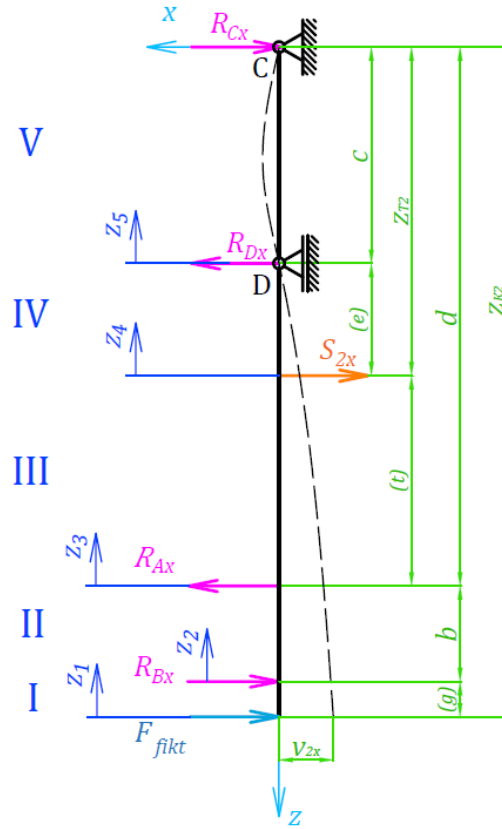
$$v_{2xV} := \frac{1}{E \cdot I_{y110}} \cdot \int_0^c \begin{pmatrix} F_{fikt} \cdot (g + b + t + e + z_5) \\ + R_{Bx} \cdot (b + t + e + z_5) \\ - R_{Ax} \cdot (t + e + z_5) \\ + S_{2x} \cdot (e + z_5) - R_{Dx} \cdot z_5 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} g + b \\ + t + e \\ + z_5 \end{pmatrix} dz_5 = 0.037 \text{ mm}$$

**Celkový posuv**

$$v_{2x} := v_{2xI} + v_{2xII} + v_{2xIII} + v_{2xIV} + v_{2xV} = 0.14 \text{ mm}$$



Dolní rameno



Horní rameno

Schéma pro výpočet posuvů v X - pohyb ve směru X+Y+Z

### 1.3.4.7 Posuv ve směru Y - Castigianova věta

#### Rameno dolní

**Pole I:**  $z_1 \in \langle 0; l \rangle$

$$M_I(z_1) = -S_{Uy} \cdot z_1$$

$$\frac{\partial M_I}{\partial S_{Uy}} = -z_1$$

$$v_{yI} := \frac{1}{E \cdot I_{x80}} \cdot \int_0^l (-S_{Uy} \cdot z_1) \cdot (-z_1) dz_1 = 0.061 \text{ mm}$$

**Pole II:**  $z_2 \in \langle 0; m \rangle$

$$M_{II}(z_2) = -S_{Uy} \cdot (l + z_2) - S_y \cdot z_2$$

$$\frac{\partial M_{II}}{\partial S_{Uy}} = (-l - z_2)$$

$$v_{yII} := \frac{1}{E \cdot I_{x80}} \cdot \int_0^m (-S_{Uy} \cdot (l + z_2) - S_y \cdot z_2) \cdot (-l - z_2) dz_2 = 0.188 \text{ mm}$$

**Pole III:**  $z_3 \in \langle 0; b \rangle$

$$M_{III}(z_3) = -S_{Uy} \cdot (l + m + z_3) - S_y \cdot (m + z_3) + R_{By} \cdot z_3$$

$$\frac{\partial M_{III}}{\partial S_{Uy}} = (-l - m - z_3)$$

$$v_{yIII} := \frac{1}{E \cdot I_{x80}} \cdot \int_0^b \left( \begin{array}{l} -S_{Uy} \cdot (l + m + z_3) \\ -S_y \cdot (m + z_3) + R_{By} \cdot z_3 \end{array} \right) \cdot (-l - m - z_3) dz_3 = 0.106 \text{ mm}$$

**Celkový posuv**

$$v_y := v_{yI} + v_{yII} + v_{yIII} = 0.355 \text{ mm}$$

**Rameno horní**

**Pole I:**  $z_1 \in \langle 0; g \rangle$

$$M_I(z_1) = -F_{fikt} \cdot z_1$$

$$\frac{\partial M_I}{\partial F_{fikt}} = -z_1$$

$$v_{2yI} := \frac{1}{E \cdot I_{x110}} \cdot \int_0^g (-F_{fikt} \cdot z_1) \cdot (-z_1) dz_1 = 0 \text{ mm}$$

**Pole II:**  $z_2 \in \langle 0; b \rangle$

$$M_{II}(z_2) = -F_{fikt} \cdot (g + z_2) - R_{By} \cdot z_2$$

$$\frac{\partial M_{II}}{\partial F_{fikt}} = (-g - z_2)$$

$$v_{2yII} := \frac{1}{E \cdot I_{x110}} \cdot \int_0^b (-F_{fikt} \cdot (g + z_2) - R_{By} \cdot z_2) \cdot (-g - z_2) dz_2 = 0.009 \text{ mm}$$



**Pole III:**  $z_3 \in \langle 0; t \rangle$

$$M_{III}(z_3) = -F_{fikt} \cdot (g + b + z_3) - R_{By} \cdot (b + z_3) + R_{Ay} \cdot z_3$$

$$\frac{\partial M_{III}}{\partial F_{fikt}} = (-g - b - z_3)$$

$$v_{2yIII} := \frac{1}{E \cdot I_{x110}} \cdot \int_0^t \begin{pmatrix} -F_{fikt} \cdot (g + b + z_3) \\ -R_{By} \cdot (b + z_3) + R_{Ay} \cdot z_3 \end{pmatrix} \cdot (-g - b - z_3) dz_3 = 0.047 \text{ mm}$$

**Pole IV:**  $z_4 \in \langle 0; e \rangle$

$$M_{IV}(z_4) = -F_{fikt} \cdot (g + b + t + z_4) - R_{By} \cdot (b + t + z_4) \\ + R_{Ay} \cdot (t + z_4) - S_{2y} \cdot z_4$$

$$\frac{\partial M_{IV}}{\partial F_{fikt}} = (-g - b - t - z_4)$$

$$v_{2yIV} := \frac{1}{E \cdot I_{x110}} \cdot \int_0^e \begin{pmatrix} -F_{fikt} \cdot (g + b + t + z_4) \\ -R_{By} \cdot (b + t + z_4) \\ + R_{Ay} \cdot (t + z_4) - S_{2y} \cdot z_4 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} -g - b \\ -t - z_4 \end{pmatrix} dz_4 = 0.174 \text{ mm}$$

**Pole V:**  $z_5 \in \langle 0; (c-p) \rangle$

$$M_V(z_5) = -F_{fikt} \cdot (g + b + t + e + z_5) - R_{By} \cdot (b + t + e + z_5) \\ + R_{Ay} \cdot (t + e + z_5) - S_{2y} \cdot (e + z_5) + R_{Dy} \cdot z_5$$

$$\frac{\partial M_V}{\partial F_{fikt}} = (-g - b - t - e - z_5)$$

$$v_{2yV} := \frac{1}{E \cdot I_{x110}} \cdot \int_0^{(c-p)} \begin{pmatrix} -F_{fikt} \cdot (g + b + t + e + z_5) \\ -R_{By} \cdot (b + t + e + z_5) \\ + R_{Ay} \cdot (t + e + z_5) \\ -S_{2y} \cdot (e + z_5) + R_{Dy} \cdot z_5 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} -g - b \\ -t - e - z_5 \end{pmatrix} dz_5 = 0.114 \text{ mm}$$

**Pole VI:**  $z_6 \in \langle 0; p \rangle$

$$M_{VI}(z_6) = -F_{fikt} \cdot (g + b + t + e + c - p + z_6) \downarrow \\ - R_{By} \cdot (b + t + e + c - p + z_6) \downarrow \\ + R_{Ay} \cdot (t + e + c - p + z_6) - S_{2y} \cdot (e + c - p + z_6) \downarrow \\ + R_{Dy} \cdot (c - p + z_6) - M_{RPz} - F_R \cdot z_6$$

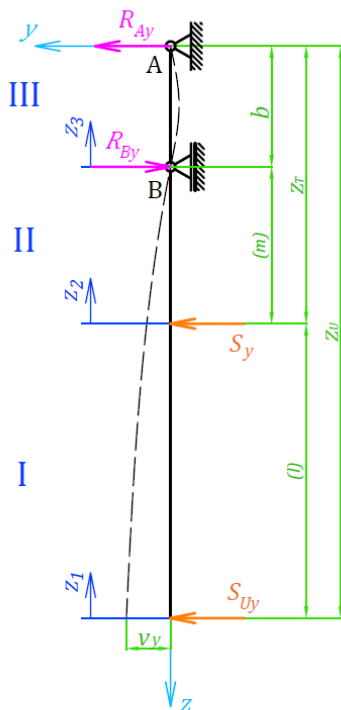
$$M_{RPz} := R_{Pz} \cdot r = (4.544 \cdot 10^4) \text{ N} \cdot \text{mm}$$

$$\frac{\partial M_{VI}}{\partial F_{fikt}} = (-g - b - t - e - c + p - z_6)$$

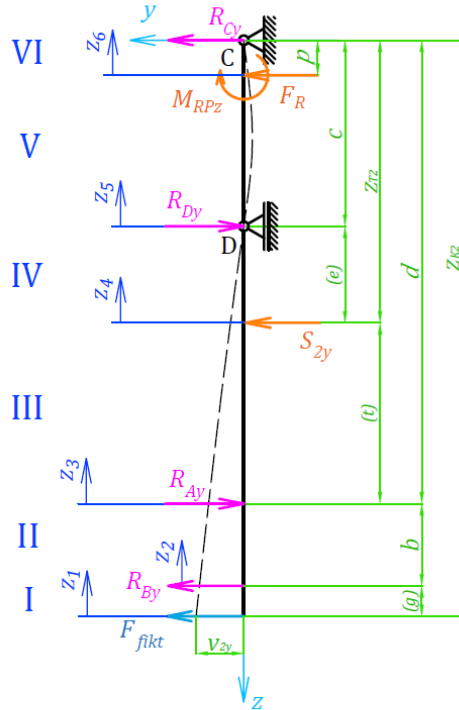
$$v_{2yVI} := \frac{1}{E \cdot I_{x110}} \cdot \int_0^p \begin{pmatrix} -F_{fikt} \cdot (g + b + t \downarrow \\ + e + c - p + z_6) \downarrow \\ -R_{By} \cdot (b + t + e + c - p + z_6) \downarrow \\ + R_{Ay} \cdot (t + e + c - p + z_6) \downarrow \\ -S_{2y} \cdot (e + c - p + z_6) \downarrow \\ + R_{Dy} \cdot (c - p + z_6) - M_{RPz} \downarrow \\ -F_R \cdot z_6 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} -g - b \downarrow \\ -t \downarrow \\ -e - c \downarrow \\ + p \downarrow \\ -z_6 \end{pmatrix} dz_6 = (4.016 \cdot 10^{-5}) \text{ mm}$$

### Celkový posuv

$$v_{2y} := v_{2yI} + v_{2yII} + v_{2yIII} + v_{2yIV} + v_{2yV} + v_{2yVI} = 0.344 \text{ mm}$$



Dolní rameno



Horní rameno

Schéma pro výpočet posuvů v Y - pohyb ve směru X+Y+Z

## 2 Varianta B

### 2.1 Technické parametry

#### 2.1.1 Rozměrové parametry

Rozměrové parametry byly odměřeny v softwaru NX 12. Níže jsou zobrazeny v příslušných schématech.

Rozměry dolního ramena

$$\begin{aligned}a &:= 35 \text{ mm} \\b &:= 125 \text{ mm} \\a_R &:= 12 \text{ mm} \\x_T &:= 15.77 \text{ mm} \\z_T &:= 458.61 \text{ mm} \\z_U &:= 983 \text{ mm}\end{aligned}$$

Rozměry horního ramena

$$\begin{aligned}c &:= 316 \text{ mm} \\d &:= 968 \text{ mm} \\x_K &:= 23.8 \text{ mm} \\x_R &:= 82.25 \text{ mm} \\x_{T2} &:= 44.38 \text{ mm} \\z_{T2} &:= 586.9 \text{ mm} \\p &:= 6 \text{ mm} \\k_2 &:= 57.5 \text{ mm} \\y_r &:= 16.7 \text{ mm} \\d_v &:= 31.83 \text{ mm} \\r &:= y_r + \frac{d_v}{2} = 32.615 \text{ mm}\end{aligned}$$

#### 2.1.2 Hmotnostní parametry

Hmotnostní parametry byly zjištěny pomocí analýzy hmotnosti v softwaru NX 12.

Hmotnost dolního ramena

$$m_c := 16.303 \text{ kg}$$

Hmotnost horního ramena

$$m_{c2} := 31.428 \text{ kg}$$

Hmotnost kladky

$$m_K := 3.868 \text{ kg}$$

Hmotnost celková

$$m_{celk} := m_c + m_{c2} + m_K = 51.599 \text{ kg}$$

### 2.1.3 Parametry z katalogu

Zrychlení ve směru X

$$a_x := 2 \frac{m}{s^2}$$

Zrychlení ve směru Y

$$a_y := 5.5 \frac{m}{s^2}$$

Zrychlení ve směru Z

$$a_z := 10 \frac{m}{s^2}$$

Užitečné zatížení manipulátoru

$$F := 250 \text{ N}$$

## 2.2 Zatěžující účinky

### 2.2.1 Zatížení od hmotnosti

Tíhové zatížení dolního ramena

$$G_c := m_c \cdot g = 159.878 \text{ N}$$

Tíhové zatížení horního ramena

$$G_{c2} := m_{c2} \cdot g = 308.203 \text{ N}$$

Tíhové zatížení od kladky

$$G_K := m_K \cdot g = 37.932 \text{ N}$$

Tíhové zatížení od hmotného bodu

$$G_U := F = 250 \text{ N}$$

Hmotnost hmotného bodu (HB)

$$m_U := \frac{G_U}{g} = 25.493 \text{ kg}$$

### 2.2.2 Setrvačné účinky

Z převodu pomocí kladky a řemene vychází následující závislost mezi zrychlením ve směru osy Z horního a dolního ramena.

$$\text{Zrychlení ve směru Z horního ramena } a_{z2} := \frac{a_z}{2} = 5 \frac{m}{s^2}$$

#### Setrvačné síly od $a_x$

- Na dolní rameno
- Na horní rameno
- Na HB

$$S_x := m_c \cdot a_x = 32.606 \text{ N}$$

$$S_{2x} := m_{c2} \cdot a_x = 62.856 \text{ N}$$

$$S_{Ux} := m_U \cdot a_x = 50.986 \text{ N}$$

#### Setrvačné síly od $a_y$

- Na dolní rameno
- Na horní rameno
- Na HB

$$S_y := m_c \cdot a_y = 89.667 \text{ N}$$

$$S_{2y} := m_{c2} \cdot a_y = 172.854 \text{ N}$$

$$S_{Uy} := m_U \cdot a_y = 140.211 \text{ N}$$

#### Setrvačné síly od $a_z$

- Na dolní rameno
- Na horní rameno
- Na HB

$$S_z := m_c \cdot a_z = 163.03 \text{ N}$$

$$S_{2z} := m_{c2} \cdot a_{z2} = 157.14 \text{ N}$$

$$S_{Uz} := m_U \cdot a_z = 254.929 \text{ N}$$

## 2.3 Zatěžovací stavy

### 2.3.1 Pohyb ve směru X

#### 2.3.1.1 Reakční účinky

##### Rameno dolní

$$\Sigma F_{ix} = 0; \quad R_{Bx} - R_{Ax} - S_x - S_{Ux} = 0$$

$$\Sigma F_{iz} = 0; \quad G_U - R_R + G_c = 0$$

$$\Sigma M_{iA} = 0; \quad -G_U \cdot a + S_{Ux} \cdot z_U - G_c \cdot x_T + S_x \cdot z_T - R_{Bx} \cdot b + R_R \cdot a_R = 0$$

$$R_R := G_c + G_U = 409.878 \text{ N}$$

$$R_{Bx} := \frac{-G_U \cdot a + S_{Ux} \cdot z_U - G_c \cdot x_T + S_x \cdot z_T + R_R \cdot a_R}{b} = 469.758 \text{ N}$$

$$R_{Ax} := R_{Bx} - S_x - S_{Ux} = 386.166 \text{ N}$$

$$\text{Síla od kladky} \quad F_K := G_K + 2 \cdot R_R = 857.688 \text{ N}$$

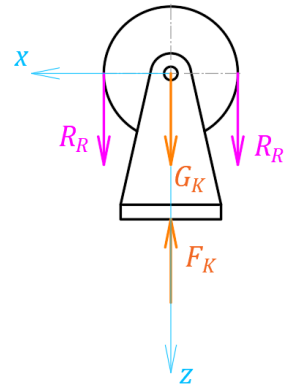


Schéma zatížení kladky

##### Rameno horní

$$\Sigma F_{ix} = 0; \quad R_{Dx} - R_{Cx} - S_{2x} - R_{Bx} + R_{Ax} = 0$$

$$\Sigma F_{iy} = 0; \quad F_R - R_{Cy} - R_{Dy} = 0$$

$$\Sigma F_{iz} = 0; \quad F_K - R_{Pz} + G_{c2} = 0$$

$$\Sigma M_{iC} = 0; \quad F_K \cdot x_K - R_{Dx} \cdot c + G_{c2} \cdot x_{T2} + S_{2x} \cdot z_{T2} - R_{Ax} \cdot d + R_{Bx} \cdot (b + d) = 0$$

$$\Sigma M_{iO} = 0; \quad R_{Dy} \cdot c - R_{Pz} \cdot r - F_R \cdot p = 0$$

$$\text{Síly v ozubení} \quad \begin{aligned} F_o &= R_{Pz} & \alpha &:= 20^\circ & \text{Úhel záběru} \\ F_R &= F_o \cdot \tan(\alpha) \end{aligned}$$

$$R_{Dx} := \frac{F_K \cdot x_K + G_{c2} \cdot x_{T2} + S_{2x} \cdot z_{T2} - R_{Ax} \cdot d + R_{Bx} \cdot (b + d)}{c} = 666.512 \text{ N}$$

$$R_{Cx} := R_{Dx} - S_{2x} - R_{Bx} + R_{Ax} = 520.064 \text{ N}$$

$$R_{Pz} := F_K + G_{c2} = 1165.891 \text{ N}$$

$$F_o := R_{Pz} = 1165.891 \text{ N}$$

$$F_R := F_o \cdot \tan(\alpha) = 424.35 \text{ N}$$

$$R_{Dy} := \frac{R_{Pz} \cdot r + F_R \cdot p}{c} = 128.391 \text{ N}$$

$$R_{Cy} := F_R - R_{Dy} = 295.958 \text{ N}$$

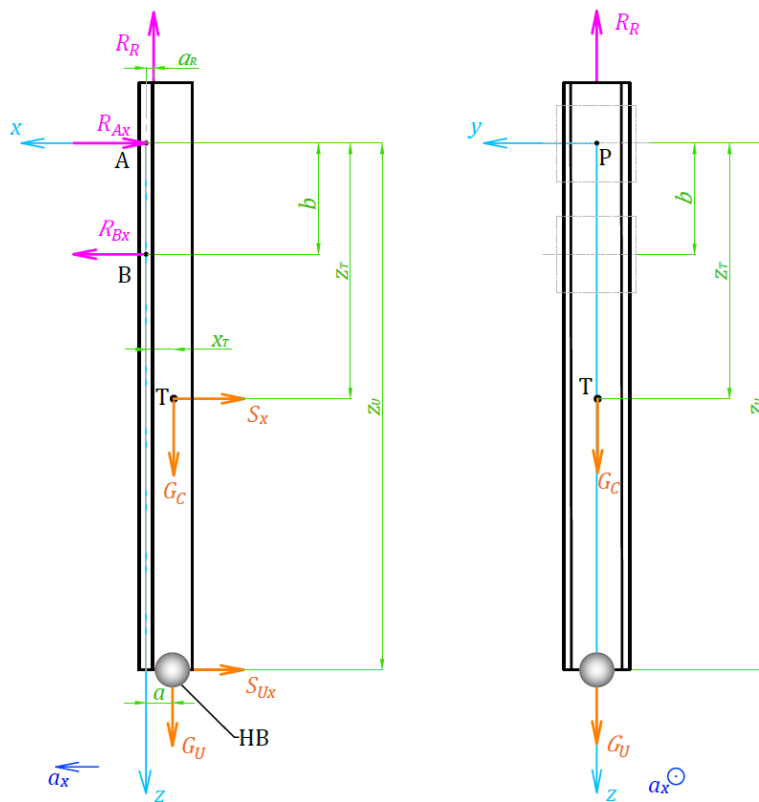
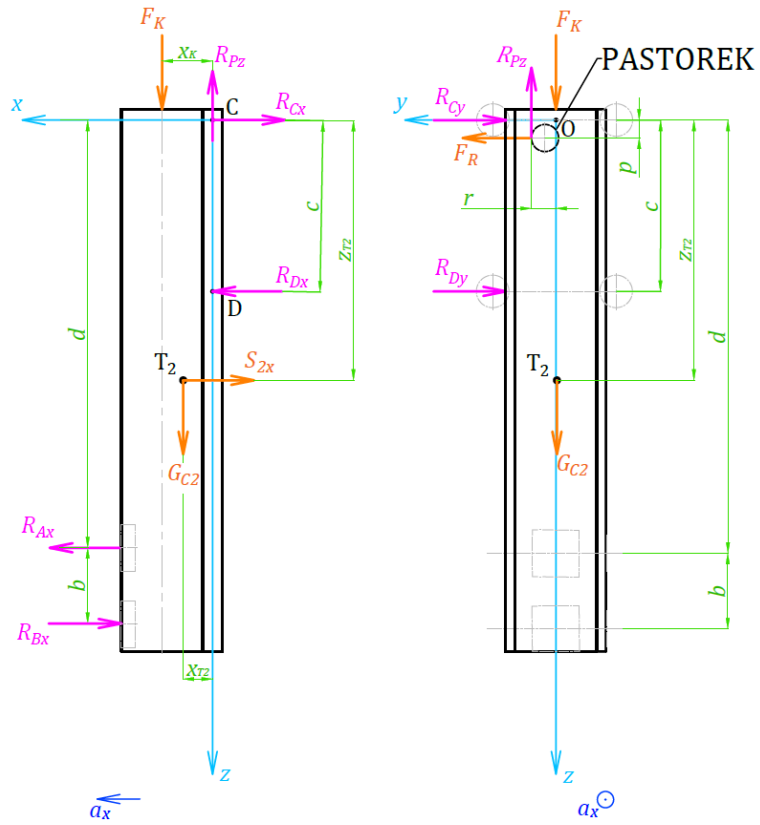


Schéma zatížení - pohyb ve směru X

## 2.3.2 Pohyb ve směru Y

### 2.3.2.1 Reakční účinky

#### Rameno dolní

$$\begin{aligned}\Sigma F_{ix} &= 0; & R_{Bx} - R_{Ax} &= 0 \\ \Sigma F_{iy} &= 0; & R_{Ay} - R_{By} + S_y + S_{Uy} &= 0 \\ \Sigma F_{iz} &= 0; & G_U - R_R + G_c &= 0 \\ \Sigma M_{iA} &= 0; & -G_U \cdot a - G_c \cdot x_T - R_{Bx} \cdot b + R_R \cdot a_R &= 0 \\ \Sigma M_{iP} &= 0; & -S_{Uy} \cdot z_U - S_y \cdot z_T + R_{By} \cdot b &= 0\end{aligned}$$

$$R_R := G_c + G_U = 409.878 \text{ N}$$

$$R_{Bx} := \frac{-G_U \cdot a - G_c \cdot x_T + R_R \cdot a_R}{b} = -50.822 \text{ N}$$

$$R_{Ax} := R_{Bx} = -50.822 \text{ N}$$

$$R_{By} := \frac{S_{Uy} \cdot z_U + S_y \cdot z_T}{b} = 1431.595 \text{ N}$$

$$R_{Ay} := R_{By} - S_y - S_{Uy} = 1201.717 \text{ N}$$

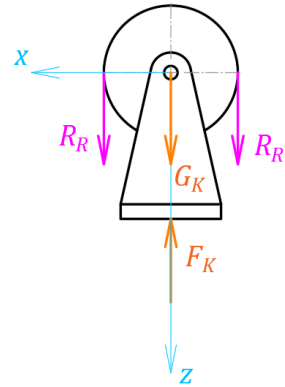


Schéma zatížení kladky

$$\text{Síla od kladky} \quad F_K := G_K + 2 \cdot R_R = 857.688 \text{ N}$$

#### Rameno horní

$$\begin{aligned}\Sigma F_{ix} &= 0; & R_{Dx} - R_{Cx} - R_{Bx} + R_{Ax} &= 0 \\ \Sigma F_{iy} &= 0; & F_R + R_{Cy} - R_{Dy} + S_{2y} + R_{By} - R_{Ay} &= 0 \\ \Sigma F_{iz} &= 0; & F_K - R_{Pz} + G_{c2} &= 0 \\ \Sigma M_{iC} &= 0; & F_K \cdot x_K - R_{Dx} \cdot c + G_{c2} \cdot x_{T2} - R_{Ax} \cdot d + R_{Bx} \cdot (b+d) &= 0 \\ \Sigma M_{iO} &= 0; & R_{Dy} \cdot c - R_{Pz} \cdot r - F_R \cdot p - S_{2y} \cdot z_{T2} + R_{Ay} \cdot d - R_{By} \cdot (b+d) &= 0\end{aligned}$$

Síly v ozubení

$$\begin{aligned}F_o &= R_{Pz} \\ F_R &= F_o \cdot \tan(\alpha)\end{aligned}$$

$$\alpha := 20^\circ$$

Úhel záběru

$$R_{Dx} := \frac{F_K \cdot x_K + G_{c2} \cdot x_{T2} - R_{Ax} \cdot d + R_{Bx} \cdot (b+d)}{c} = 87.779 \text{ N}$$

$$R_{Cx} := R_{Dx} - R_{Bx} + R_{Ax} = 87.779 \text{ N}$$

$$R_{Pz} := F_K + G_{c2} = 1165.891 \text{ N}$$

$$F_o := R_{Pz} = 1165.891 \text{ N}$$

$$F_R := F_o \cdot \tan(\alpha) = 424.35 \text{ N}$$

$$R_{Dy} := \frac{R_{Pz} \cdot r + F_R \cdot p + S_{2y} \cdot z_{T2} - R_{Ay} \cdot d + R_{By} \cdot (b + d)}{c} = 1719.906 \text{ N}$$

$$R_{Cy} := -F_R + R_{Dy} - S_{2y} - R_{By} + R_{Ay} = 892.825 \text{ N}$$

Created with PTC Mathcad Express. See [www.mathcad.com](http://www.mathcad.com) for more information.



Created v...

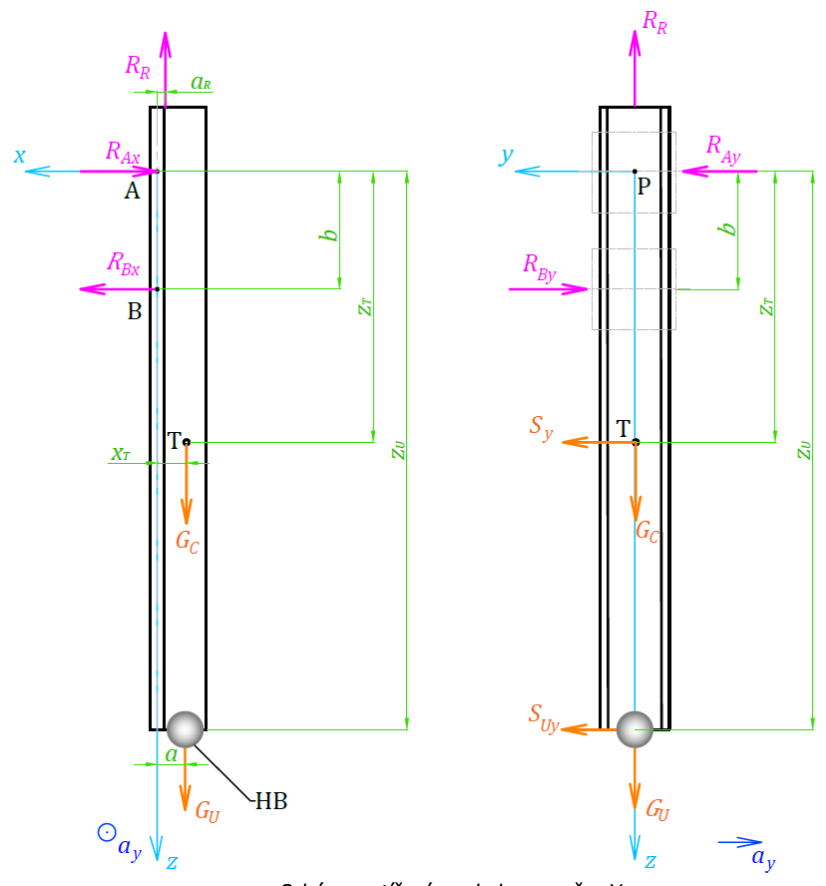
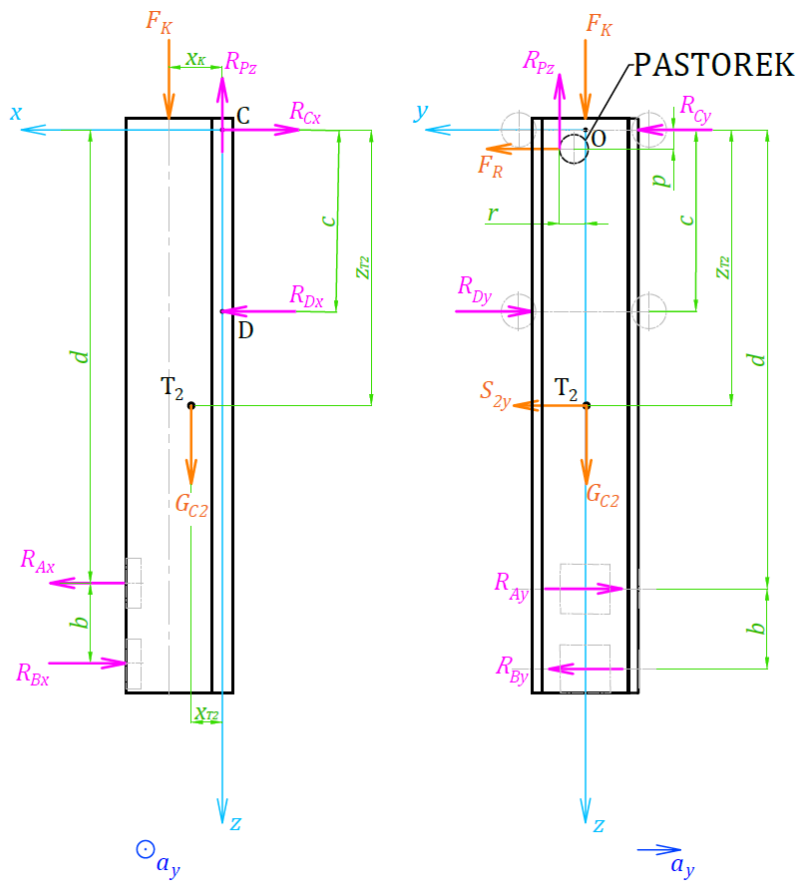


Schéma zatížení - pohyb ve směru Y

information.

## 2.3.3 Pohyb ve směru Z

### 2.3.3.1 Reakční účinky

#### Rameno dolní

$$\Sigma F_{ix} = 0; \quad R_{Bx} - R_{Ax} = 0$$

$$\Sigma F_{iz} = 0; \quad G_U + S_{Uz} + S_z + G_c - R_R = 0$$

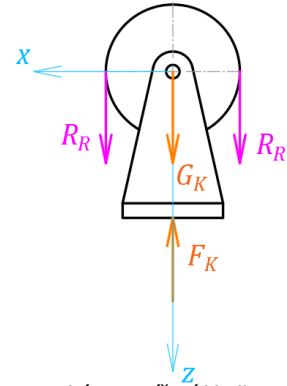
$$\Sigma M_{iA} = 0; \quad -G_U \cdot a - S_{Uz} \cdot a - G_c \cdot x_T - S_z \cdot x_T - R_{Bx} \cdot b = 0$$

$$R_{Bx} := \frac{-G_U \cdot a - S_{Uz} \cdot a - G_c \cdot x_T - S_z \cdot x_T}{b} = -182.118 \text{ N}$$

$$R_{Ax} := R_{Bx} = -182.118 \text{ N}$$

$$R_R := G_U + S_{Uz} + S_z + G_c = 827.837 \text{ N}$$

$$\text{Síla od kladky} \quad F_K := G_K + 2 \cdot R_R = 1693.606 \text{ N}$$



#### Rameno horní

$$\Sigma F_{ix} = 0; \quad R_{Dx} - R_{Cx} - R_{Bx} + R_{Ax} = 0$$

$$\Sigma F_{iy} = 0; \quad F_R - R_{Cy} - R_{Dy} = 0$$

$$\Sigma F_{iz} = 0; \quad F_K - R_{Pz} + G_{c2} + S_{2z} = 0$$

$$\Sigma M_{iC} = 0; \quad F_K \cdot x_K - R_{Dx} \cdot c + G_{c2} \cdot x_{T2} + S_{2z} \cdot x_{T2} - R_{Ax} \cdot d + R_{Bx} \cdot (b + d) = 0$$

$$\Sigma M_{iO} = 0; \quad R_{Dy} \cdot c - R_{Pz} \cdot r - F_R \cdot p = 0$$

$$\text{Síly v ozubení} \quad F_o = R_{Pz} \quad \alpha := 20^\circ \quad \text{Úhel záběru}$$

$$F_R = F_o \cdot \tan(\alpha)$$

$$R_{Dx} := \frac{F_K \cdot x_K + G_{c2} \cdot x_{T2} + S_{2z} \cdot x_{T2} - R_{Ax} \cdot d + R_{Bx} \cdot (b + d)}{c} = 120.87 \text{ N}$$

$$R_{Cx} := R_{Dx} - R_{Bx} + R_{Ax} = 120.87 \text{ N}$$

$$R_{Pz} := F_K + G_{c2} + S_{2z} = 2158.949 \text{ N}$$

$$F_o := R_{Pz} = 2158.949 \text{ N}$$

$$F_R := F_o \cdot \tan(\alpha) = 785.793 \text{ N}$$

$$R_{Dy} := \frac{R_{Pz} \cdot r + F_R \cdot p}{c} = 237.75 \text{ N}$$

$$R_{Cy} := F_R - R_{Dy} = 548.044 \text{ N}$$

Created with

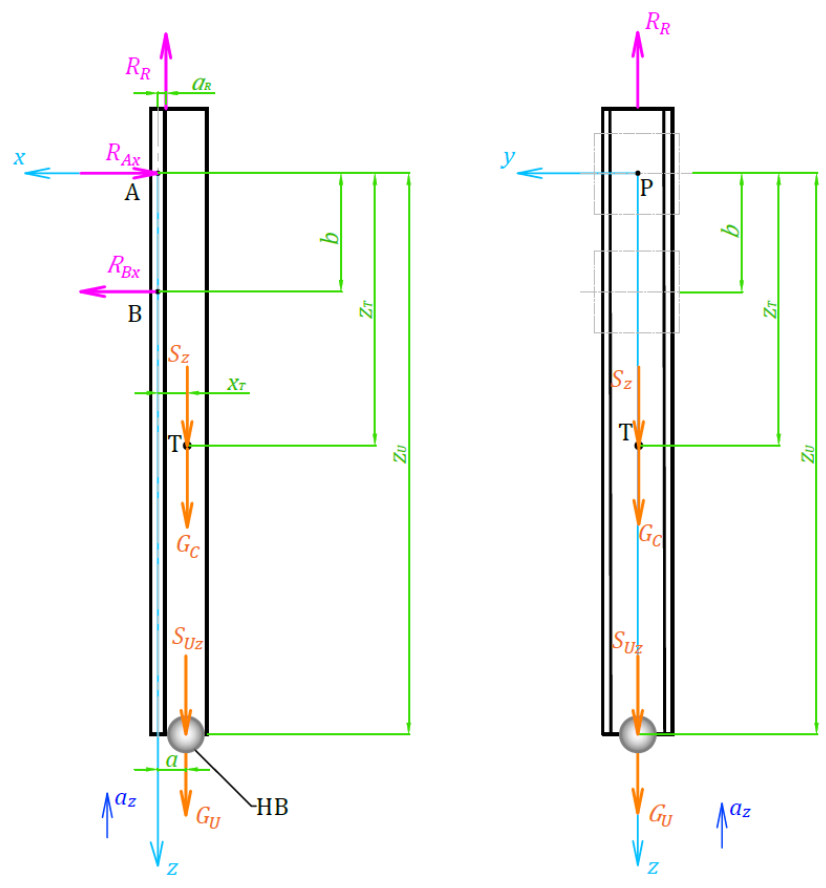
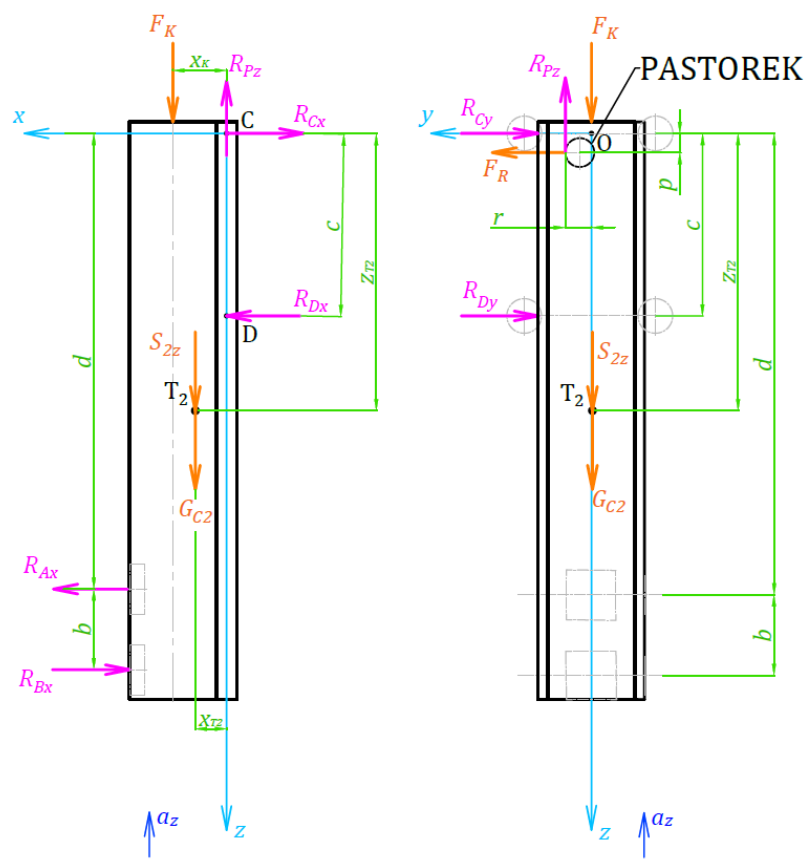


Schéma zatížení - pohyb ve směru Z

ation.

## 2.3.4 Pohyb ve směru X+Y+Z

### 2.3.4.1 Reakční účinky

#### Rameno dolní

$$\begin{aligned} \Sigma F_{ix} &= 0; & R_{Bx} - R_{Ax} - S_x - S_{Ux} &= 0 \\ \Sigma F_{iy} &= 0; & S_y + S_{Uy} - R_{By} + R_{Ay} &= 0 \\ \Sigma F_{iz} &= 0; & G_U + S_{Uz} + S_z + G_c - R_R &= 0 \\ \Sigma M_{iA} &= 0; & R_R \cdot a_R - G_U \cdot a - S_{Uz} \cdot a + S_{Ux} \cdot z_U - G_c \cdot x_T - S_z \cdot x_T + S_x \cdot z_T - R_{Bx} \cdot b &= 0 \\ \Sigma M_{iP} &= 0; & R_{By} \cdot b - S_{Uy} \cdot z_U - S_y \cdot z_T &= 0 \end{aligned}$$

$$R_R := G_U + S_{Uz} + S_z + G_c = 827.837 \text{ N}$$

$$R_{Rstat} := G_U + G_c = 409.878 \text{ N}$$

$$R_{Rdyn} := S_{Uz} + S_z = 417.959 \text{ N}$$

$$R_{Bx} := \frac{R_R \cdot a_R - G_U \cdot a - S_{Uz} \cdot a + S_{Ux} \cdot z_U - G_c \cdot x_T - S_z \cdot x_T + S_x \cdot z_T}{b} = 417.934 \text{ N}$$

$$R_{Bxstat} := \frac{R_R \cdot a_R - G_U \cdot a + S_{Ux} \cdot z_U - G_c \cdot x_T + S_x \cdot z_T}{b} = 509.882 \text{ N}$$

$$R_{Ax} := R_{Bx} - S_{Ux} - S_x = 334.342 \text{ N}$$

$$R_{Axstat} := R_{Bxstat} - S_{Ux} - S_x = 426.29 \text{ N}$$

$$R_{By} := \frac{S_{Uy} \cdot z_U + S_y \cdot z_T}{b} = 1431.595 \text{ N}$$

$$R_{Ay} := R_{By} - S_y - S_{Uy} = 1201.717 \text{ N}$$

$$\text{Síla od kladky} \quad F_K := G_K + 2 \cdot R_R = 1693.606 \text{ N}$$

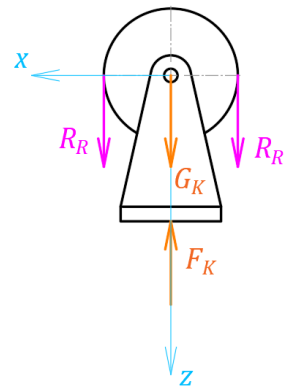


Schéma zatížení kladky

#### Rameno horní

$$\begin{aligned} \Sigma F_{ix} &= 0; & R_{Dx} - R_{Cx} - R_{Bx} + R_{Ax} - S_{2x} &= 0 \\ \Sigma F_{iy} &= 0; & F_R + R_{Cy} - R_{Dy} + S_{2y} + R_{By} - R_{Ay} &= 0 \\ \Sigma F_{iz} &= 0; & F_K - R_{Pz} + G_{c2} + S_{2z} &= 0 \\ \Sigma M_{iC} &= 0; & F_K \cdot x_K - R_{Dx} \cdot c + G_{c2} \cdot x_{T2} + S_{2z} \cdot x_{T2} - R_{Ax} \cdot d + R_{Bx} \cdot (b+d) &= 0 \\ \Sigma M_{iO} &= 0; & R_{Dy} \cdot c - R_{Pz} \cdot r - F_R \cdot p - S_{2y} \cdot z_{T2} - R_{By} \cdot (b+d) + R_{Ay} \cdot d &= 0 \end{aligned}$$

Síly v ozubení

$$\begin{aligned} F_o &= R_{Pz} \\ F_R &= F_o \cdot \tan(\alpha) \end{aligned}$$

$$\alpha := 20^\circ$$

Úhel záběru

$$R_{Dx} := \frac{F_K \cdot x_K + G_{c2} \cdot x_{T2} + S_{2z} \cdot x_{T2} - R_{Ax} \cdot d + R_{Bx} \cdot (b+d)}{c} = 614.299 \text{ N}$$

$$R_{Cx} := R_{Dx} - R_{Bx} + R_{Ax} - S_{2x} = 467.851 \text{ N}$$

$$R_{Pz} := F_K + G_{c2} + S_{2z} = 2158.949 \text{ N}$$

$$F_o := R_{Pz} = 2158.949 \text{ N}$$

$$F_R := F_o \cdot \tan(\alpha) = 785.793 \text{ N}$$

$$R_{Dy} := \frac{R_{Pz} \cdot r + F_R \cdot p + S_{2y} \cdot z_{T2} + R_{By} \cdot (b+d) - R_{Ay} \cdot d}{c} = 1829.265 \text{ N}$$

$$R_{Cy} := R_{Dy} - F_R - S_{2y} - R_{By} + R_{Ay} = 640.74 \text{ N}$$

Created with

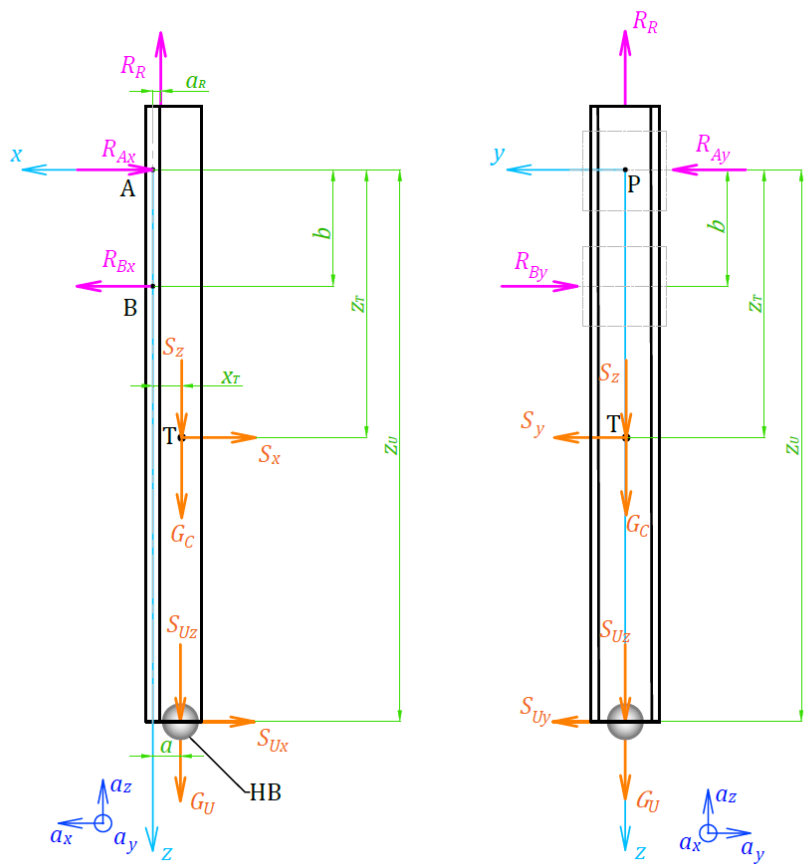
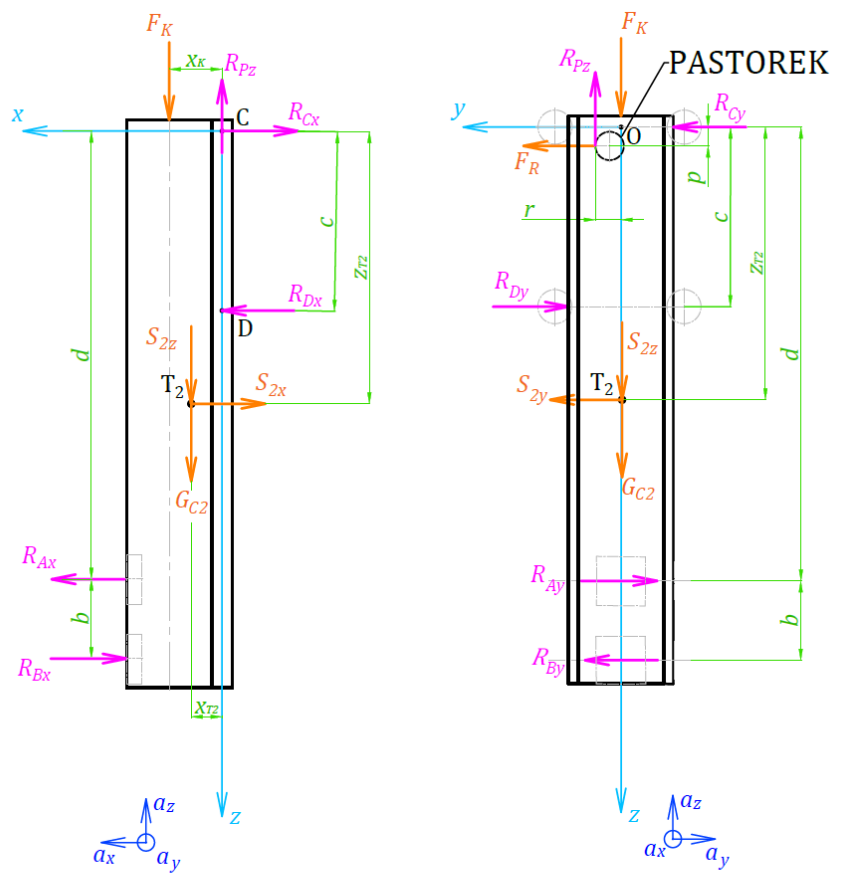


Schéma zatížení - pohyb ve směru X+Y+Z

ormation.

### 2.3.4.2 Příkladné zatížení lineárního vedení od setrvačných účinků

#### Rameno dolní

$$(\Sigma F_{iy} = 0; \quad S_y + S_{Uy} - R_{By} + R_{Ay} = 0)$$

$$\Sigma M_{iZ} = 0; \quad -M_A - M_B + S_y \cdot x_T + S_{Uy} \cdot a = 0$$

$$M_A = M_B$$

$$M_B := \frac{S_y \cdot x_T + S_{Uy} \cdot a}{2} = 3.161 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$M_A := M_B = 3.161 \text{ N} \cdot \text{m}$$

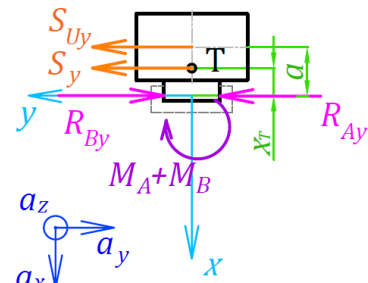


Schéma přidavného zatížení dolního ramena při zrychlení ve směru Y

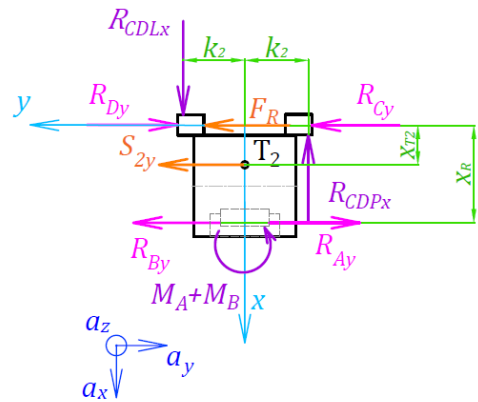


Schéma přidavného zatížení horního ramena při zrychlení ve směru Y

#### Rameno horní

$$\Sigma F_{ix} = 0;$$

$$(\Sigma F_{iy} = 0; \quad S_{2y} + F_R - R_{Dy} + R_{Cy} + R_{By} - R_{Ay} = 0)$$

$$\Sigma M_{iZ} = 0; \quad R_{CDLx} \cdot k_2 + R_{CDPx} \cdot k_2 + M_A + M_B - S_{2y} \cdot x_{T2} + R_{Ay} \cdot x_R - R_{By} \cdot x_R = 0$$

$$R_{CDLx} = R_{CDPx}$$

$$R_{CDLx} := \frac{-M_A - M_B + S_{2y} \cdot x_{T2} + R_{By} \cdot x_R - R_{Ay} \cdot x_R}{2 \cdot k_2} = 176.15 \text{ N}$$

$$R_{CDPx} := R_{CDLx} = 176.15 \text{ N}$$

### 2.3.4.3 Zatížení lineárního vedení HIWIN

$$M_A = 3.161 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$M_B = 3.161 \text{ N} \cdot \text{m}$$

#### Maximální zatížení

$$F_{Ax} := R_{Ax} = 334.342 \text{ N}$$

$$F_{Ay} := R_{Ay} = 1201.717 \text{ N}$$

$$F_{Axstat} := R_{Axstat} = 426.29 \text{ N}$$

$$F_{Bx} := R_{Bx} = 417.934 \text{ N}$$

$$F_{By} := R_{By} = 1431.595 \text{ N}$$

$$F_{Bxstat} := R_{Bxstat} = 509.882 \text{ N}$$

Podle katalogu výrobce byl vybrán výpočet ekvivalentního zatížení pro stálou změnu zatížení:

$$P_m = \frac{1}{3} \cdot (|P_{min}| + 2 \cdot |P_{max}|)$$

Výše jsou uvedena maximální zatížení vozíků. Je potřeba vypočítat minimální zatížení vozíků. Pro tento výpočet je uvažováno, že zrychlení jsou rovna 0 a bez zatížení od břemene. Vysunutí v ose Z v tomto případně neovlivňuje velikost reakční účinků.

### Rameno dolní - minimální zatížení

$$\Sigma F_{ix} = 0;$$

$$R_{Bxmin} - R_{Axmin} = 0$$

$$\Sigma F_{iy} = 0;$$

$$-R_{Bymin} + R_{Aymin} = 0$$

$$\Sigma F_{iz} = 0;$$

$$G_c - R_{Rmin} = 0$$

$$\Sigma M_{iA} = 0;$$

$$R_{Rmin} \cdot a_R - G_c \cdot x_T - R_{Bxmin} \cdot b = 0$$

$$R_{Rmin} := G_c = 159.878 \text{ N}$$

$$R_{Bxmin} := \frac{R_{Rmin} \cdot a_R - G_c \cdot x_T}{b} = -4.822 \text{ N}$$

$$R_{Bxstatmin} := R_{Bxmin} = -4.822 \text{ N}$$

$$R_{Axmin} := R_{Bxmin} = -4.822 \text{ N}$$

$$R_{Axstatmin} := R_{Axmin} = -4.822 \text{ N}$$

$$R_{Bymin} := 0 \text{ N}$$

$$R_{Aymin} := 0 \text{ N}$$

### Ekvivalentní zatížení pro nejvíce zatížený vozík B

$$P_{Bx} := \frac{1}{3} \cdot (|R_{Bxmin}| + 2 \cdot |F_{Bx}|) = 280.23 \text{ N}$$

$$P_{By} := \frac{1}{3} \cdot (|R_{Bymin}| + 2 \cdot |F_{By}|) = 954.397 \text{ N}$$

$$P_{SBx} := \frac{1}{3} \cdot (|R_{Bxstatmin}| + 2 \cdot |F_{Bxstat}|) = 341.529 \text{ N}$$

$$P_{SBy} := \frac{1}{3} \cdot (|R_{Bymin}| + 2 \cdot |F_{By}|) = 954.397 \text{ N}$$



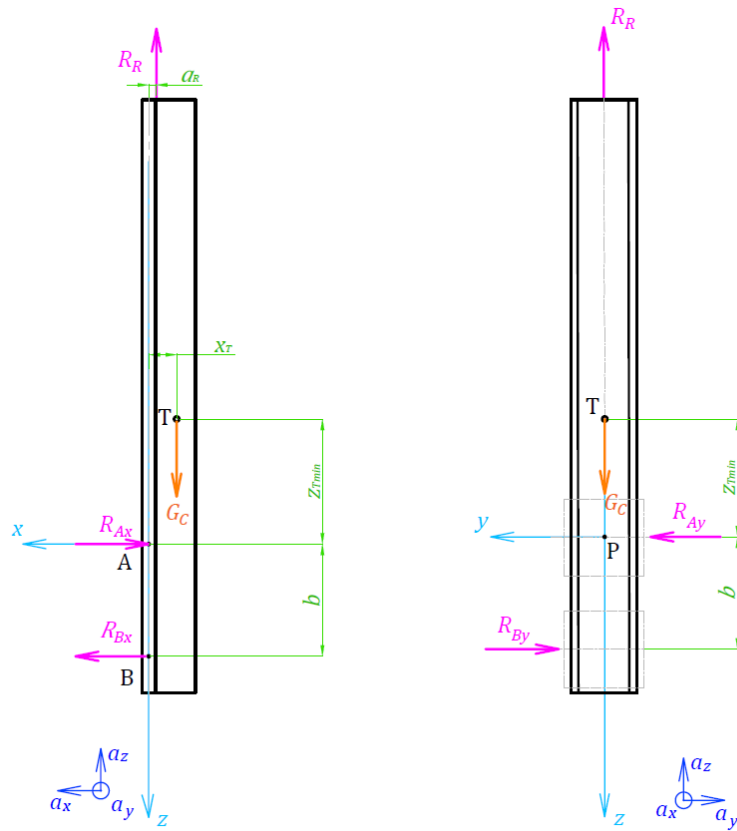


Schéma min. zatížení vozíků

### 2.3.4.4 Zatížení jednotlivých vodících kladek - osa Z

$$R_{CDLx} = 176.15 \text{ N} \quad F_a - \text{Axiální síla na vodící kladku}$$

$$R_{CDPx} = 176.15 \text{ N} \quad F_r - \text{Radiální síla na vodící kladku}$$

$$F_{aCL} := \frac{R_{Cx}}{2} - \frac{R_{CDLx}}{2} = 145.85 \text{ N}$$

$$F_{rCL} := 0 \text{ N}$$

$$F_{aCP} := \frac{R_{Cx}}{2} + \frac{R_{CDPx}}{2} = 322 \text{ N}$$

$$F_{rCP} := -R_{Cy} = -640.74 \text{ N}$$

$$F_{aDL} := -\frac{R_{Dx}}{2} - \frac{R_{CDLx}}{2} = -395.224 \text{ N}$$

$$F_{rDL} := R_{Dy} = 1829.265 \text{ N}$$

$$F_{aDP} := -\frac{R_{Dx}}{2} + \frac{R_{CDPx}}{2} = -219.074 \text{ N}$$

$$F_{rDP} := 0 \text{ N}$$

### 2.3.4.5 Reakční účinky - Pojezd

Pomocí hmotnostní analýzy byl pojezd nahrazen hmotným bodem, který v sobě zahrnuje hlavní části, jako motory s převodovkami, držák příslušenství, vodící kladky a základní desku.

Rozměrové parametry

$$h := 188.7 \text{ mm}$$

$$h_2 := 251.3 \text{ mm}$$

$$j := 284.2 \text{ mm}$$

$$p = 6 \text{ mm}$$

$$r_k := 28.8 \text{ mm}$$

$$r_p := 53.685 \text{ mm}$$

$$r_{p2} := 155.585 \text{ mm}$$

$$s := 130.2 \text{ mm}$$

$$x_{Tp} := 37.6 \text{ mm}$$

$$y_{Tp} := 2.36 \text{ mm}$$

$$z_{Tp} := 22.6 \text{ mm}$$

$$w := 30.5 \text{ mm}$$

Hmotnost pojezdu

$$m_p := 59.979 \text{ kg}$$

### Zatížení od hmotnosti

$$G_p := m_p \cdot g = 588.193 \text{ N}$$

### Setrvačné účinky

$$S_{px} := m_p \cdot a_x = 119.958 \text{ N}$$

$$S_{py} := m_p \cdot a_y = 329.885 \text{ N}$$

### Reakce

$$\Sigma F_{ixXZ} = 0; \quad |F_{aCL}| + |F_{aCP}| - (|F_{aDL}| + |F_{aDP}|) + R_{EFD} - R_{EFH} - S_{px} = 0$$

$$\Sigma F_{izXZ} = 0; \quad R_{Pz} + G_p + R_{Ez} - R_{Fz} = 0$$

$$\Sigma M_{iy} = 0; \quad (R_{Pz} - R_{Ez} + R_{Fz}) \cdot w - G_p \cdot x_{Tp} + S_{px} \cdot z_{Tp} - R_{EFD} \cdot j \downarrow + R_{EFH} \cdot s + (|F_{aDL}| + |F_{aDP}|) \cdot c = 0$$

$$\Sigma F_{iyYZ} = 0; \quad -R_{Py} - F_R + S_{py} - |F_{rCP}| + |F_{rDL}| = 0$$

$$(\Sigma F_{izYZ} = 0; \quad R_{Pz} + G_p + R_{Ez} - R_{Fz} = 0)$$

$$\Sigma M_{ix} = 0; \quad R_{Py} \cdot r_{p2} + R_{Ez} \cdot h + R_{Fz} \cdot h_2 + F_R \cdot p - S_{py} \cdot z_{Tp} \downarrow - G_p \cdot y_{Tp} - |F_{rDL}| \cdot c - R_{Pz} \cdot r_p = 0$$

$$\begin{aligned}
\Sigma F_{ixXY} &= 0; & (\left|F_{aCL}\right| - \left|F_{aDL}\right|) + (\left|F_{aCP}\right| - \left|F_{aDP}\right|) - R_{Ex} - R_{Fx} - S_{px} &= 0 \\
(\Sigma F_{iyXY} &= 0; & -R_{Py} - F_R + S_{py} - \left|F_{rCP}\right| + \left|F_{rDL}\right| &= 0) \\
\Sigma M_{iz} &= 0; & (\left|F_{rCP}\right| - \left|F_{rDL}\right| - R_{Py} + F_R) \cdot w + S_{py} \cdot x_{Tp} + S_{px} \cdot y_{Tp} - R_{Ex} \cdot h \downarrow &= 0 \\
& & + R_{Fx} \cdot h_2 - (\left|F_{aCL}\right| - \left|F_{aDL}\right|) \cdot r_k - (\left|F_{aCP}\right| - \left|F_{aDP}\right|) \cdot (r_k + 2 \cdot k_2) &
\end{aligned}$$

$$R_{Fz} = R_{Pz} + G_p + R_{Ez}$$

$$R_{Py} := -F_R + S_{py} - \left|F_{rCP}\right| + \left|F_{rDL}\right| = 732.616 \text{ N}$$

$$\begin{aligned}
R_{Py} \cdot r_{p2} + R_{Ez} \cdot h + R_{Ez} \cdot h_2 + (R_{Pz} + G_p) \cdot h_2 + F_R \cdot p \downarrow &= 0 \\
-S_{py} \cdot z_{Tp} - G_p \cdot y_{Tp} - \left|F_{rDL}\right| \cdot c - R_{Pz} \cdot r_p &
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - (R_{Py} \cdot r_{p2}) - (R_{Pz} + G_p) \cdot h_2 - F_R \cdot p \downarrow \\
R_{Ez} := \frac{+ S_{py} \cdot z_{Tp} + G_p \cdot y_{Tp} + \left|F_{rDL}\right| \cdot c + R_{Pz} \cdot r_p}{h + h_2} &= -241.503 \text{ N}
\end{aligned}$$

$$R_{Fz} := R_{Pz} + G_p + R_{Ez} = 2505.639 \text{ N}$$

$$R_{Fx} = (\left|F_{aCL}\right| - \left|F_{aDL}\right|) + (\left|F_{aCP}\right| - \left|F_{aDP}\right|) - R_{Ex} - S_{px}$$

$$\begin{aligned}
& (\left|F_{rCP}\right| - \left|F_{rDL}\right| - R_{Py} + F_R) \cdot w + S_{py} \cdot x_{Tp} + S_{px} \cdot y_{Tp} - R_{Ex} \cdot h \downarrow = 0 \\
& + ((\left|F_{aCL}\right| - \left|F_{aDL}\right|) + (\left|F_{aCP}\right| - \left|F_{aDP}\right|) - S_{px}) \cdot h_2 - R_{Ex} \cdot h_2 \downarrow \\
& - (\left|F_{aCL}\right| - \left|F_{aDL}\right|) \cdot r_k - (\left|F_{aCP}\right| - \left|F_{aDP}\right|) \cdot (r_k + 2 \cdot k_2)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& (\left|F_{rCP}\right| - \left|F_{rDL}\right| - R_{Py} + F_R) \cdot w + S_{py} \cdot x_{Tp} + S_{px} \cdot y_{Tp} \downarrow \\
& + ((\left|F_{aCL}\right| - \left|F_{aDL}\right|) + (\left|F_{aCP}\right| - \left|F_{aDP}\right|) - S_{px}) \cdot h_2 \downarrow \\
R_{Ex} := \frac{- (\left|F_{aCL}\right| - \left|F_{aDL}\right|) \cdot r_k - (\left|F_{aCP}\right| - \left|F_{aDP}\right|) \cdot (r_k + 2 \cdot k_2)}{h + h_2} &= -219.336 \text{ N}
\end{aligned}$$

$$R_{Fx} := (\left|F_{aCL}\right| - \left|F_{aDL}\right|) + (\left|F_{aCP}\right| - \left|F_{aDP}\right|) - R_{Ex} - S_{px} = -47.07 \text{ N}$$

$$R_{EFD} = -\left|F_{aCL}\right| - \left|F_{aCP}\right| + (\left|F_{aDL}\right| + \left|F_{aDP}\right|) + R_{EFH} + S_{px}$$

$$\begin{aligned}
(R_{Pz} - R_{Ez} + R_{Fz}) \cdot w - G_p \cdot x_{Tp} + S_{px} \cdot z_{Tp} \downarrow &= 0 \\
- (\left|F_{aCL}\right| - \left|F_{aCP}\right| + (\left|F_{aDL}\right| + \left|F_{aDP}\right|) + S_{px}) \cdot j - R_{EFH} \cdot j \downarrow \\
+ R_{EFH} \cdot s + (\left|F_{aDL}\right| + \left|F_{aDP}\right|) \cdot c &
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& (R_{Pz} - R_{Ez} + R_{Fz}) \cdot w - G_p \cdot x_{Tp} + S_{px} \cdot z_{Tp} \downarrow \\
& - (\left|F_{aCL}\right| - \left|F_{aCP}\right| + (\left|F_{aDL}\right| + \left|F_{aDP}\right|) + S_{px}) \cdot j \downarrow \\
R_{EFH} := \frac{+ (\left|F_{aDL}\right| + \left|F_{aDP}\right|) \cdot c}{j - s} &= 1614.524 \text{ N}
\end{aligned}$$

$$R_{EFD} := -\left|F_{aCL}\right| - \left|F_{aCP}\right| + (\left|F_{aDL}\right| + \left|F_{aDP}\right|) + R_{EFH} + S_{px} = 1880.929 \text{ N}$$

### 2.3.4.6 Zatížení jednotlivých vodících kladek - pojezd

$$R_{EH} = -219.336 \text{ N} \quad R_{EFH} = 1614.524 \text{ N} \quad F_a - \text{Axiální síla na vodící kladku}$$

$$R_{FH} = -47.07 \text{ N} \quad R_{EFD} = 1880.929 \text{ N} \quad F_r - \text{Radiální síla na vodící kladku}$$

$$F_{aEH} := \frac{R_{EH}}{2} - \frac{R_{EFH}}{2} = -697.594 \text{ N} \quad F_{rEH} := R_{Ez} = -241.503 \text{ N}$$

$$F_{aED} := -\frac{R_{EH}}{2} + \frac{R_{EFD}}{2} = 1050.133 \text{ N} \quad F_{rED} := 0 \text{ N}$$

$$F_{aFH} := -\frac{R_{FH}}{2} - \frac{R_{EFH}}{2} = -783.727 \text{ N} \quad F_{rFH} := -R_{Fz} = -2505.639 \text{ N}$$

$$F_{aFD} := -\frac{R_{FH}}{2} + \frac{R_{EFD}}{2} = 964 \text{ N} \quad F_{rFD} := 0 \text{ N}$$

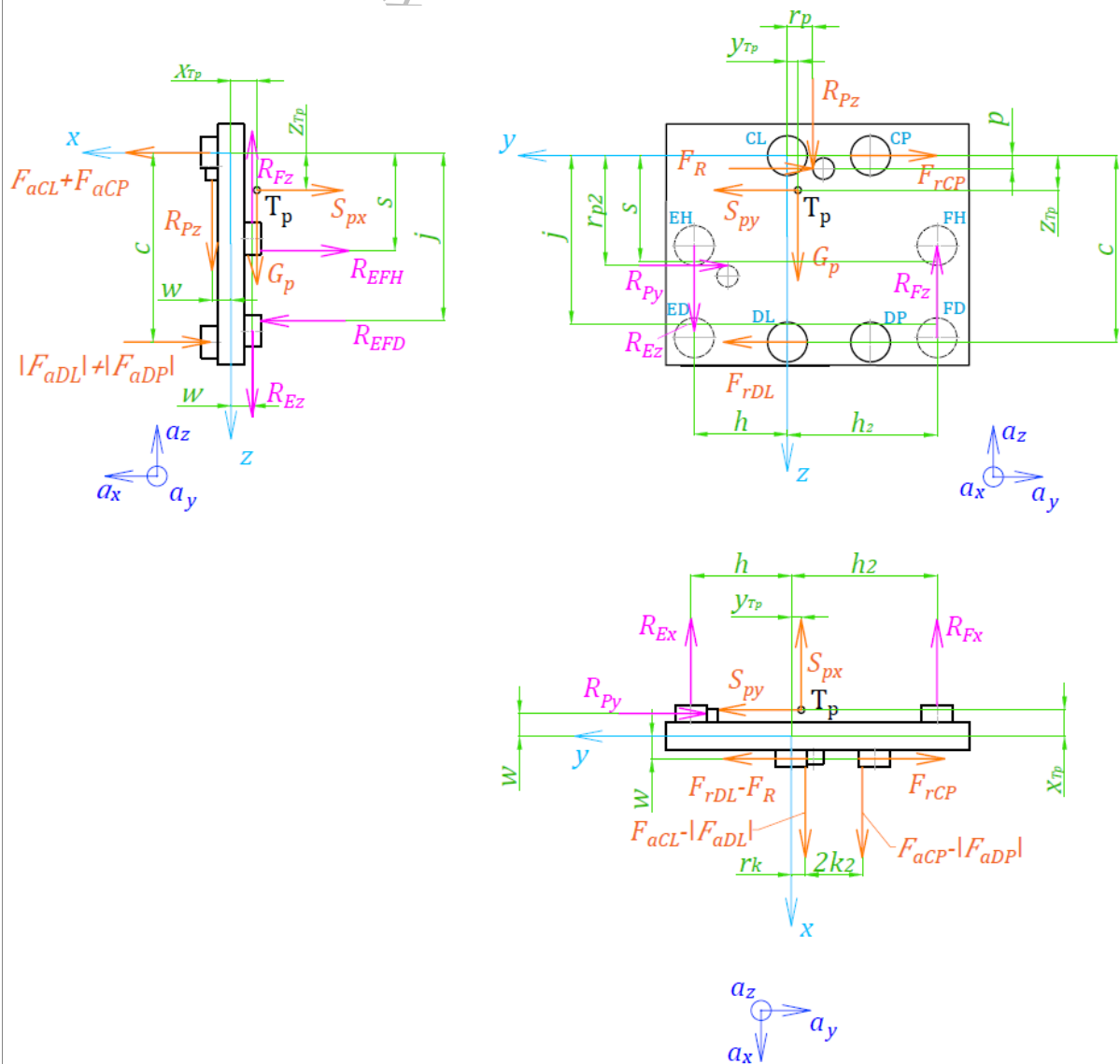


Schéma zatížení - pojezd - pohyb ve směru X+Y+Z

### 2.3.4.7 Kontrola lineárního vedení HIWIN - WEH35CA

Zátěžový faktor zvolen dle rychlosti

$$f_w := 1.5$$

$$C_{dyn} := 29800 \text{ N}$$

$C_{dyn}$  – Dynamická únosnost

$$C_0 := 49400 \text{ N}$$

$C_0$  – Statická únosnost

$$M_x := 893 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$M_x$  – Přípustný dynamický moment

$$M_{0x} := 1480 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$M_{0x}$  – Přípustný statický moment

$$P_{Bx} = 280.23 \text{ N}$$

$P$  – Ekvivalentní dynamické zatížení

$$P_{By} = 954.397 \text{ N}$$

$P_S$  – Ekvivalentní statické zatížení

$$P_{SBx} = 341.529 \text{ N}$$

$f_{SL}$  – Statická konstr. bezpečnost

$$P_{SBY} = 954.397 \text{ N}$$

$f_M$  – Faktor dyn. bezpečnost  
pro zatěžování krutem

$$L_{Bx} := \left( \frac{C_{dyn}}{f_w \cdot P_{Bx}} \right)^3 \cdot 50 \text{ km} = (1.782 \cdot 10^{-10}) \text{ m}$$

$L$  – Jmenovitá životnost

$$L_{By} := \left( \frac{C_{dyn}}{f_w \cdot P_{By}} \right)^3 \cdot 50 \text{ km} = (4.51 \cdot 10^{-8}) \text{ m}$$

$$f_{SLx} := \frac{C_0}{P_{SBx}} = 144.644$$

**VYHOVUJE**

$$f_{SLy} := \frac{C_0}{P_{SBY}} = 51.76$$

**VYHOVUJE**

$$f_{SM} := \frac{M_{0x}}{M_B} = 468.249$$

**VYHOVUJE**

$$f_M := \frac{M_x}{M_B} = 282.531$$

**VYHOVUJE**

### 2.3.4.8 Kontrola vodících kladek

Servisní koeficient zvolen  $f := 1.2$

$$C_{W20} := 4730 \text{ N} \quad C_{0W20} := 9500 \text{ N}$$

$C_{0W}$  – max. statická radiální síla

#### FR20 - osa Z

$$P_{DL} := |F_{rDL}| + 3 \cdot |F_{aDL}| = 3014.938 \text{ N}$$

$P$  – Ekvivalentní dynamické zatížení

$$P_{DLW} := f \cdot P_{DL} = 3617.925 \text{ N}$$

$P_W$  – Efektivní zatížení

$$L_S := \left( \frac{C_{W20}}{P_{DLW}} \right)^3 \cdot 10^7 = 2.235 \cdot 10^7 \text{ m}$$

$L_S$  – Nominální životnost

$f$  – Servisní koeficient

$f_S$  – Koeficient statického zatížení

$$f_{SDL} := 0.7 \cdot \frac{C_{0W20}}{f \cdot (|F_{rDL}| + 3 \cdot |F_{aDL}|)} = 1.838$$

$\geq 1 \Rightarrow$  **VYHOVUJE**

#### FR20 - pojezd

$$P_{FH} := |F_{rFH}| + 3 \cdot |F_{aFH}| = 4856.82 \text{ N}$$

$$P_{FHW} := f \cdot P_{FH} = 5828.184 \text{ N}$$

$$L_S := \left( \frac{C_{W20}}{P_{FHW}} \right)^3 \cdot 10^7 = 5.345 \cdot 10^6 \text{ m}$$

$$f_{SFH} := 0.7 \cdot \frac{C_{0W20}}{f \cdot (|F_{rFH}| + 3 \cdot |F_{aFH}|)} = 1.141$$

$\geq 1 \Rightarrow$  **VYHOVUJE**

### 3 Předepnutí šroubových spojů

Předepnutí bylo počítáno nejprve z utahovacích momentů udávaných výrobcem. Následně byla provedena kontrola závitů na otláčení. V případě, že byl tlak v závitu větší než dovolený, tak byla předepínací síla vypočítána z dovoleného tlaku.

#### 3.1 Varianta A1

##### 3.1.1 Dolní rameno

##### Závit M6 v profilu z EN-AW 6060

Utahovací moment dle Güdel  $M_U := 9 \text{ N}\cdot\text{m}$

Stoupání  $p_h := 1 \text{ mm}$

Střední průměr  $d_2 := 5.35 \text{ mm}$

Průměr hlavy šroubu  $d_k := 10 \text{ mm}$

Průměr otvoru pro šroub  $D_o := 7 \text{ mm}$

Součinitel tření pod hlavou  $f_h := 0.12$   $f_h = \tan \varphi_h$

Součinitel tření v závitu  $f_z := 0.12$   $f_z = \tan \varphi_z$

$\varphi_z := \text{atan}(f_z) = 6.843^\circ$

$\varphi_z$  – Třecí úhel v závitu

$\varphi_h := \text{atan}(f_h) = 6.843^\circ$

$\varphi_h$  – Třecí úhel pod hlavou

$M_U = M_Z + M_H$

$F_p$  – Předepínací síla

$M_Z = 0.5 \cdot d_2 \cdot F_t$

$M_Z$  – Moment třecího odporu v závitu

$M_H = 0.5 \cdot d_s \cdot F_p \cdot f_h$

$M_H$  – Moment třecího odporu pod hlavou

$F_t = F_p \cdot \tan(\alpha + \varphi_z)$

$F_t$  – Třecí síla v závitu

$\alpha := \text{atan}\left(\frac{p_h}{\pi \cdot d_2}\right) = 3.405^\circ$

$\alpha$  – Úhel stoupání

$d_s := \frac{D_o + d_k}{2} = 8.5 \text{ mm}$

$d_s$  – Střední průměr dosedací plochy

$M_U = 0.5 \cdot F_p \cdot (d_2 \cdot \tan(\alpha + \varphi_z) + d_s \cdot f_h)$

$$F_p := \frac{M_U}{0.5 \cdot (d_2 \cdot \tan(\alpha + \varphi_z) + d_s \cdot f_h)} = 9057.9 \text{ N}$$

### Kontrola závitu na otláčení

Dovolený tlak pro hliníkové slitiny  $p_D := 40 \text{ MPa}$

Výška závitu  $L_z := 7.5 \text{ mm}$

Styková výška závitu  $H := 0.541 \text{ mm}$

Počet závitů  $n := \frac{L_z}{p_h} = 7.5$

Koeficient pro spojovací šrouby se uvádí 0,5

$$p_Z := \frac{F_p}{0.5 \cdot n \cdot \pi \cdot d_2 \cdot H} = 265.641 \text{ MPa}$$

**NEVYHOVUJE**

$$F_{pD} := p_D \cdot 0.5 \cdot n \cdot \pi \cdot d_2 \cdot H = 1363.93 \text{ N}$$

$F_p$  – Předepínací síla z dovoleného tlaku

### 3.1.2 Horní rameno

#### Závit M8 v profilu z EN-AW 6060

Utahovací moment dle Güdel  $M_U := 21.6 \text{ Nm}$

Stoupání  $p_h := 1.25 \text{ mm}$

Střední průměr  $d_2 := 7.188 \text{ mm}$

Průměr hlavy šroubu  $d_k := 13 \text{ mm}$

Průměr otvoru pro šroub  $D_o := 9 \text{ mm}$

Součinitel tření pod hlavou  $f_h := 0.12$   $f_h = \tan \varphi_h$

Součinitel tření v závitu  $f_z := 0.12$   $f_z = \tan \varphi_z$

$$\varphi_z := \text{atan}(f_z) = 6.843^\circ$$

$\varphi_z$  – Třecí úhel v závitu

$$\varphi_h := \text{atan}(f_h) = 6.843^\circ$$

$\varphi_h$  – Třecí úhel pod hlavou

$$M_U = M_Z + M_H$$

$F_p$  – Předepínací síla

$$M_Z = 0.5 \cdot d_2 \cdot F_t$$

$M_Z$  – Moment třecího odporu v závitu



$$M_h = 0.5 \cdot d_s \cdot F_p \cdot f_h$$

$M_H$  – Moment třecího odporu pod hlavou

$$F_t = F_p \cdot \tan(\alpha + \varphi_z)$$

$F_t$  – Třecího síla v závitu

$$\alpha := \arctan\left(\frac{p_h}{\pi \cdot d_2}\right) = 3.168^\circ$$

$\alpha$  – Úhel stoupání

$$d_s := \frac{D_o + d_k}{2} = 11 \text{ mm}$$

$d_s$  – Střední průměr dosedací plochy

$$M_U = 0.5 \cdot F_p \cdot (d_2 \cdot \tan(\alpha + \varphi_z) + d_s \cdot f_h)$$

$$F_p := \frac{M_U}{0.5 \cdot (d_2 \cdot \tan(\alpha + \varphi_z) + d_s \cdot f_h)} = 16686.779 \text{ N}$$

### Kontrola závitu na otláčení

Dovolený tlak pro hliníkové slitiny  $p_D := 40 \text{ MPa}$

Výška závitu  $L_z := 11 \text{ mm}$

Styková výška závitu  $H := 0.677 \text{ mm}$

Počet závitů  $n := \frac{L_z}{p_h} = 8.8$

Koeficient pro spojovací šrouby se uvádí 0,5

$$p_z := \frac{F_p}{0.5 \cdot n \cdot \pi \cdot d_2 \cdot H} = 248.069 \text{ MPa}$$

**NEVYHOVUJE**

$$F_{pD} := p_D \cdot 0.5 \cdot n \cdot \pi \cdot d_2 \cdot H = 2690.663 \text{ N}$$

$F_p$  – Předepínací síla z dovoleného tlaku

## 3.2 Varianta B

### 3.2.1 Dolní rameno

#### Dovolený tlak ve styku lišty a drážky profilu

|                                  |                            |
|----------------------------------|----------------------------|
| Počet stykových ploch            | $i_s := 4$                 |
| Šířka stykové plochy             | $b_s := 2.6 \text{ mm}$    |
| Délka stykové plochy             | $l_s := 1000 \text{ mm}$   |
| Dovolený tlak na stykovou plochu | $p_{Ds} := 40 \text{ MPa}$ |
| Počet šroubů                     | $i_b := 26$                |

$$F_s := p_{Ds} \cdot i_s \cdot b_s \cdot l_s = 416000 \text{ N} \quad F_s - \text{Celková dovolená síla na stykovou plochu}$$

$$F_b := \frac{F_s}{i_b} = 16000 \text{ N} \quad F_b - \text{Síla na 1 šroub}$$

#### Kontrola závitu M6 v ocelové liště na otláčení

|                        |                              |
|------------------------|------------------------------|
| Stoupání               | $p_h := 1 \text{ mm}$        |
| Střední průměr         | $d_2 := 5.35 \text{ mm}$     |
| Dovolený tlak pro ocel | $p_D := 150 \text{ MPa}$     |
| Výška závitu           | $L_z := 9.5 \text{ mm}$      |
| Styková výška závitu   | $H := 0.541 \text{ mm}$      |
| Počet závitů           | $n := \frac{L_z}{p_h} = 9.5$ |

Koeficient pro spojovací šrouby se uvádí 0,5

$$F_p := F_b = 16000 \text{ N}$$

$$p_z := \frac{F_p}{0.5 \cdot n \cdot \pi \cdot d_2 \cdot H} = 370.446 \text{ MPa}$$

**NEVYHOVUJE**

$$F_{pD} := p_D \cdot 0.5 \cdot n \cdot \pi \cdot d_2 \cdot H = 6478.669 \text{ N} \quad F_p - \text{Předepínací síla z dovoleného tlaku}$$

dle briol.cz je povolená předepínací síla pro šroub M6 8.8 je 8302 N => **VYHOVUJE**

### 3.2.2 Horní rameno

#### Závít M8 v oceli

Utahovací moment dle Güdel  $M_U := 21.6 \text{ N}\cdot\text{m}$

Stoupání  $p_h := 1.25 \text{ mm}$

Střední průměr  $d_2 := 7.188 \text{ mm}$

Průměr hlavy šroubu  $d_k := 13 \text{ mm}$

Průměr otvoru pro šroub  $D_o := 9 \text{ mm}$

Součinitel tření pod hlavou  $f_h := 0.12$   $f_h = \tan \varphi_h$

Součinitel tření v závitu  $f_z := 0.12$   $f_z = \tan \varphi_z$

$\varphi_z := \text{atan}(f_z) = 6.843^\circ$   $\varphi_z$  – Třecí úhel v závitu

$\varphi_h := \text{atan}(f_h) = 6.843^\circ$   $\varphi_h$  – Třecí úhel pod hlavou

$M_U = M_Z + M_H$   $F_p$  – Předepínací síla

$M_Z = 0.5 \cdot d_2 \cdot F_t$   $M_Z$  – Moment třecího odporu v závitu

$M_h = 0.5 \cdot d_s \cdot F_p \cdot f_h$   $M_H$  – Moment třecího odporu pod hlavou

$F_t = F_p \cdot \tan(\alpha + \varphi_z)$   $F_t$  – Třecího síla v závitu

$\alpha := \text{atan}\left(\frac{p_h}{\pi \cdot d_2}\right) = 3.168^\circ$   $\alpha$  – Úhel stoupání

$d_s := \frac{D_o + d_k}{2} = 11 \text{ mm}$   $d_s$  – Střední průměr dosedací plochy

$M_U = 0.5 \cdot F_p \cdot (d_2 \cdot \tan(\alpha + \varphi_z) + d_s \cdot f_h)$

$F_p := \frac{M_U}{0.5 \cdot (d_2 \cdot \tan(\alpha + \varphi_z) + d_s \cdot f_h)} = 16686.779 \text{ N}$

#### Kontrola závitu na otlačení - profil

Dovolený tlak pro ocel  $p_D := 150 \text{ MPa}$

Výška závitu  $L_z := 7.5 \text{ mm}$

Styková výška závitu  $H := 0.677 \text{ mm}$

Počet závitů

$$n := \frac{L_z}{p_h} = 6$$

Koeficient pro spojovací šrouby se uvádí 0,5

$$p_z := \frac{F_p}{0,5 \cdot n \cdot \pi \cdot d_2 \cdot H} = 363,835 \text{ MPa}$$

**NEVYHOVUJE**

$$F_{pD} := p_D \cdot 0,5 \cdot n \cdot \pi \cdot d_2 \cdot H = 6879,536 \text{ N} \quad F_p - \text{Předeřinací síla z dovoleného tlaku}$$

### Kontrola závitu na otláčení - bloky

Dovolený tlak pro ocel

$$p_D := 150 \text{ MPa}$$

Výška závitu

$$L_z := 20 \text{ mm}$$

Styková výška závitu

$$H := 0,677 \text{ mm}$$

Počet závitů

$$n := \frac{L_z}{p_h} = 16$$

Koeficient pro spojovací šrouby se uvádí 0,5

$$p_z := \frac{F_p}{0,5 \cdot n \cdot \pi \cdot d_2 \cdot H} = 136,438 \text{ MPa}$$

**VYHOVUJE**

## **PŘÍLOHA č. 2**

### **Výpočty MKP**

# Obsah

|          |                               |           |
|----------|-------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Výpočet MKP</b> .....      | <b>1</b>  |
| 1.1      | Varianta A1 .....             | 1         |
| 1.1.1    | Profily samostatně .....      | 1         |
| 1.1.1.1  | Rameno dolní .....            | 1         |
| 1.1.1.2  | Rameno horní .....            | 5         |
| 1.1.1.3  | Zhodnocení výsledků .....     | 8         |
| 1.1.2    | Kontaktní úloha .....         | 8         |
| 1.1.2.1  | Rameno dolní .....            | 8         |
| 1.1.2.2  | Rameno horní .....            | 12        |
| 1.1.2.3  | Zhodnocení výsledků .....     | 15        |
| 1.2      | Varianta B .....              | 16        |
| 1.2.1    | Kontaktní úloha .....         | 16        |
| 1.2.1.1  | Rameno dolní .....            | 16        |
| 1.2.1.2  | Rameno horní .....            | 19        |
| 1.2.1.3  | Zhodnocení výsledků .....     | 21        |
| 1.2.2    | Celková kontaktní úloha ..... | 21        |
| 1.2.2.1  | Konstrukční úprava .....      | 24        |
| 1.2.2.2  | Zhodnocení výsledků .....     | 26        |
|          | <b>Seznam obrázků</b> .....   | <b>27</b> |
|          | <b>Seznam tabulek</b> .....   | <b>28</b> |

# 1 Výpočet MKP

Společné okrajové podmínky pro tento výpočet jsou popsány v kapitole 5 v hlavní části diplomové práce.

## 1.1 Varianta A1

Materiálové parametry pro variantu A1 jsou definovány v kapitole 5.1 v hlavní části diplomové práce (Tabulka 17).

### 1.1.1 Profily samostatně

#### 1.1.1.1 Rameno dolní

#### Výpočtové modely

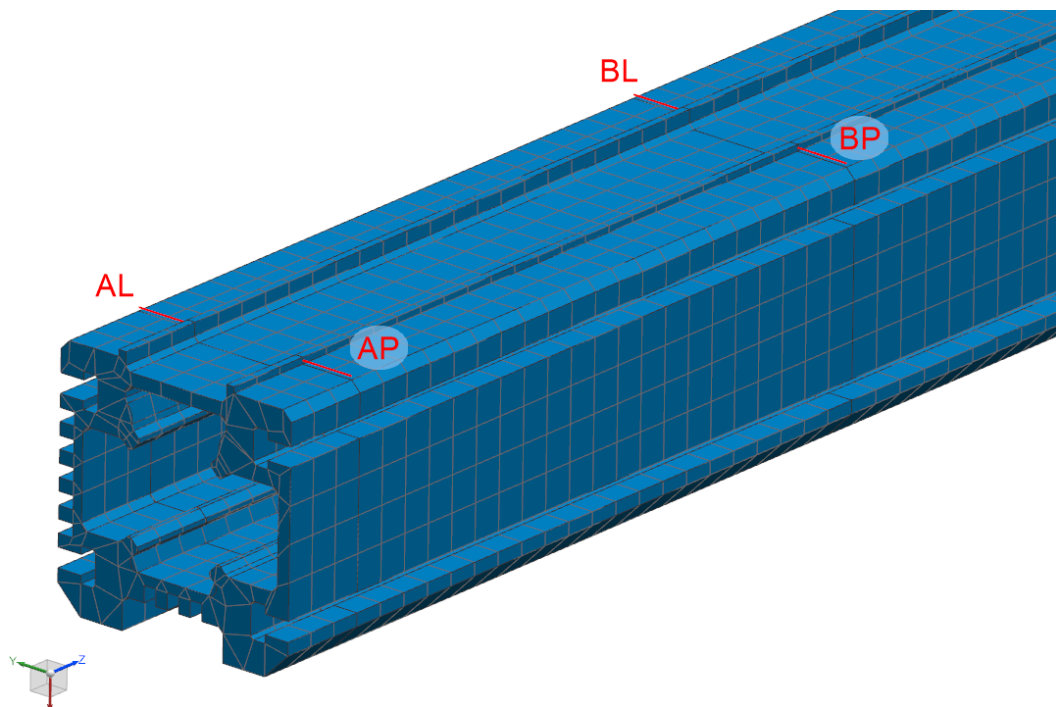
Vstupním modelem pro výpočet profilu dolního ramena varianty A1 pomocí MKP byl profil konstantního průřezu, tzn. model bez otvorů pro šrouby. Plochy, ke kterým jsou přitaženy kolejnice, byly na úrovni idealizovaného dílu rozděleny, aby vznikly hrany pro vytvoření vazeb. Poloha vzniklých hran odpovídá poloze styku kolejnic s vodícími kladkami.

#### Tvorba sítě

Model byl zasít'ován taženou sítí pomocí prvků CHEXA(8) s velikostí prvku 10 mm.

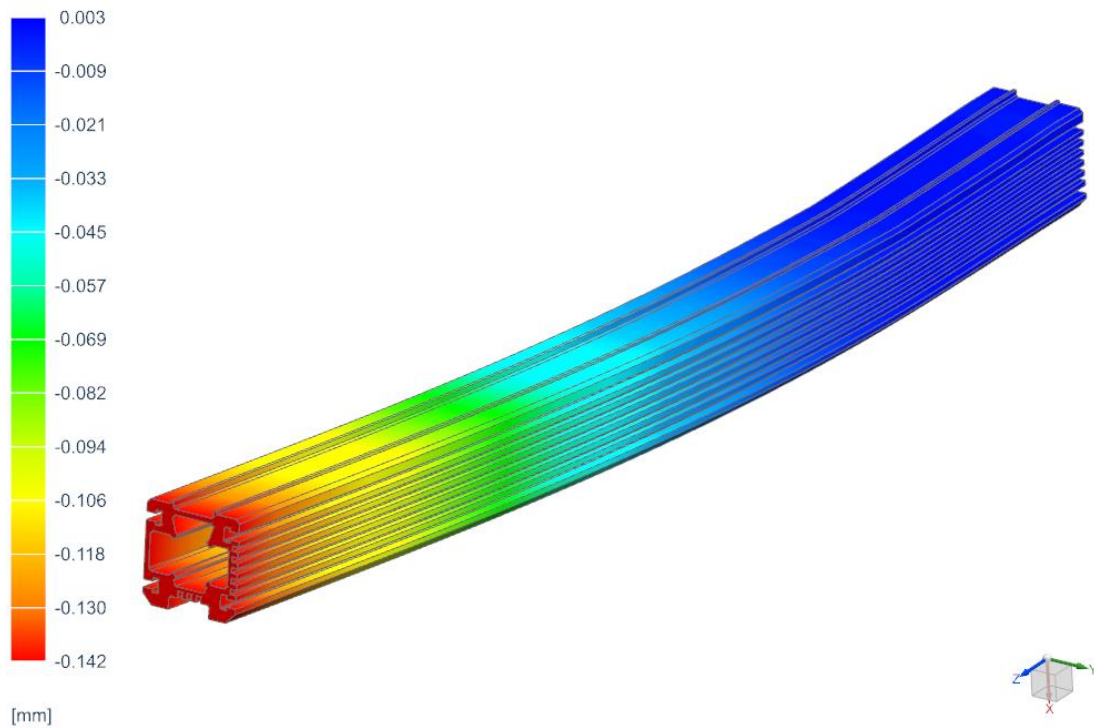
#### Okrajové podmínky

Hrany, které vznikly na dosedací ploše pro kolejnici, posloužily k vytvoření vazeb (viz Obrázek 1). Vazby AL a AP byly definovány jako vazby, které zamezují posuvu ve 3 směrech, ale umožňují natočení. Vazby BL a BP byly definovány jako vazby, které zamezují posuvu ve směru X a Y, ale umožňují posuv ve směru Z a natočení. Indexování vazeb vychází z indexů vodících kladek (viz Obrázek 29 v hlavní části diplomové práce). Použitím idealizovaných vazeb představujících čárový styk mohou v okolí vazeb vycházet zkreslené hodnoty.



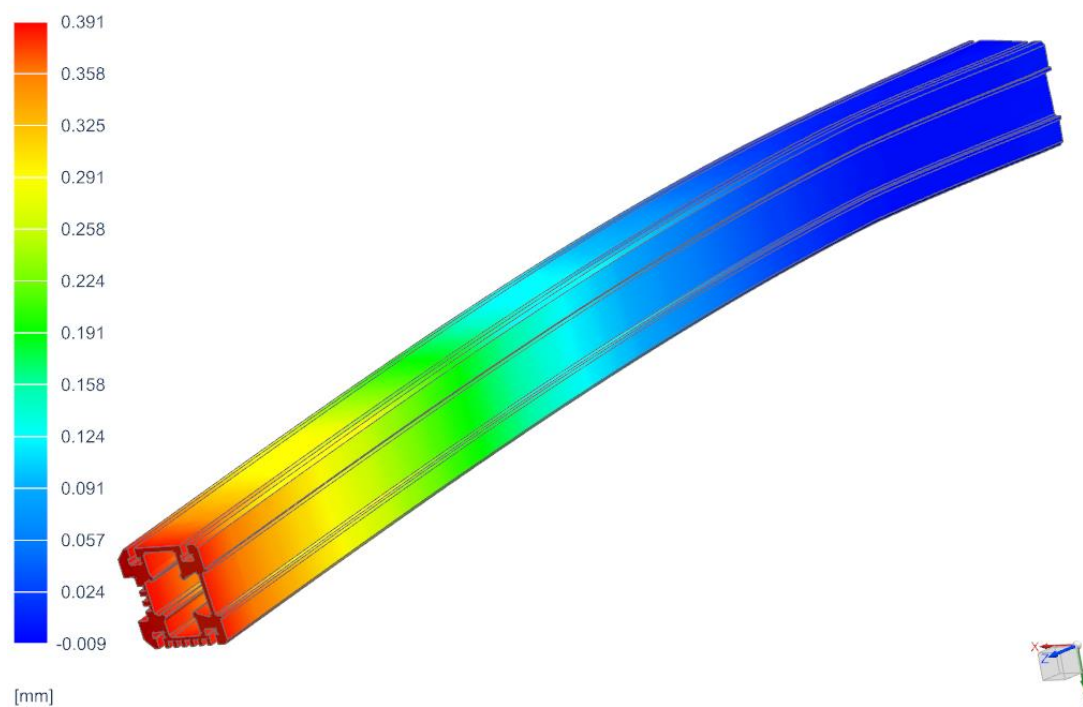
Obrázek 1 - Vazby - Varianta A1 - Profil dolní





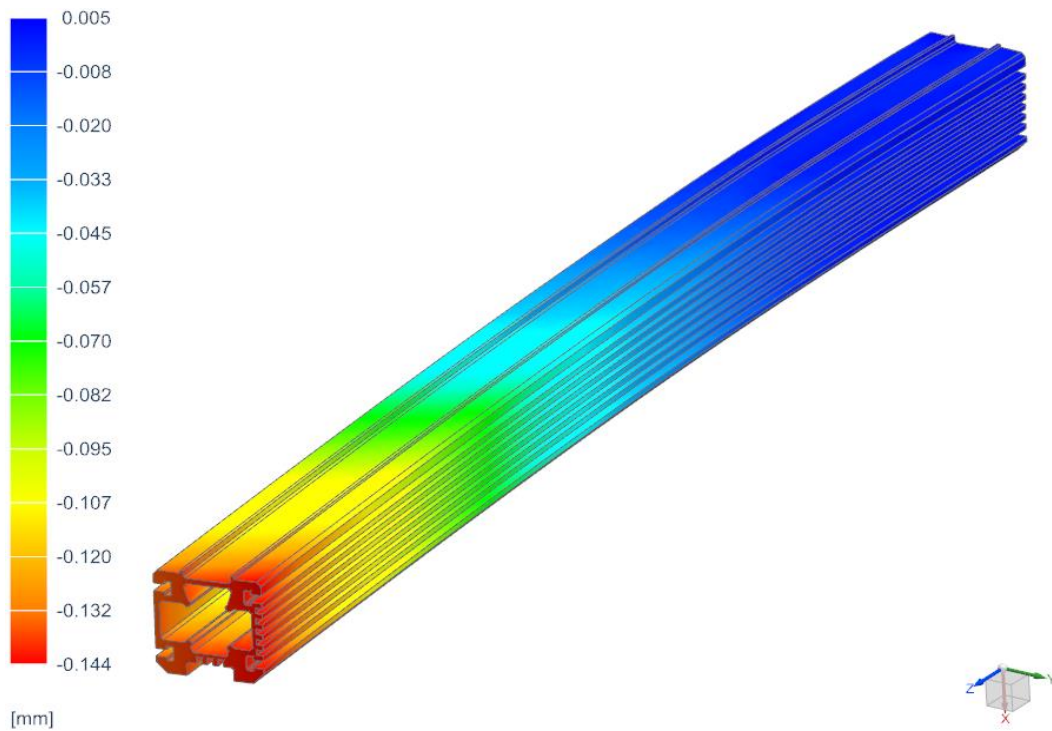
*Obrázek 2 - Posuv v X - Pohyb v X - Varianta A1 - Profil dolní*

Obrázek 2 zobrazuje posuv ve směru X při pohybu ve směru X u dolního profilu varianty A1.



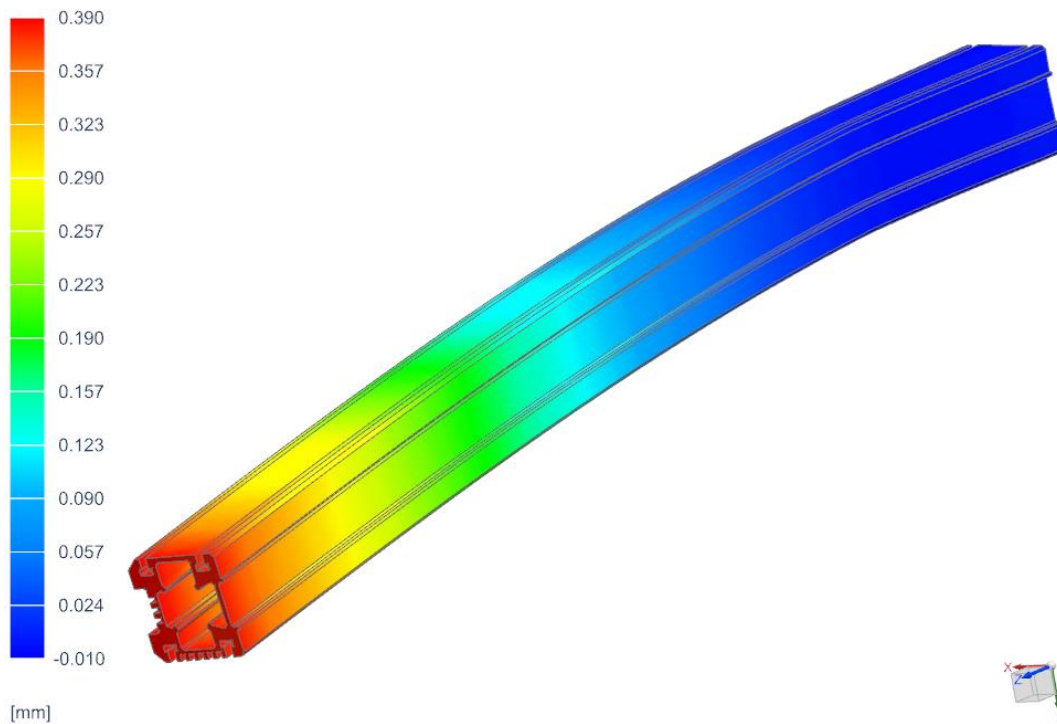
*Obrázek 3 - Posuv v Y - Pohyb v Y - Varianta A1 - Profil dolní*

Obrázek 3 zobrazuje posuv ve směru Y při pohybu ve směru Y u dolního profilu varianty A1.



Obrázek 4 - Posuv v X - Pohyb v X+Y+Z - Varianta A1 - Profil dolní

Obrázek 4 zobrazuje posuv ve směru X při pohybu ve směru X+Y+Z u dolního profilu varianty A1.



Obrázek 5 - Posuv v Y - Pohyb v X+Y+Z - Varianta A1 - Profil dolní

Obrázek 5 zobrazuje posuv ve směru Y při pohybu ve směru X+Y+Z u dolního profilu varianty A1.

### 1.1.1.2 Rameno horní

#### Výpočtové modely

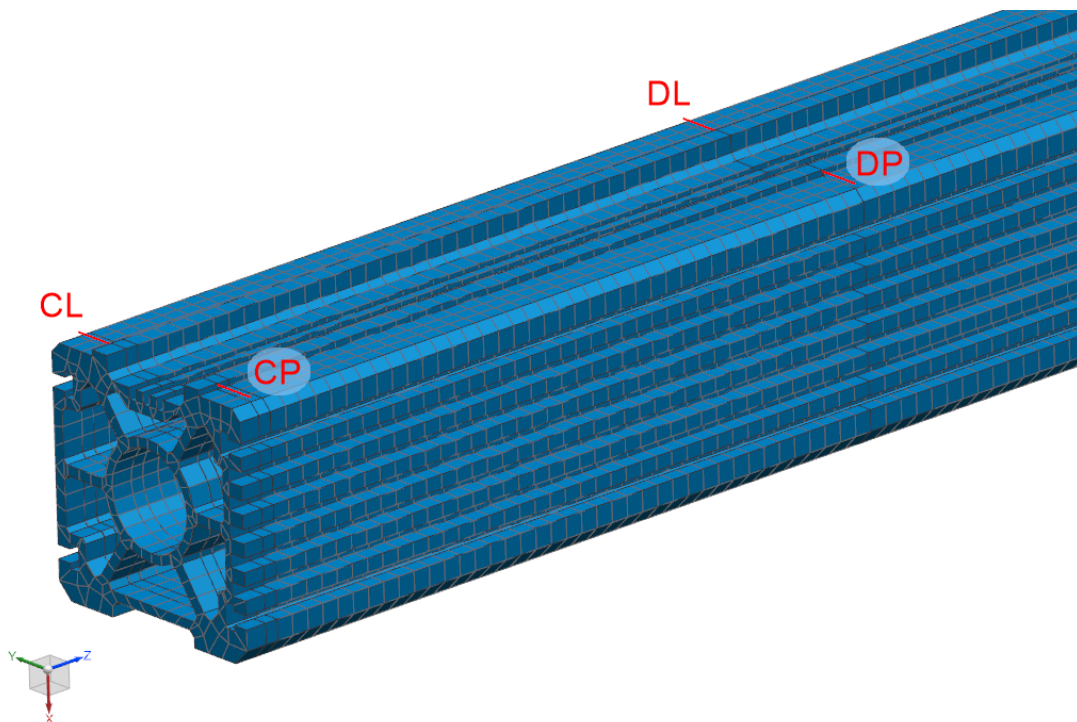
Vstupním modelem pro výpočet profilu horního ramena varianty A1 pomocí MKP byl profil konstantního průřezu, tzn. model bez otvorů pro šrouby. Stejně jako v předchozí kapitole byly plochy, ke kterým jsou přitaženy kolejnice, na úrovni idealizovaného dílu rozděleny, aby vznikly hrany pro vytvoření vazeb. Poloha vzniklých hran odpovídá poloze styku kolejnic s vodícími kladkami.

#### Tvorba sítě

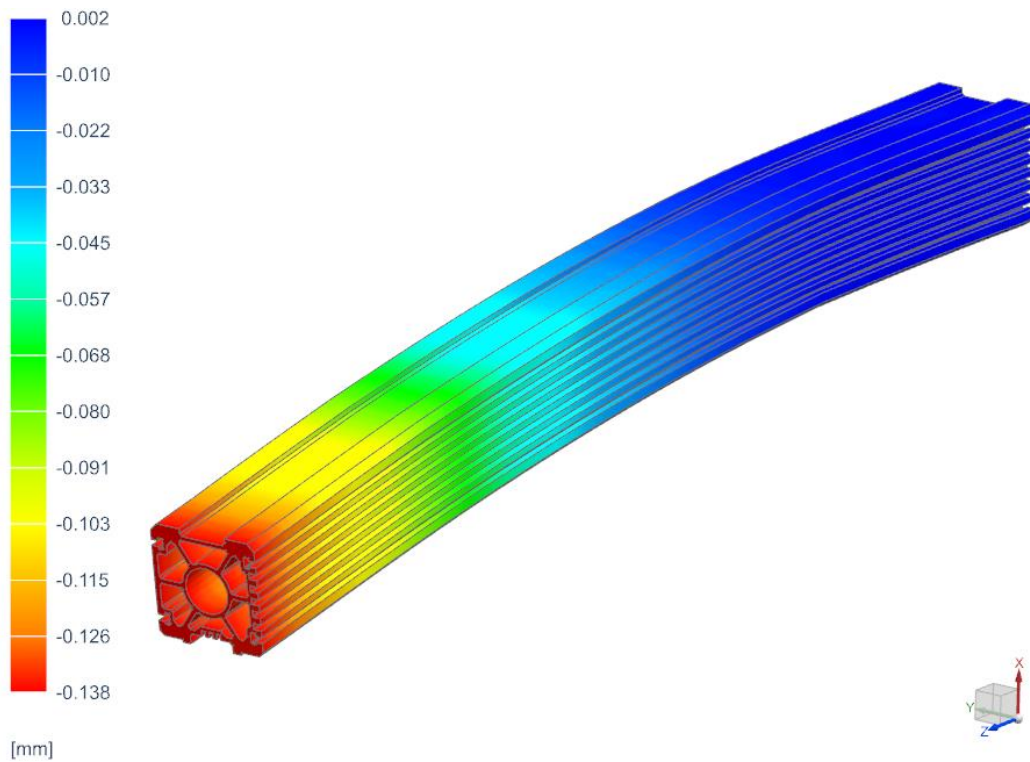
Model byl zasítován taženou sítí pomocí prvků CHEXA(8) s velikostí prvku 8 mm.

#### Okrajové podmínky

Hrany, které vznikly na dosedací ploše pro kolejnici, posloužily k vytvoření vazeb (viz Obrázek 6). Vazby CL a CP byly definovány jako vazby, které zamezují posuvu ve 3 směrech, ale umožňují natočení. Vazby DL a DP byly definovány jako vazby, které zamezují posuvu ve směru X a Y, ale umožňují posuv ve směru Z a natočení. Indexování vazeb vychází z indexů vodících kladek (viz Obrázek 29 v hlavní části diplomové práce). Při použití idealizovaných vazeb představujících čárový styk mohou v okolí vazeb vycházet zkreslené hodnoty.

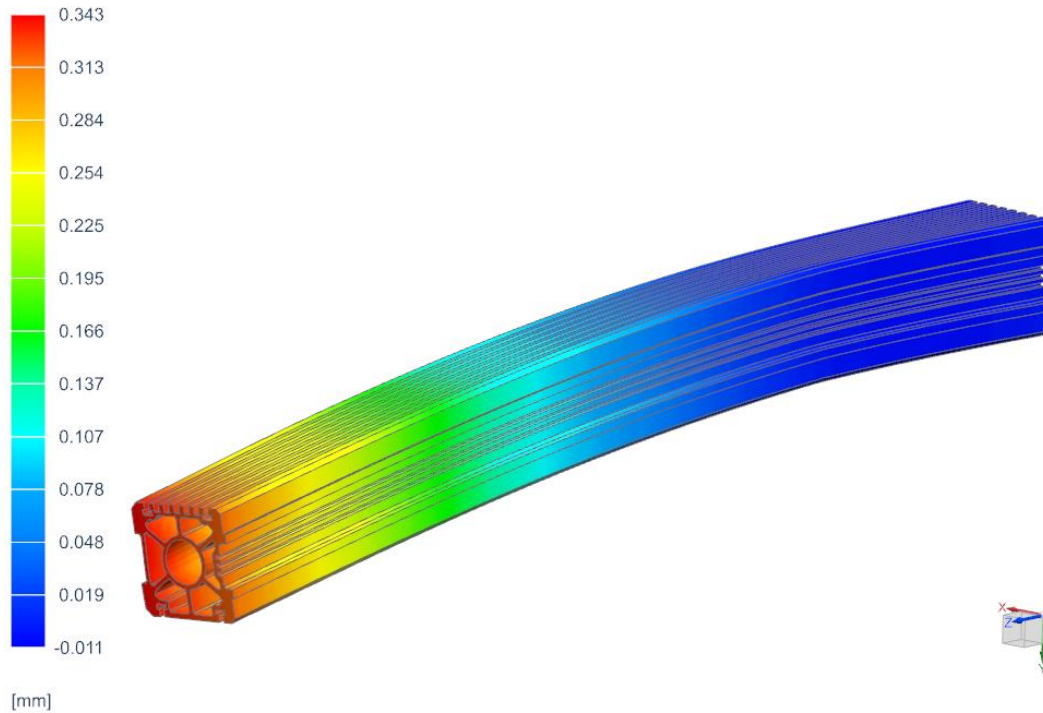


Obrázek 6 - Vazby - Varianta A1 - Profil horní



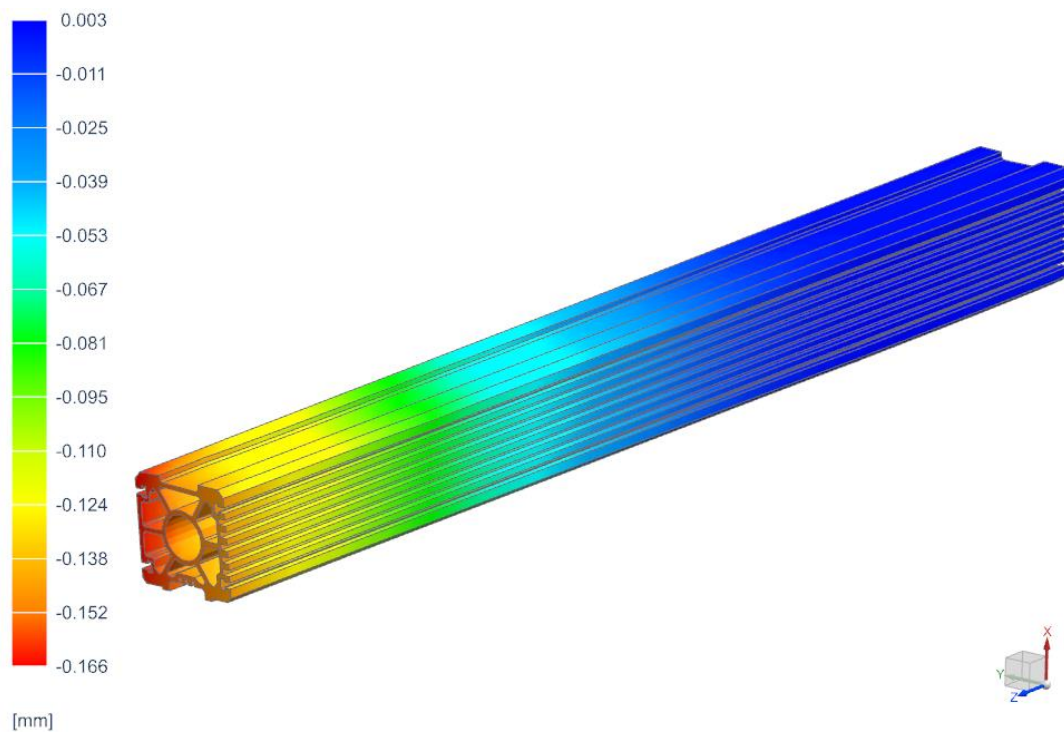
Obrázek 7 - Posuv v X - Pohyb v X - Varianta A1 - Profil horní

Obrázek 7 zobrazuje posuv ve směru X při pohybu ve směru X u horního profilu varianty A1.



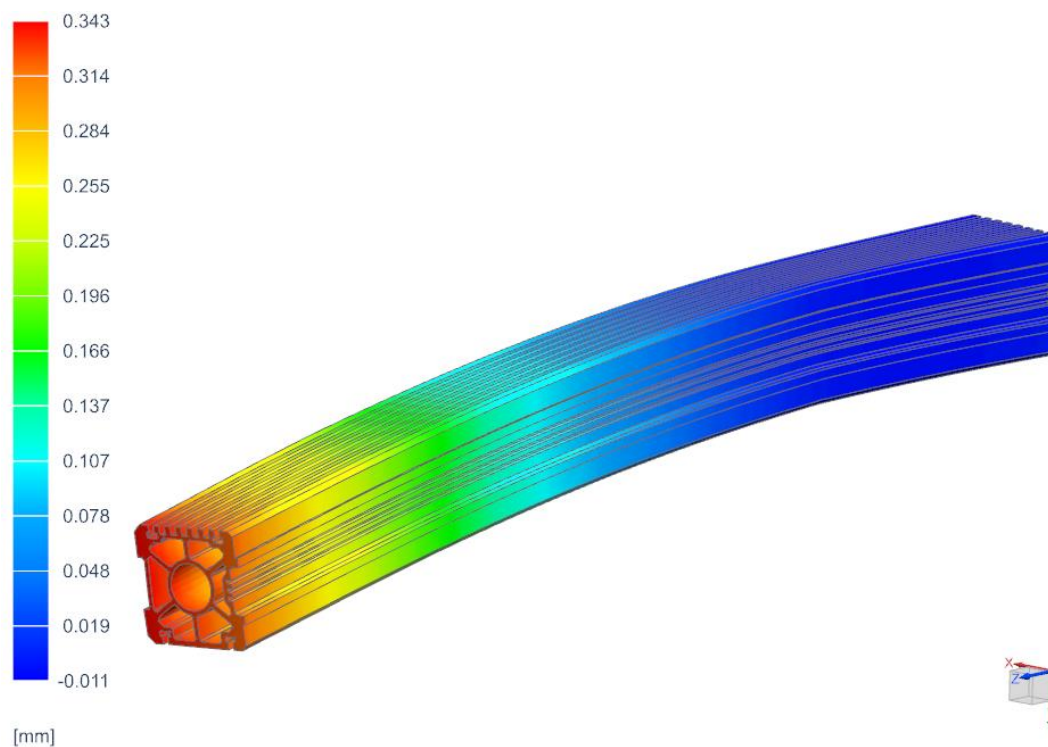
Obrázek 8 - Posuv v Y - Pohyb v Y - Varianta A1 - Profil horní

Obrázek 8 zobrazuje posuv ve směru Y při pohybu ve směru Y u horního profilu varianty A1.



Obrázek 9 - Posuv v X - Pohyb v X+Y+Z - Varianta A1 - Profil horní

Obrázek 9 zobrazuje posuv ve směru X při pohybu ve směru X+Y+Z u horního profilu varianty A1.



Obrázek 10 - Posuv v Y - Pohyb v X+Y+Z - Varianta A1 - Profil horní

Obrázek 10 zobrazuje posuv ve směru Y při pohybu ve směru X+Y+Z u horního profilu varianty A1.

### 1.1.1.3 Zhodnocení výsledků

Hodnoty posuvů pro dolní a horní profil vypočtené pomocí MKP ověřily hodnoty získané analytickým výpočtem (kapitola 1 v příloze 1). Tabulka 1 zobrazuje výsledky analytických a MKP výpočtů a jejich odchylky. Odchylka zjištěná porovnáním analytických a MKP výsledků je vyhovující. Největší odchylka (17,47 %) je u horního ramena při zatěžovacím stavu 3 u posuvu ve směru X. Domnívám se, že příčinou je zjednodušení vazeb u MKP.

Tabulka 1 - Porovnání posuvů varianty A1 - Profily samostatně

| Zatěžovací stav |               | Rameno |       |          |       |       |          |          |       |          |          |       |          |
|-----------------|---------------|--------|-------|----------|-------|-------|----------|----------|-------|----------|----------|-------|----------|
| č.              | Popis         | Dolní  |       |          |       |       |          | Horní    |       |          |          |       |          |
|                 |               | $v_x$  |       |          | $v_y$ |       |          | $v_{2x}$ |       |          | $v_{2y}$ |       |          |
|                 |               | A      | MKP   | $\delta$ | A     | MKP   | $\delta$ | A        | MKP   | $\delta$ | A        | MKP   | $\delta$ |
|                 |               | [mm]   | [mm]  | [%]      | [mm]  | [mm]  | [%]      | [mm]     | [mm]  | [%]      | [mm]     | [mm]  | [%]      |
| 1               | Pohyb v X     | 0,144  | 0,142 | -1,41    | -     | -     | -        | 0,126    | 0,138 | 8,70     | -        | -     | -        |
| 2               | Pohyb v Y     | -      | -     | -        | 0,355 | 0,391 | 9,21     | -        | -     | -        | 0,348    | 0,343 | -1,46    |
| 3               | Pohyb v X+Y+Z | 0,154  | 0,144 | -6,94    | 0,355 | 0,390 | 8,97     | 0,137    | 0,166 | 17,47    | 0,336    | 0,343 | 2,04     |

A – Výsledky analytických výpočtů, MKP – Výsledky výpočtů metodou konečných prvků,  $\delta$  – Odchylka

## 1.1.2 Kontaktní úloha

### 1.1.2.1 Rameno dolní

#### Výpočtové modely

Vstupní sestava pro výpočet kontaktní úlohy dolního ramena varianty A1 se skládala z hliníkového profilu a 2 kolejnic lineárního vedení.

#### Tvorba sítě

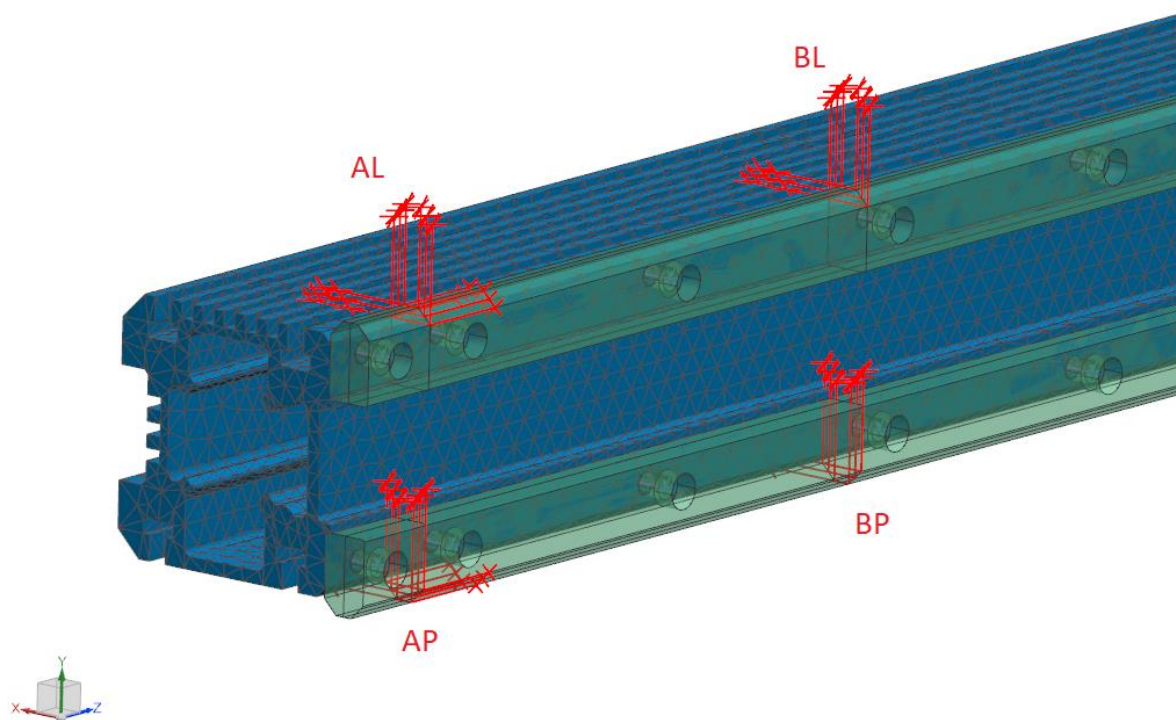
Všechna 3 tělesa byla zasít'ována tetrahedry pomocí prvků CTETRA(10), a to proto, že tvar sít'ovaných těles neumožňuje použít pro výpočet jednodušší typ sítě. U hliníkového profilu byla použita velikost prvku 13 mm a u kolejnic 10 mm.

Spoje šrouby byly uskutečněny pomocí funkce „Bolt Connection“. V této funkci byl nastaven průměr dosedací plochy stejný jako průměr hlavy šroubu M6 (10 mm), délka šroubu (16 mm), efektivní délka závitu (7,5 mm) a průřez šroubu.

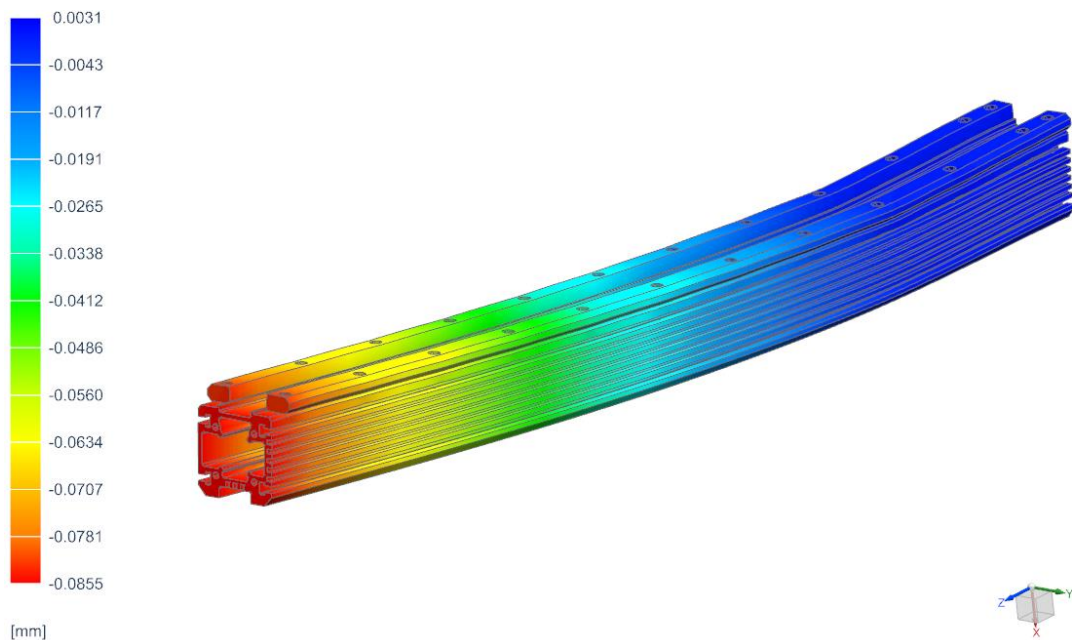
#### Okrajové podmínky

Mezi kolejnicemi a profilem byl definován kontakt pomocí „Surface-to-Surface Contact“, kde byl nastaven koeficient statického tření 0,6.

Šrouby byly předepnuty pomocí „Bolt Pre-Load“ silou 1364 N. Tato síla byla vypočtena z dovoleného tlaku v závitu. Výpočet se nachází v kapitole 3.1.1 výpočtové zprávy, která je v příloze 1.

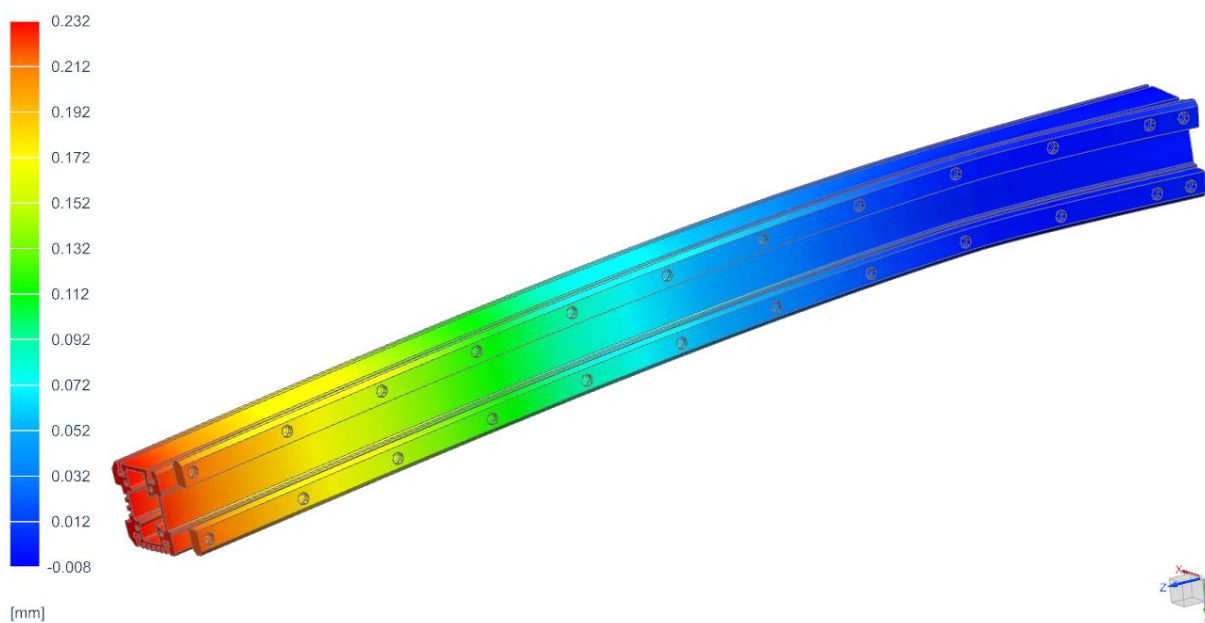


Obrázek 11 - Vazby - Varianta A1 - Rameno dolni



Obrázek 12 - Posuv v X - Pohyb v X - Varianta A1 - Rameno dolní

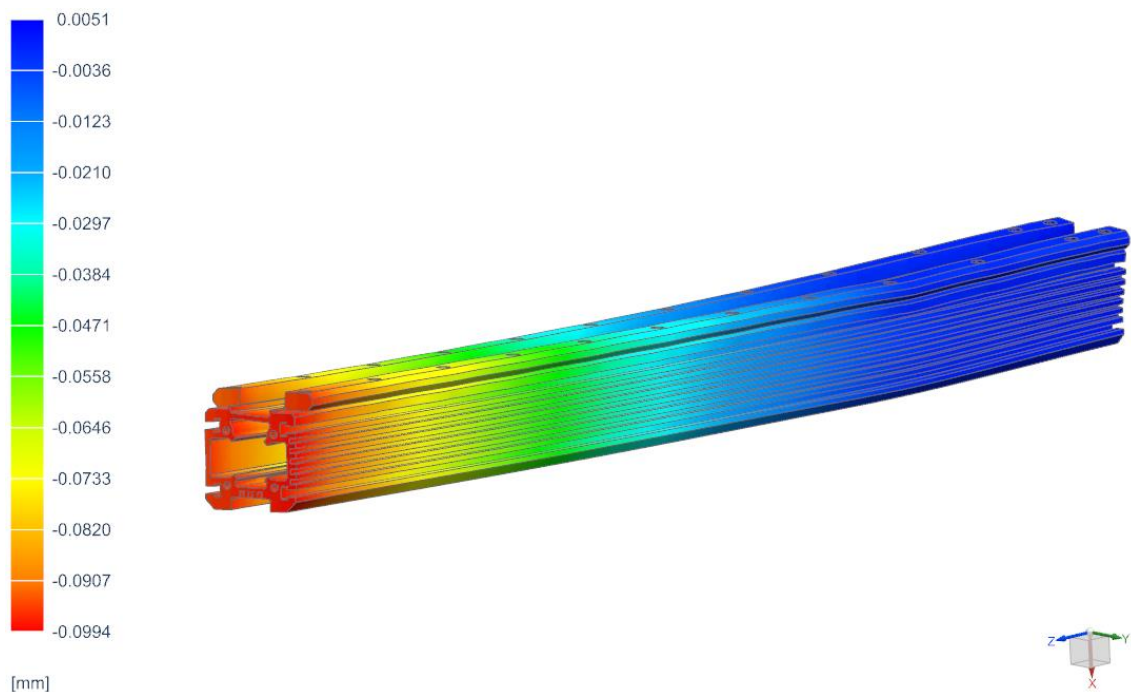
Obrázek 12 zobrazuje posuv ve směru X při pohybu ve směru X u dolního ramena varianty A1.



Obrázek 13 - Posuv v Y - Pohyb v Y - Varianta A1 - Rameno dolní

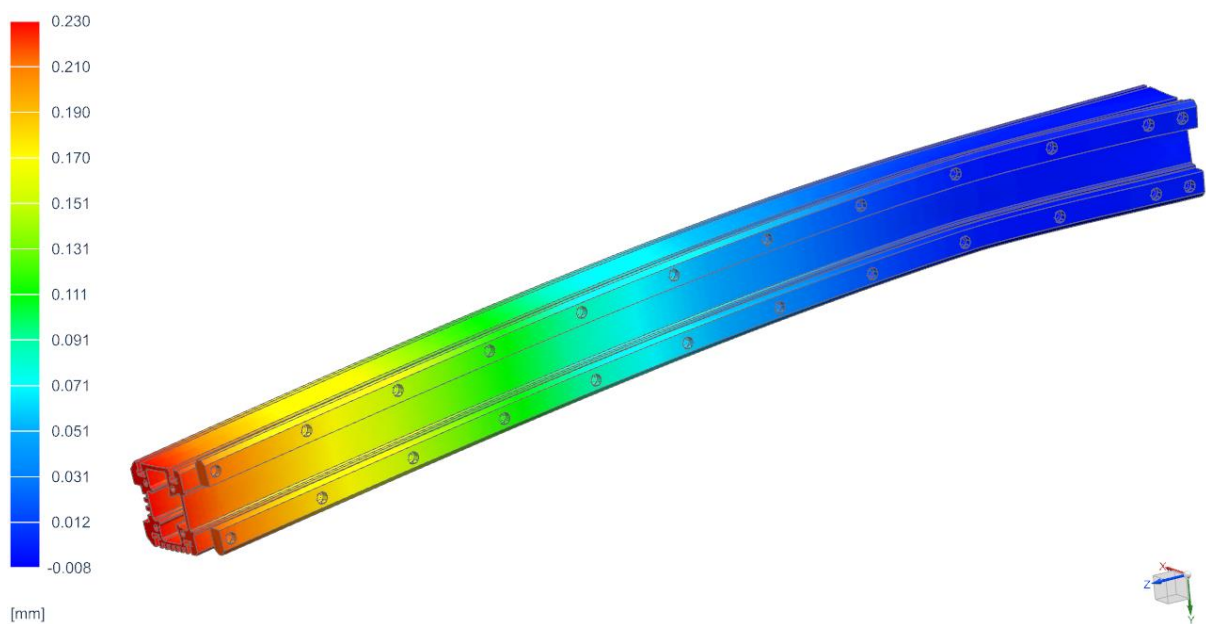
Obrázek 13 zobrazuje posuv ve směru Y při pohybu ve směru Y u dolního ramena varianty A1.





Obrázek 14 - Posuv v X - Pohyb v X+Y+Z - Varianta A1 - Rameno dolní

Obrázek 14 zobrazuje posuv ve směru X při pohybu ve směru X+Y+Z u dolního ramena varianty A1.



Obrázek 15 - Posuv v Y - Pohyb v X+Y+Z - Varianta A1 - Rameno dolní

Obrázek 15 zobrazuje posuv ve směru Y při pohybu ve směru X+Y+Z u dolního ramena varianty A1.

### 1.1.2.2 Rameno horní

#### Výpočtové modely

Vstupní sestava pro výpočet kontaktní úlohy horního ramena varianty A1 se skládala z hliníkového profilu, 2 kolejnic lineárního vedení a desky pro uložení vodících kladek dolního ramena. Na úrovni idealizovaného dílu desky byly odstraněny otvory pro šrouby, které slouží k upevnění přírub vodících kladek.

#### Tvorba sítě

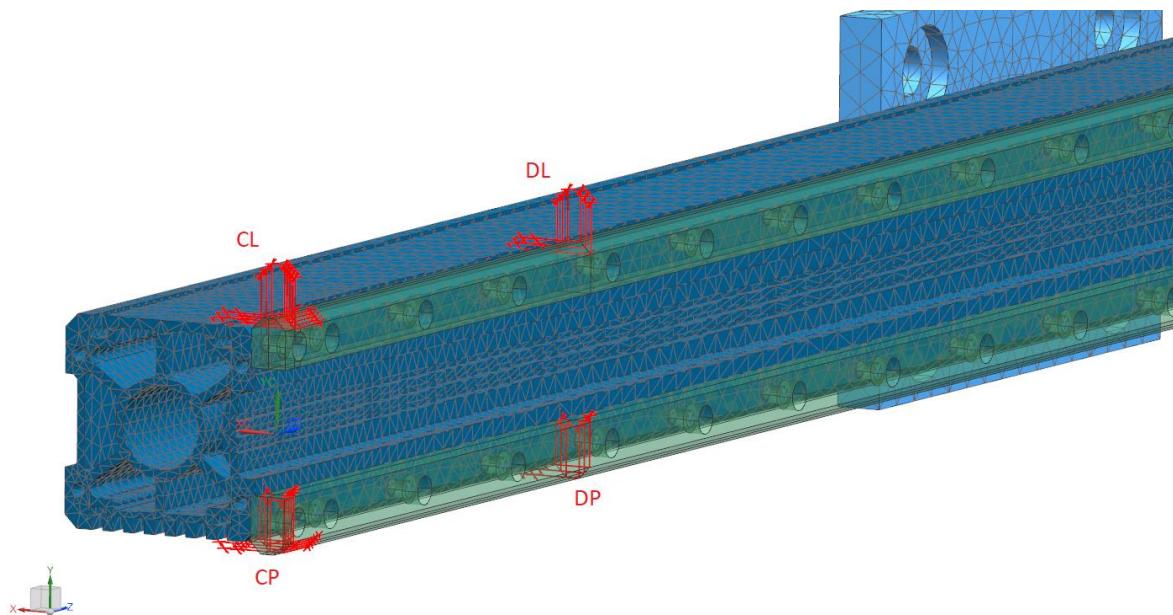
Všechna 4 tělesa byla zasítována tetrahedry pomocí prvků CTETRA(10), a to proto, že tvar sítovaných těles neumožňuje použít pro výpočet jednodušší typ sítě. U hliníkového profilu byla použita velikost prvku 16 mm, u kolejnic 11,6 mm a u desky 19 mm.

Šroubové spoje kolejnic a profilu byly uskutečněny pomocí funkce „Bolt Connection“. V této funkci byl nastaven průměr dosedací plochy stejný jako průměr hlavy šroubu M8 (13 mm), délka šroubu (20 mm), efektivní délka závitu (11 mm) a průřez šroubu. Nastavení spojů desky a profilu se liší pouze v efektivní délce závitu, která je zde 14 mm.

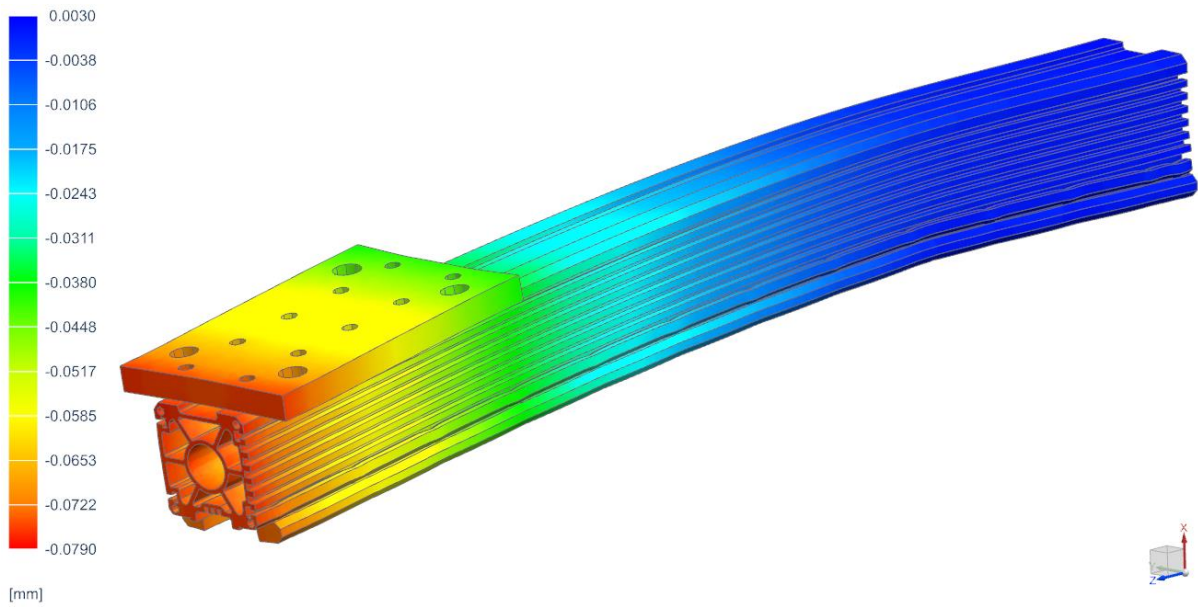
#### Okrajové podmínky

Mezi kolejnicemi a profilem byl definován kontakt pomocí „Surface-to-Surface Contact“, kde byl nastaven koeficient statického tření 0,6. Stejným způsobem byl definován kontakt mezi deskou a profilem, kde byl nastaven koeficient statického tření 0,9.

Šrouby byly předepnuty pomocí „Bolt Pre-Load“ silou 2691 N. Tato síla byla vypočtena z dovoleného tlaku v závitu. Výpočet se nachází v kapitole 3.1.2 výpočtové zprávy, která je v příloze 1.

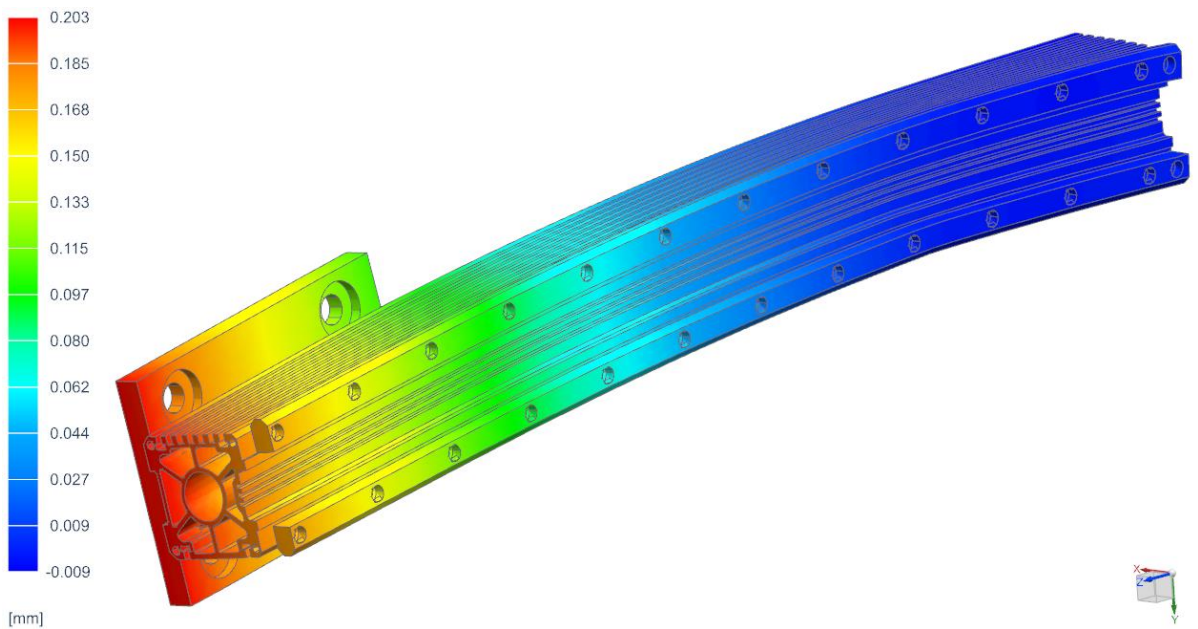


Obrázek 16 - Vazby - Varianta A1 - Rameno horní



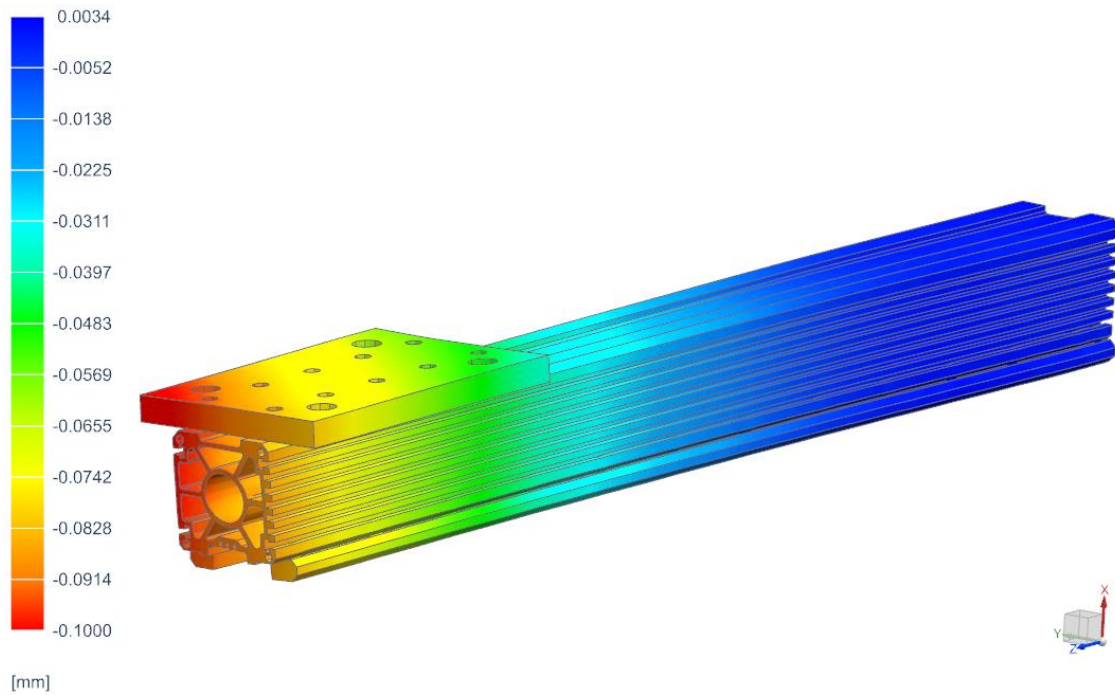
Obrázek 17 - Posuv v X - Pohyb v X - Varianta A1 - Rameno horní

Obrázek 17 zobrazuje posuv ve směru X při pohybu ve směru X u horního ramena varianty A1.



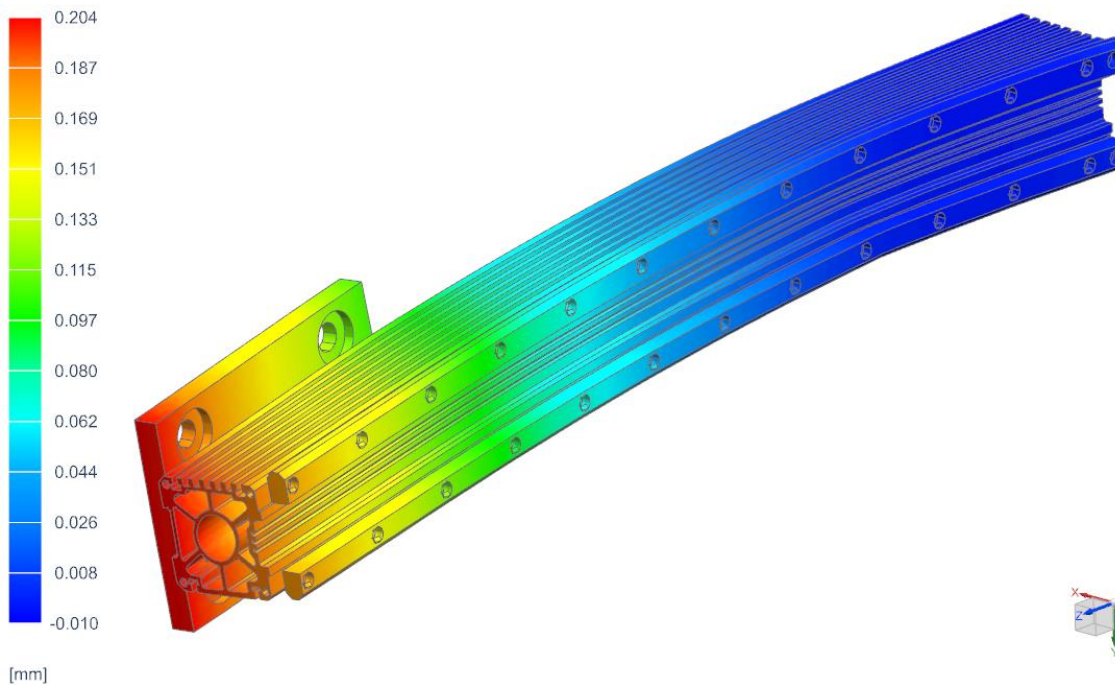
Obrázek 18 - Posuv v Y - Pohyb v Y - Varianta A1 - Rameno horní

Obrázek 18 zobrazuje posuv ve směru Y při pohybu ve směru Y u horního ramena varianty A1.



Obrázek 19 - Posuv v X - Pohyb v X+Y+Z - Varianta A1 - Rameno horní

Obrázek 19 zobrazuje posuv ve směru X při pohybu ve směru X+Y+Z u horního ramena varianty A1.



Obrázek 20 - Posuv v Y - Pohyb v X+Y+Z - Varianta A1 - Rameno horní

Obrázek 20 zobrazuje posuv ve směru Y při pohybu ve směru X+Y+Z u horního ramena varianty A1.

### 1.1.2.3 Zhodnocení výsledků

Tuhost ramen ovlivňují kromě použitého nosného profilu i kolejnice lineárního vedení. Za účelem zpřesnění výsledků posuvů konců ramen byly provedeny kontaktní úlohy pro výše zmíněné zatěžovací stavy u obou ramen. Tento typ výpočtu je časově náročnější, avšak zohledňuje další vlivy, jako například proměnný průřez, vzájemné působení dílů a odlišné materiály (viz Tabulka 18 v hlavní části diplomové práce). Tabulka 2 udává hodnoty posuvů zjištěné kontaktní úlohou u varianty A1. Při porovnání hodnot zjištěných kontaktní úlohou s hodnotami pro samotné profily bylo podle očekávání zjištěno, že při uvažování vlivu kolejnic dojde ke zvýšení tuhosti a posuvy budou dosahovat nižších hodnot.

Tabulka 2 - Posuvy varianty A1 - MKP - Kontaktní úloha

| Zatěžovací stav |               | Rameno |       |          |          |
|-----------------|---------------|--------|-------|----------|----------|
| č.              | Popis         | Dolní  |       | Horní    |          |
|                 |               | $v_x$  | $v_y$ | $v_{2x}$ | $v_{2y}$ |
|                 |               | [mm]   | [mm]  | [mm]     | [mm]     |
| 1               | Pohyb v X     | 0,086  | -     | 0,079    | -        |
| 2               | Pohyb v Y     | -      | 0,232 | -        | 0,203    |
| 3               | Pohyb v X+Y+Z | 0,099  | 0,230 | 0,100    | 0,204    |

## 1.2 Varianta B

Materiálové parametry pro variantu B jsou definovány v kapitole 5.2 v hlavní části diplomové práce (Tabulka 19).

### 1.2.1 Kontaktní úloha

#### 1.2.1.1 Rameno dolní

#### Výpočtové modely

Vstupní sestava pro výpočet kontaktní úlohy dolního ramena varianty B se skládala z hliníkového profilu, kolejnice lineárního vedení a 2 lišt se závity. Na úrovni idealizovaného dílu kolejnice byly rozdělením vytvořeny plochy, které reprezentují styk s valivými elementy vozíků.

#### Tvorba sítě

Hliníkový profil byl zasítován taženou sítí pomocí prvků CHEXA(8) s velikostí prvku 1,3 mm.

Lišty a kolejnice byly zasítovány tetrahedry pomocí prvků CTETRA(10), a to z důvodu, že tvar sítovaných těles neumožňuje použít pro výpočet jednodušší typ sítě. U lišt byla použita velikost prvku 5 mm a u kolejnice 10,9 mm.

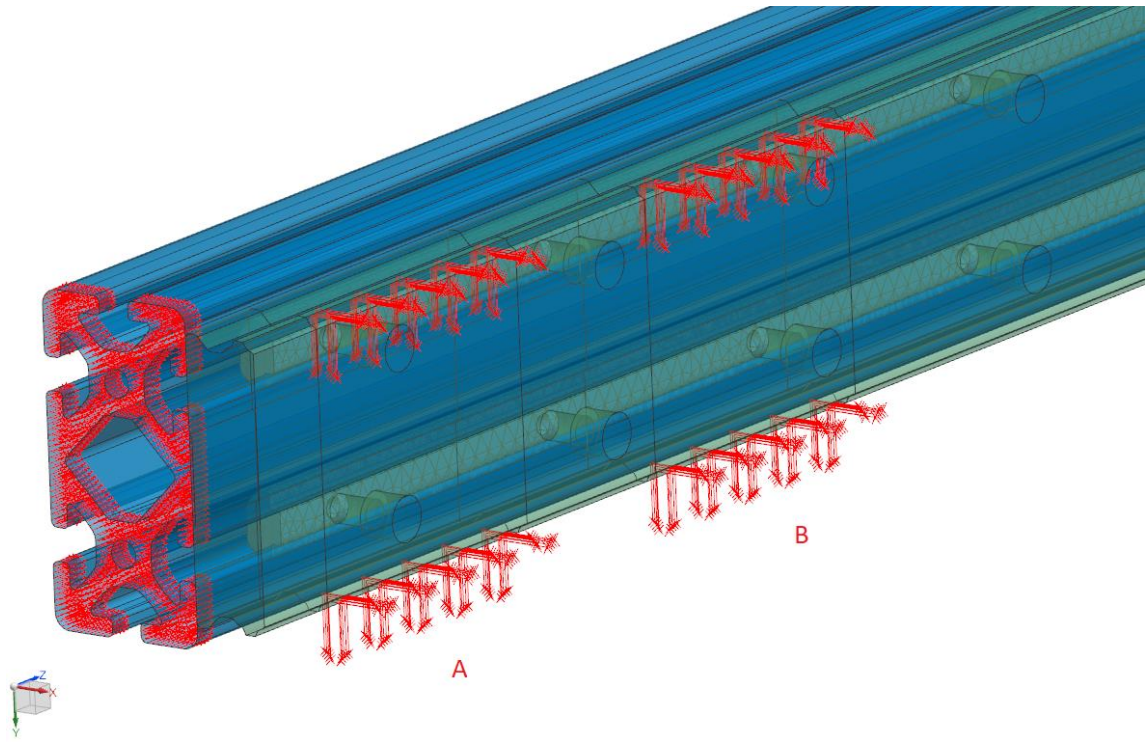
Šroubové spoje kolejnice a lišt byly uskutečněny pomocí funkce „Bolt Connection“. V této funkci byl nastaven průměr dosedací plochy stejný jako průměr hlavy šroubu M6 (10 mm), délka šroubu (20 mm), efektivní délka závitu (9,5 mm) a průřez šroubu.

#### Okrajové podmínky

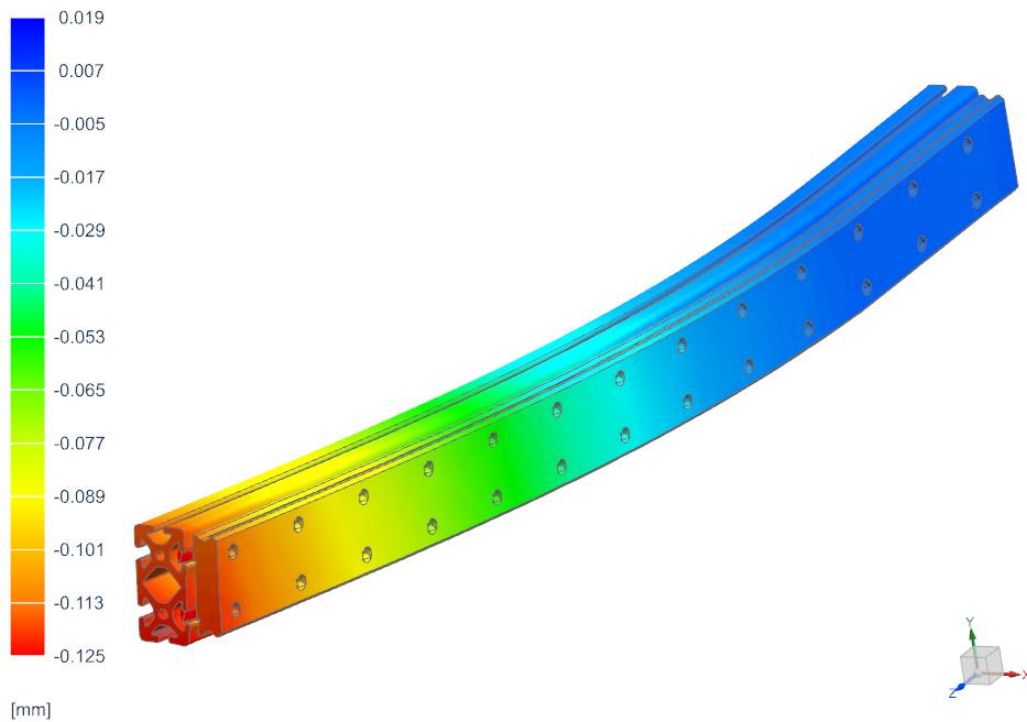
K vytvoření vazeb, které zastupují vozíky A a B (viz Obrázek 21), posloužily vytvořené plochy, které představují styk valivých elementů s kolejnicí. Vazby A a B byly definovány jako vazby, které zamezují posuvu ve 2 směrech, ale umožňují natočení a posuv ve směru Z. Pro zamezení posuvu ve směru Z byla vytvořena vazba na čele profilu (viz Obrázek 21), která odebírá pouze posuv v Z a představuje zavěšení na řemenu.

Poté byl definován kontakt mezi kolejnicí a profilem pomocí „Surface-to-Surface Contact“, kde byl nastaven koeficient statického tření 0,6. Stejně byl nastaven i kontakt mezi profilem a lištami.

Šrouby byly předepnuty pomocí „Bolt Pre-Load“ silou 6478,7 N. Tato síla byla vypočtena z dovoleného tlaku v závitu. Výpočet se nachází v kapitole 3.2.1 výpočtové zprávy, která je v příloze 1.

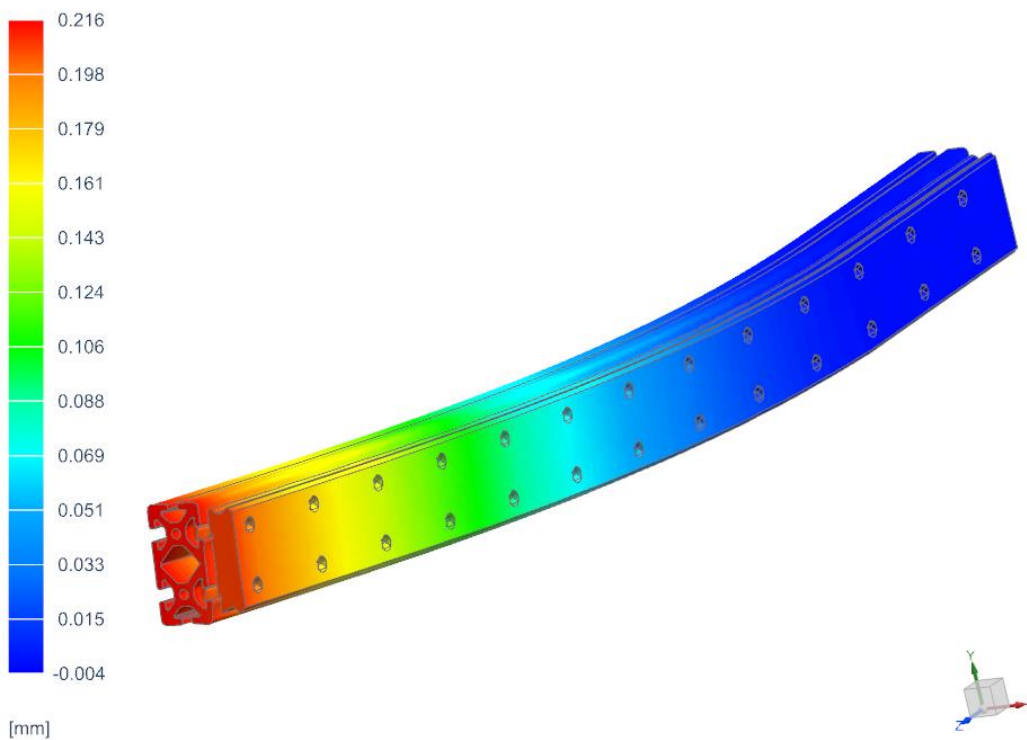


Obrázek 21 - Vazby - Varianta B - Rameno dolní



Obrázek 22 - Posuv v X - Pohyb v X+Y+Z - Varianta B - Rameno dolní

Obrázek 22 zobrazuje posuv ve směru X při pohybu ve směru X+Y+Z u dolního ramena varianty B.



Obrázek 23 - Posuv v Y - Pohyb v X+Y+Z - Varianta B - Rameno dolní

Obrázek 23 zobrazuje posuv ve směru Y při pohybu ve směru X+Y+Z u dolního ramena varianty B.



### 1.2.1.2 Rameno horní

#### Výpočtové modely

Vstupní sestava pro výpočet kontaktní úlohy horního ramena varianty B se skládala ze svařence, který je tvořen 2 profily UPE 100, 2 kolejnic lineárního vedení a desky pro upevnění vozíků. V idealizovaném dílu desky pro upevnění vozíků byly vytvořeny rozdělení plochy reprezentující styk s vozíky. Dále byly na úrovni idealizovaných dílu odstraněny zkosení otvorů a rádiusy u otvoru pro vsazení vozíků, které nemají výrazný vliv na posuv. Důsledkem odstranění rádiusů mohou v těchto místech vznikat špičky napětí.

#### Tvorba sítě

Deska pro upevnění vozíků byla zasít'ována taženou sítí pomocí prvků CHEXA(8) s velikostí prvku 4 mm.

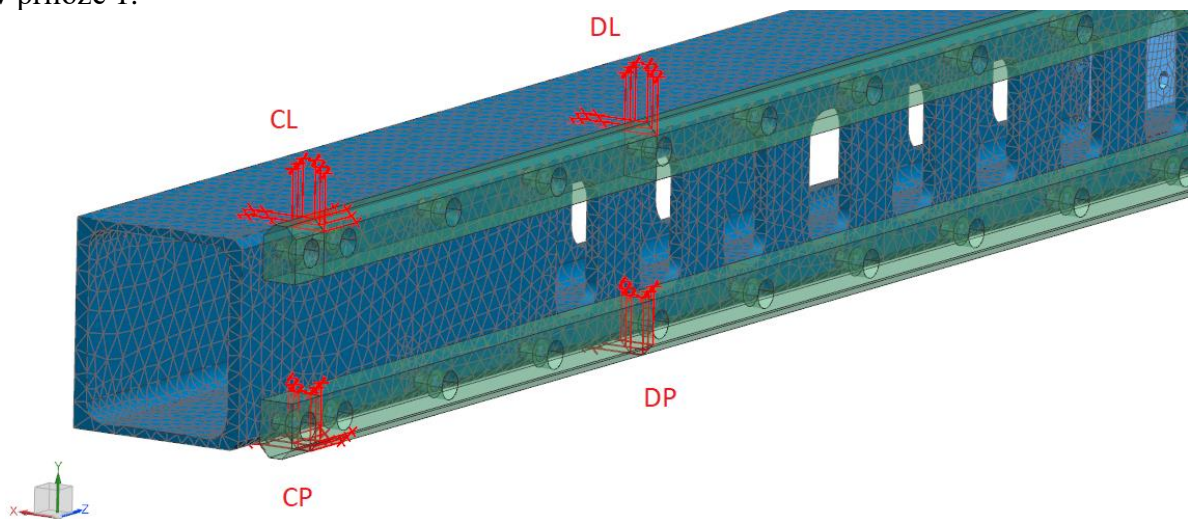
Svařenec 2 UPE profilů a kolejnice byly zasít'ovány tetrahedry pomocí prvků CTETRA(10), a to z důvodu, že tvar sít'ovaných těles neumožňuje použít pro výpočet jednodušší typ sítě. U svařence byla použita velikost prvku 13 mm a u kolejnic 10 mm.

Šroubové spoje přípeňovací desky a svařence byly uskutečněny pomocí funkce „Bolt Connection“. V této funkci byl nastaven průměr dosedací plochy stejný jako průměr hlavy šroubu M8 (13 mm), délka šroubu (18 mm), efektivní délka závitu (7,5 mm) a průřez šroubu. Nastavení spojů u kolejnic je stejné jako u spojů pro přípeňovací desku.

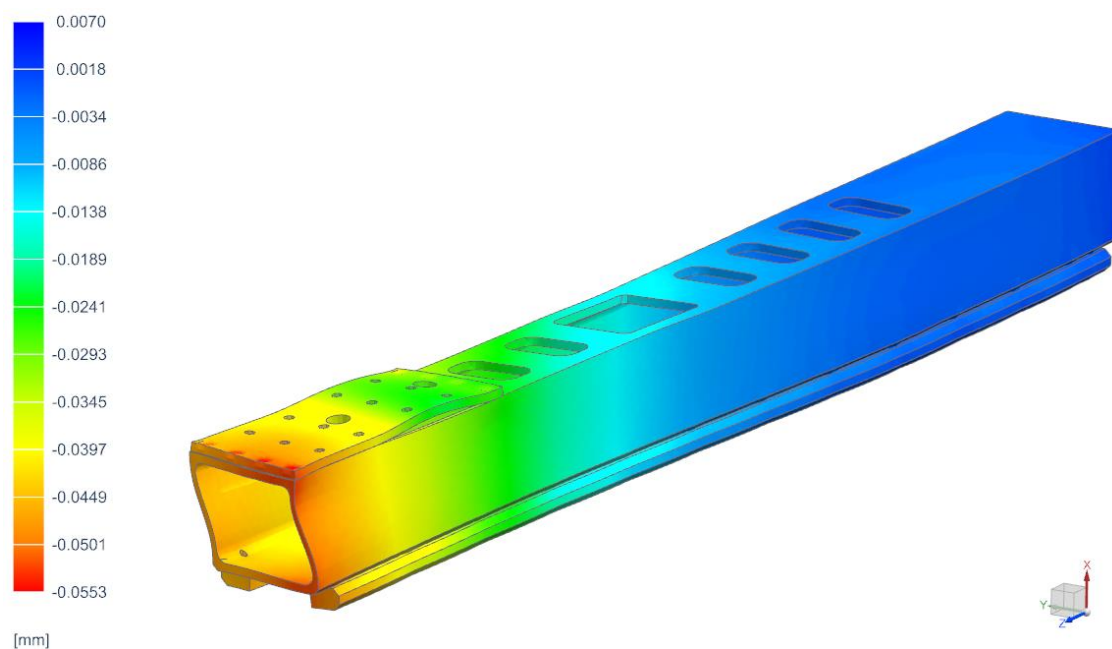
#### Okrajové podmínky

Mezi kolejnicemi a svařencem byl definován kontakt pomocí „Surface-to-Surface Contact“, kde byl nastaven koeficient statického tření 0,7. Stejně byl nastaven i kontakt mezi upeňovací deskou a svařencem.

Šrouby byly předepnuty pomocí „Bolt Pre-Load“ silou 6880 N. Tato síla byla vypočtena z dovoleného tlaku v závitu. Výpočet se nachází v kapitole 3.2.2 výpočtové zprávy, která je v příloze 1.

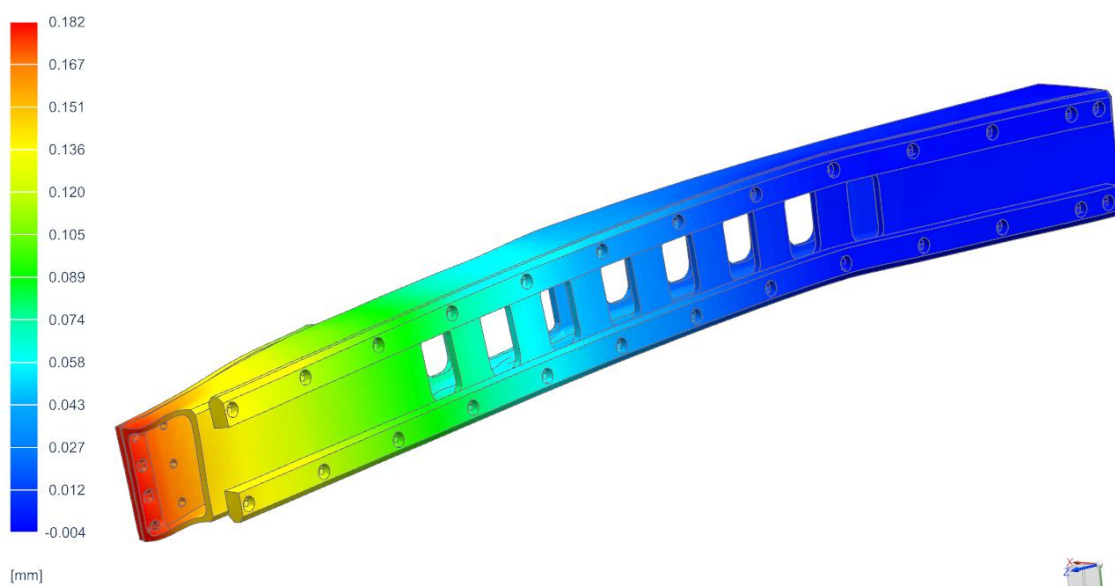


Obrázek 24 - Vazby - Varianta B - Rameno horní



Obrázek 25 - Posuv v X - Pohyb v X+Y+Z - Varianta B - Rameno horní

Obrázek 25 zobrazuje posuv ve směru X při pohybu ve směru X+Y+Z u horního ramena varianty B.



Obrázek 26 - Posuv v Y - Pohyb v X+Y+Z - Varianta B - Rameno horní

Obrázek 26 zobrazuje posuv ve směru Y při pohybu ve směru X+Y+Z u horního ramena varianty B.

### 1.2.1.3 Zhodnocení výsledků

U varianty B je tuhost ramen ovlivněna kolejnici lineárního vedení, použitým nosným profilem a odlehčením u horního ramena. Pro určení posuvů profilů byly provedeny kontaktní úlohy pro zatížení při kombinovaném pohybu X+Y+Z. Tabulka 3 uvádí hodnoty posuvů zjištěné kontaktní úlohou u varianty B. Zjištěné hodnoty pro jednotlivá ramena jsou vyhovující.

Tabulka 3 - Posuvy varianty B - MKP - Kontaktní úloha

| Zatěžovací stav |               | Rameno |       |          |          |
|-----------------|---------------|--------|-------|----------|----------|
| č.              | Popis         | Dolní  |       | Horní    |          |
|                 |               | $v_x$  | $v_y$ | $v_{2x}$ | $v_{2y}$ |
|                 |               | [mm]   | [mm]  | [mm]     | [mm]     |
| 1               | Pohyb v X+Y+Z | 0,125  | 0,216 | 0,055    | 0,182    |

## 1.2.2 Celková kontaktní úloha

### Výpočtové modely

Vstupní sestava pro výpočet celkové kontaktní úlohy varianty B se skládá z komponent pro dolní a horní rameno. Navíc byly přidány 2 zjednodušené modely (Obrázek 27 žlutě), které zastupují vozíky lineárního vedení s distanční deskou. Tyto modely propojují horní a dolní rameno a byly uvažovány jako dokonale tuhé, což bylo při výpočtu definováno materiálem vycházejícím z vlastností použité oceli, avšak Youngův modul pružnosti byl nastaven 1000x větší a hustota byla upravena tak, aby výsledná hmotnost odpovídala hmotnosti zastoupených dílů. Na úrovni idealizovaných dílů byla provedena zjednodušení jako u jednotlivých ramen.

### Tvorba sítě

Hliníkový profil a deska pro upevnění vozíků byly zasítovány taženou sítí pomocí prvků CHEXA(8). U hliníkového profilu byla použita velikost prvku 2 mm a u desky 6 mm.

Svařenec 2 UPE profilů, lišty, kolejnice a vozíky byly zasítovány tetrahedry pomocí prvků CTETRA(10), a to z důvodu, že tvar sítovaných těles neumožňuje použít pro výpočet jednodušší typ sítě. U svařence byla použita velikost prvku 13 mm, u lišt 5 mm, u kolejnice dolního ramena 10,9 mm, u kolejnice horního ramena 10 mm a u vozíků 5 mm.

Nastavení šroubových spojů dolního ramena je totožné jako v kapitole 1.2.1.1 a horního ramena jako v kapitole 1.2.1.2.

### Okrajové podmínky

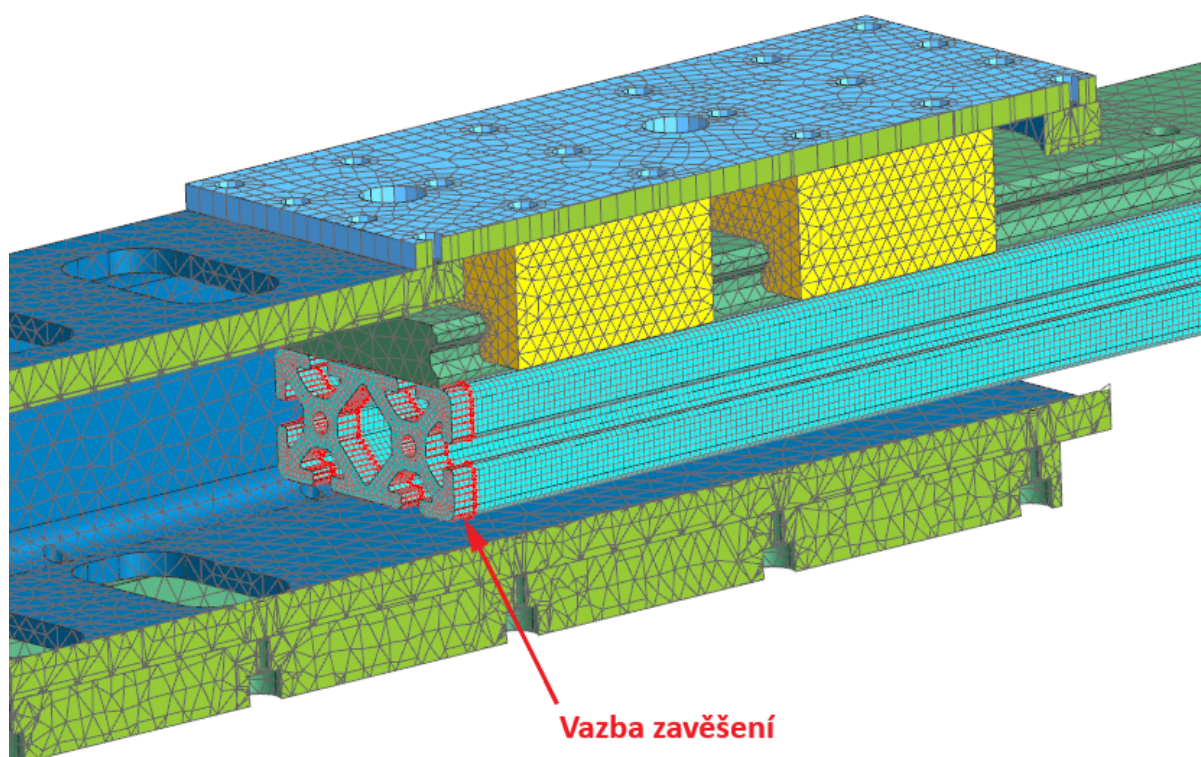
Kontakt kolejnice a lišt s hliníkovým profilem byl definován totožně jako v kapitole 1.2.1.1. Kontakt kolejníc a desky se svařencem byl definován totožně jako v kapitole 1.2.1.2.

Spojení vozíků s deskou bylo definováno pomocí „Surface-to-Surface Gluing“ mezi dosedacími plochami.

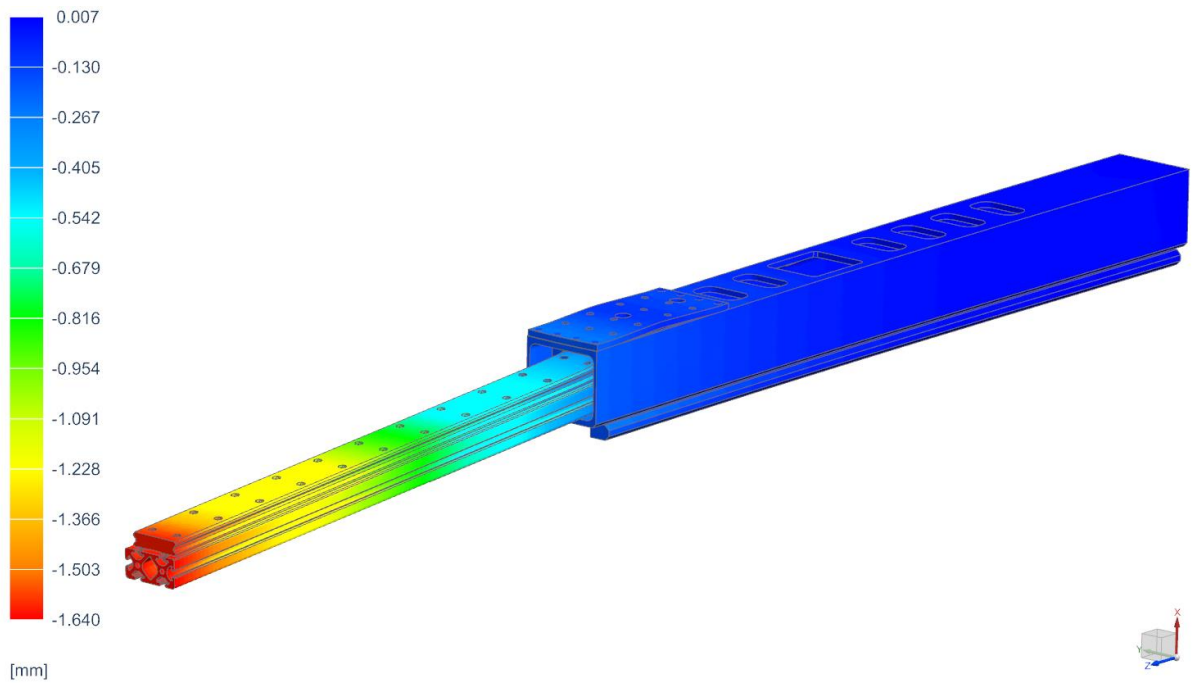
Propojení dolního a horního ramena bylo vytvořeno kontaktem mezi plochami kolejnice, které jsou ve styku s valivými elementy, a plochami vozíků, které představují valivé elementy.

Pro zamezení posuvu dolního ramena ve směru Z byla vytvořena vazba na čele profilu (viz Obrázek 27), která odebírá pouze posuv ve směru Z a představuje zavěšení na řemenu.

Šrouby byly předepnuty pomocí „Bolt Pre-Load“, u dolního ramena silou 6478,7 N a horního ramena silou 6880 N (viz 1.2.1.1 a 1.2.1.2).

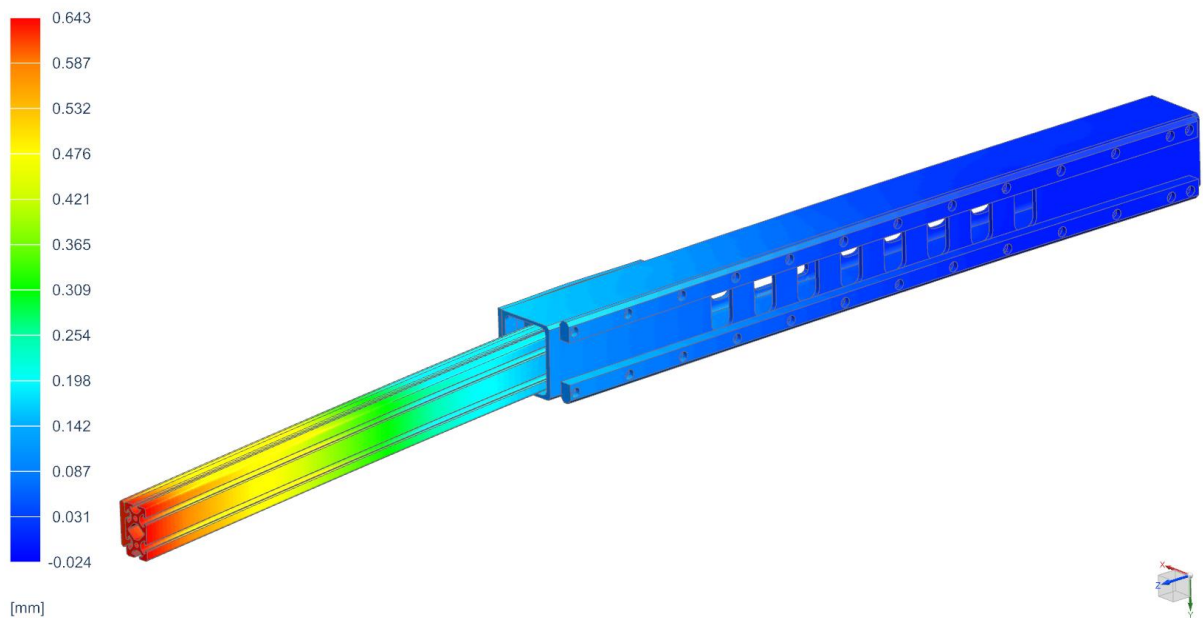


Obrázek 27 - Spojení ramen - Varianta B



Obrázek 28 - Posuv v X - Pohyb v X+Y+Z - Varianta B - Celková úloha

Obrázek 28 zobrazuje posuv ve směru X při pohybu ve směru X+Y+Z u celkové úlohy varianty B.

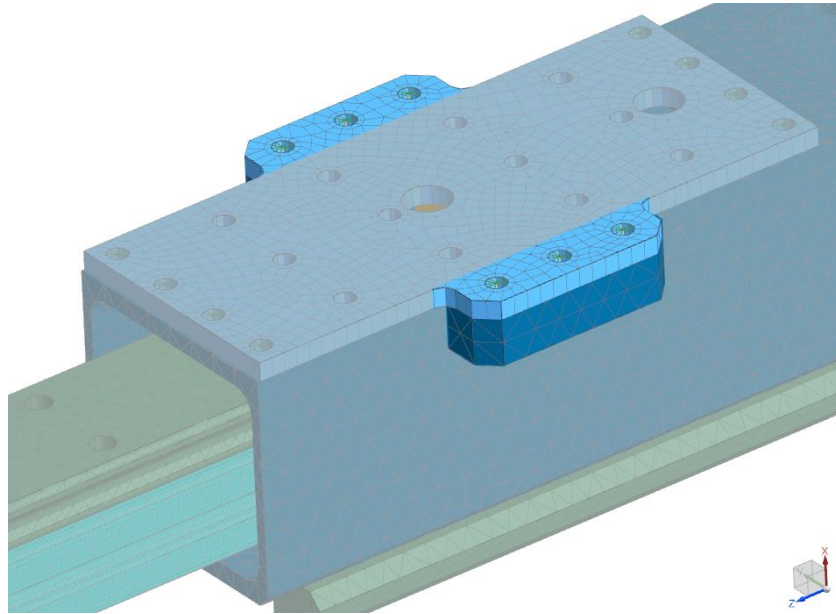


Obrázek 29 - Posuv v Y - Pohyb v X+Y+Z - Varianta B - Celková úloha

Obrázek 29 zobrazuje posuv ve směru Y při pohybu ve směru X+Y+Z u celkové úlohy varianty B.

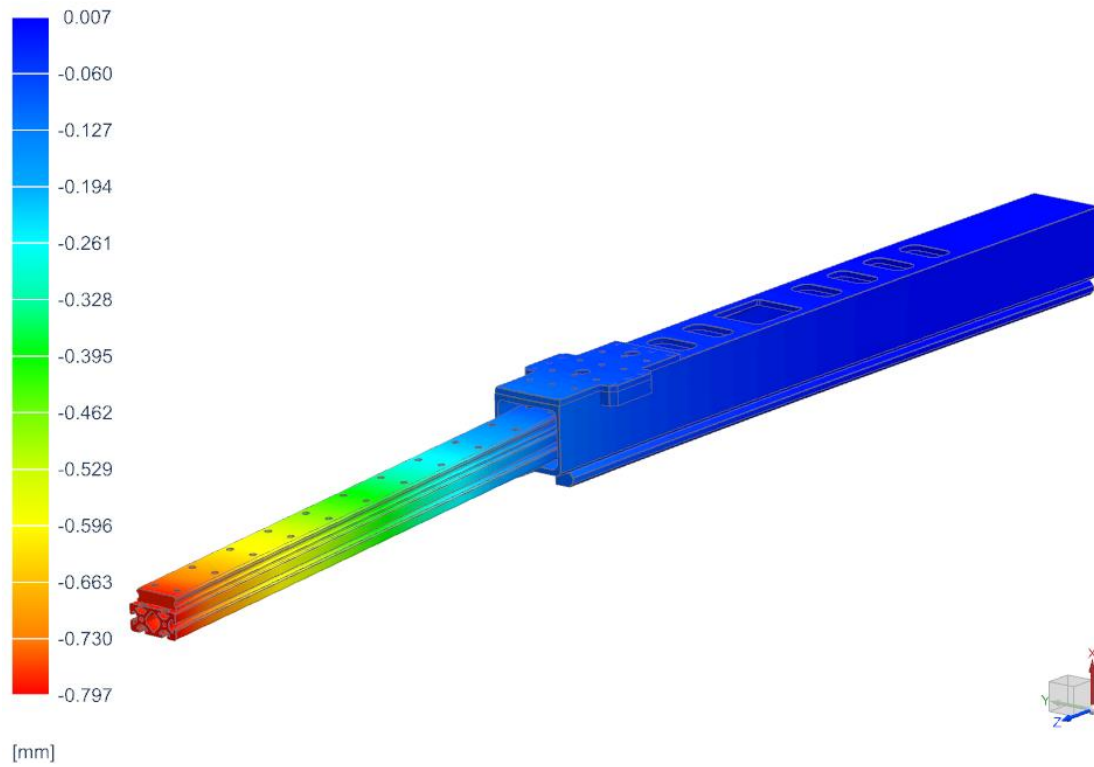
### 1.2.2.1 Konstrukční úprava

Na základě MKP analýzy bylo zjištěno, že slabým místem konstrukčního řešení varianty B je deska pro upevnění vozíků. Bylo potřeba eliminovat průhyb ve středu desky. Navržená úprava spočívá v tom, že k svařeným profilům UPE 100 se přivaří z obou stran bloky, do kterých se vytvoří závity pro šrouby M8. Deska je rozšířena ve středu pro vytvoření otvorů pro šrouby.



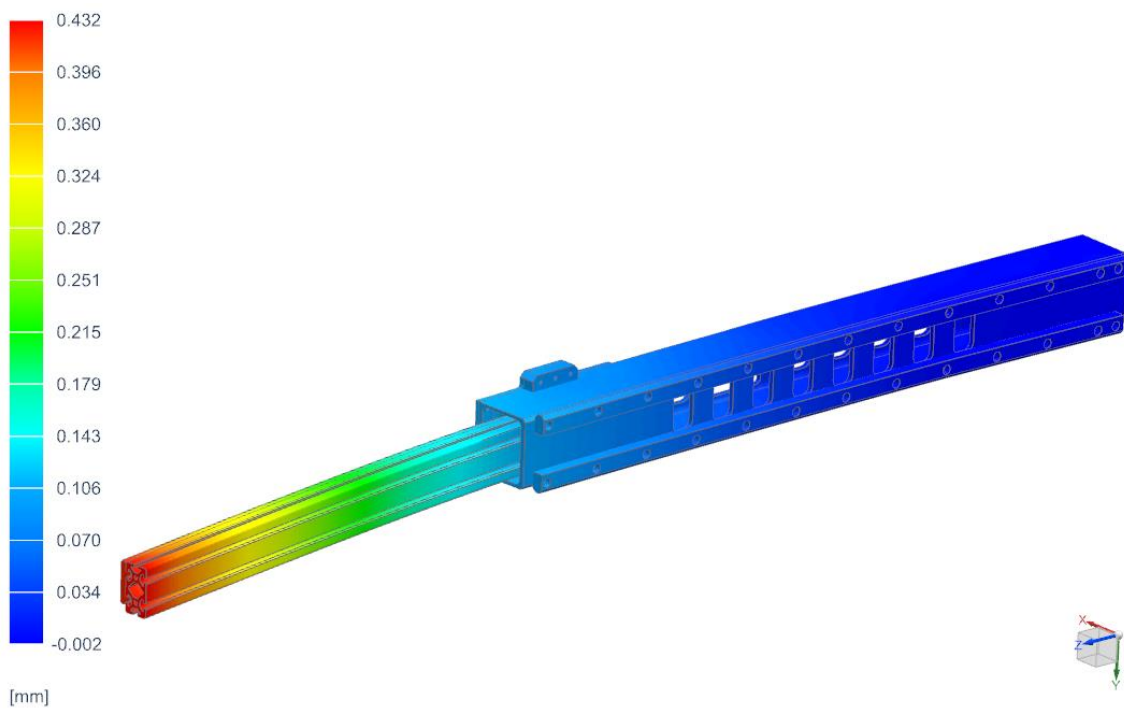
Obrázek 30 - Konstrukční úprava - Varianta B

Zasíťování a okrajové podmínky zůstaly totožné, pouze bylo přidáno 6 šroubů pomocí funkce „Bolt Connection“. V této funkci byl nastaven průměr dosedací plochy stejný jako průměr hlavy šroubu M8 (13 mm), délka šroubu (28 mm), efektivní délka závitu (20 mm) a průřez šroubu. Tyto šrouby byly předepnuty silou 16686,8 N, která byla spočtena z doporučeného utahovacího momentu a závit zkontrolován na otláčení (viz kapitola 3.2.2 v příloze 1).



Obrázek 31 - Posuv v X - Pohyb v X+Y+Z - Varianta B upravená - Celková úloha

Obrázek 31 - Posuv v X - Pohyb v X+Y+Z - Varianta B upravená - Celková úloha  
 Obrázek 31 zobrazuje posuv ve směru X při pohybu ve směru X+Y+Z u celkové úlohy varianty B po konstrukční úpravě.



Obrázek 32 - Posuv v Y - Pohyb v X+Y+Z - Varianta B upravená - Celková úloha

Obrázek 32 zobrazuje posuv ve směru Y při pohybu ve směru X+Y+Z u celkové úlohy varianty B po konstrukční úpravě.

### 1.2.2.2 Zhodnocení výsledků

Celková kontaktní úloha varianty B byla provedena pro zjištění posuvů celého konstrukčního řešení při maximálním vysunutí ramen. Celkový posuv ovlivňují posuvy dolního a horního ramena, natočením uložení dolního ramena a také deska pro upevnění vozíků k profilu. Tabulka 4 shrnuje výsledky posuvů celkové kontaktní úlohy varianty B. Podle úloh výše pro jednotlivá ramena lze usuzovat, že výsledné hodnoty u celkové úlohy jsou reálné v případě posuvu ve směru Y. Posuv ve směru X dosahuje řádově vyšší hodnoty. To je způsobeno deformací desky, která slouží k upevnění vozíků k profilu. Vlivem této deformace se uložení dolního profilu natočí a následkem je výrazný posuv u dolního ramena ve směru X. Vyhovující je pouze posuv ve směru Y, a proto bylo potřeba provést konstrukční úpravu v uložení desky. Po této úpravě již byl splněn požadavek na posuvy do 1 mm (viz Tabulka 5). Z toho vyplývá, že hodnoty posuvů po úpravě jsou vyhovující.

Tabulka 4 - Posuvy varianty B - MKP – Celková kontaktní úloha

| Zatěžovací stav |               | Celkový posuv |       |
|-----------------|---------------|---------------|-------|
| č.              | Popis         | $v_x$         | $v_y$ |
|                 |               | [mm]          | [mm]  |
| 1               | Pohyb v X+Y+Z | 1,640         | 0,643 |

Tabulka 5 - Posuvy varianty B po úpravě - MKP – Celková kontaktní úloha

| Zatěžovací stav |               | Celkový posuv |       |
|-----------------|---------------|---------------|-------|
| č.              | Popis         | $v_x$         | $v_y$ |
|                 |               | [mm]          | [mm]  |
| 1               | Pohyb v X+Y+Z | 0,797         | 0,432 |

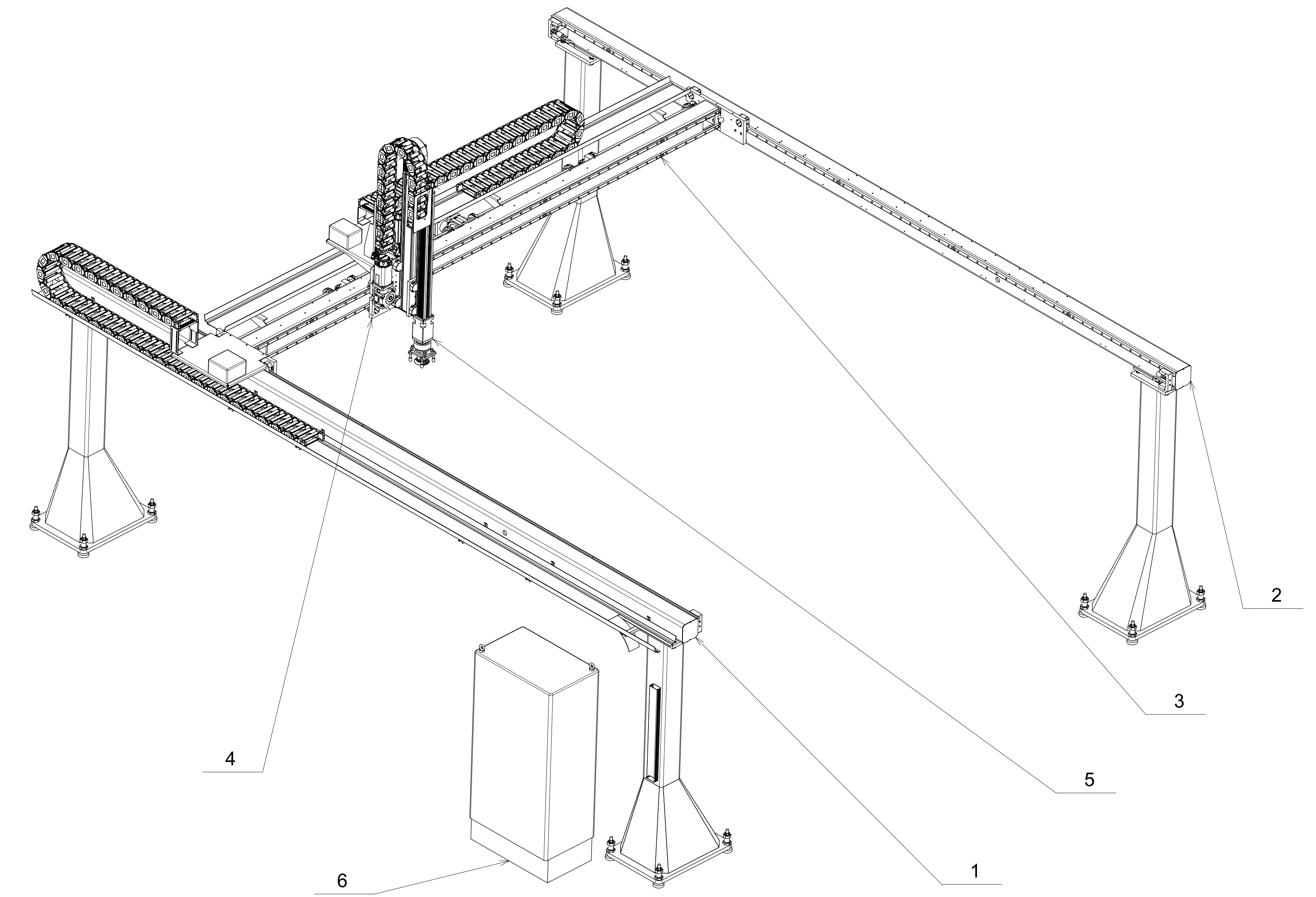
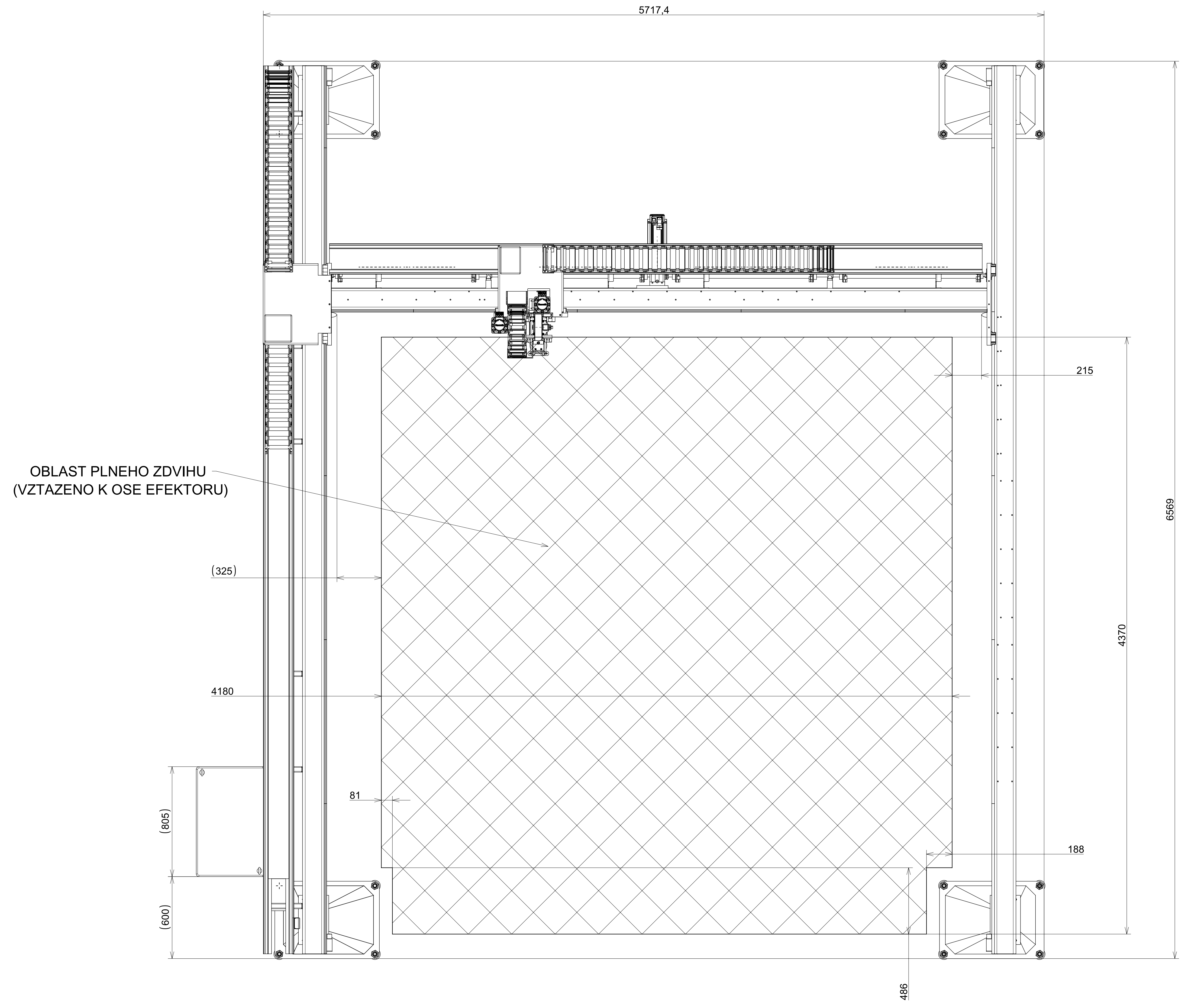
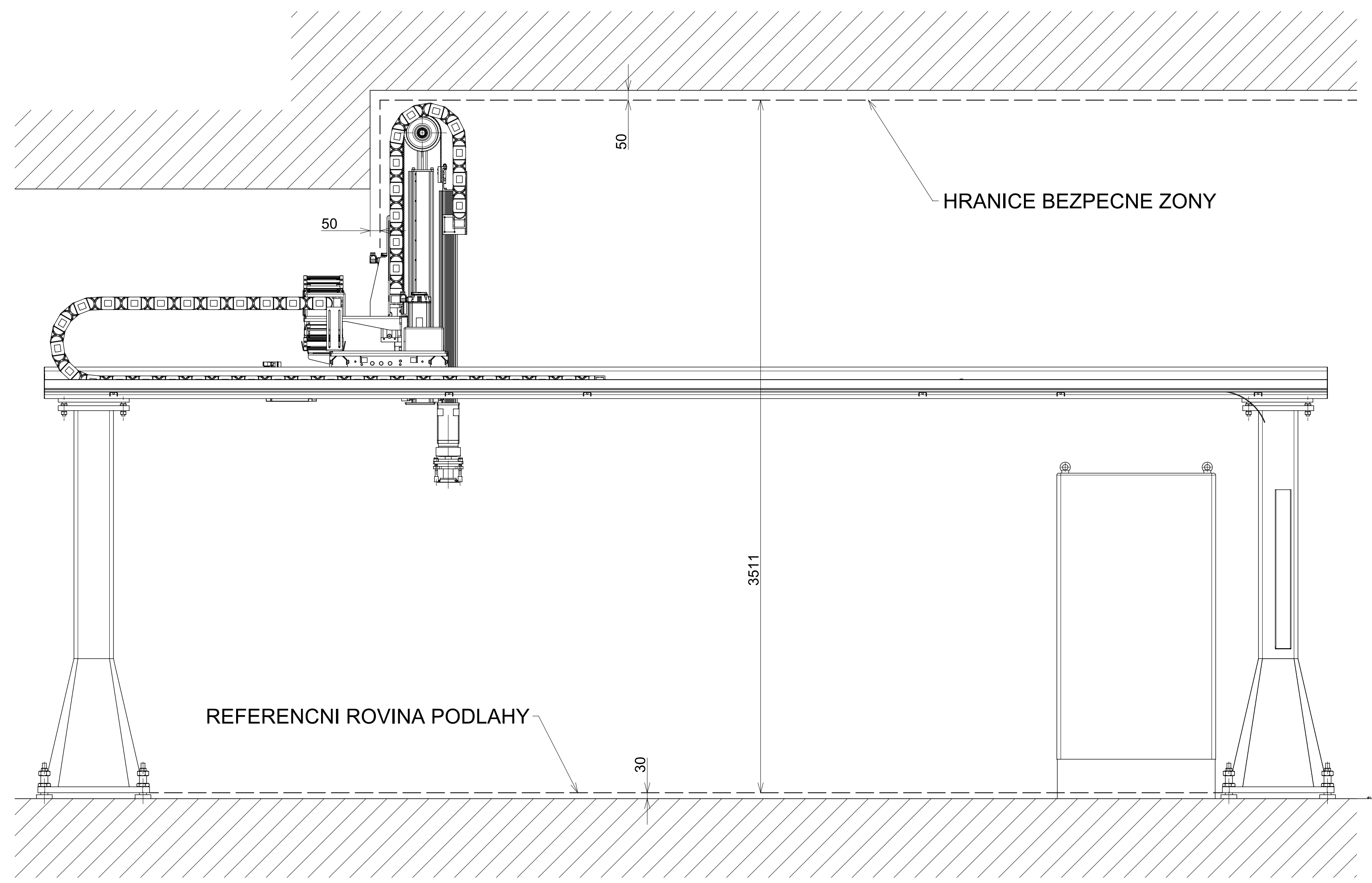
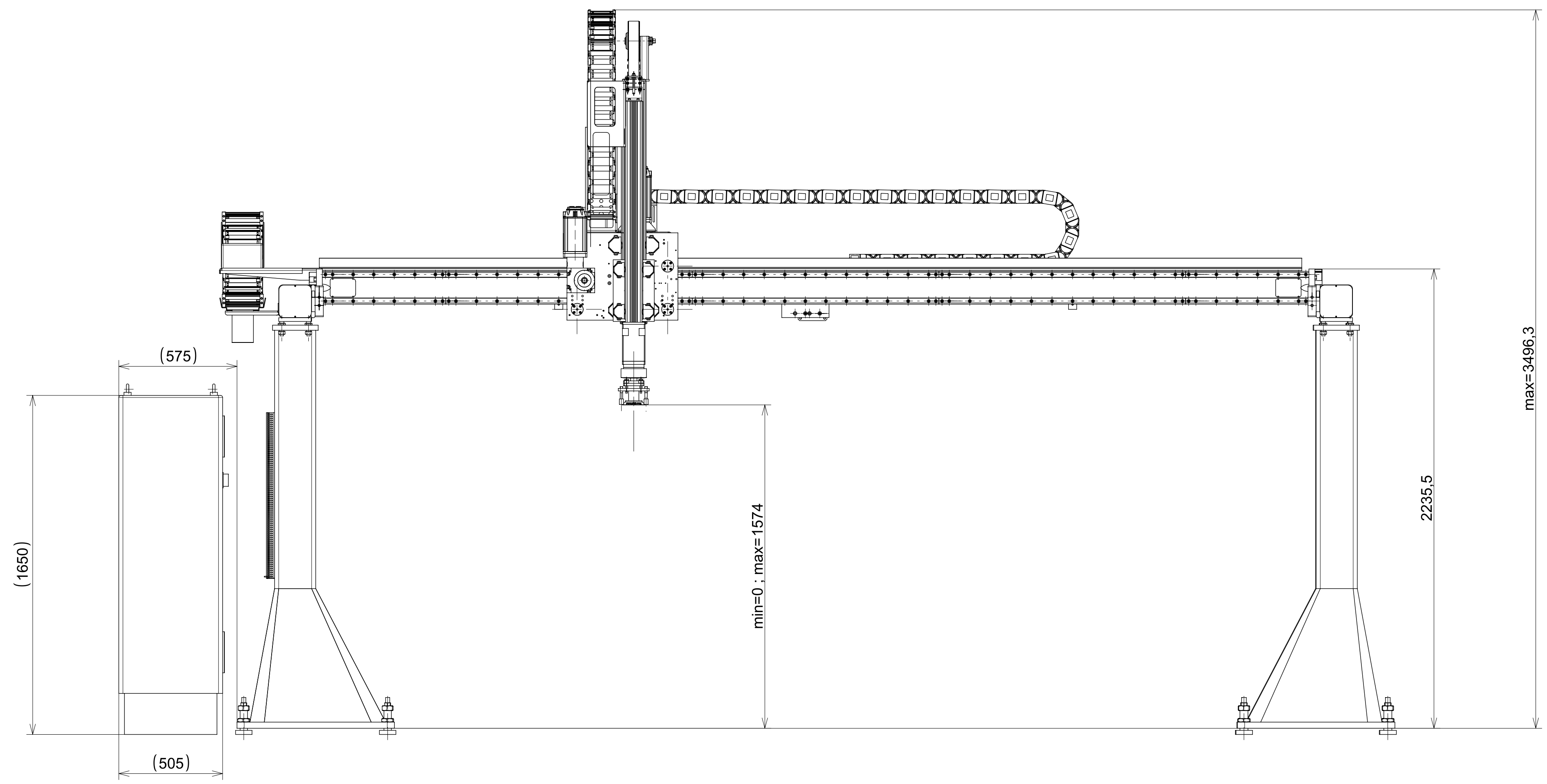


## Seznam obrázků

|  |    |
|--|----|
| Obrázek 1 - Vazby - Varianta A1 - Profil dolní .....                               | 2  |
| Obrázek 2 - Posuv v X - Pohyb v X - Varianta A1 - Profil dolní.....                | 3  |
| Obrázek 3 - Posuv v Y - Pohyb v Y - Varianta A1 - Profil dolní.....                | 3  |
| Obrázek 4 - Posuv v X - Pohyb v X+Y+Z - Varianta A1 - Profil dolní.....            | 4  |
| Obrázek 5 - Posuv v Y - Pohyb v X+Y+Z - Varianta A1 - Profil dolní.....            | 4  |
| Obrázek 6 - Vazby - Varianta A1 - Profil horní .....                               | 5  |
| Obrázek 7 - Posuv v X - Pohyb v X - Varianta A1 - Profil horní .....               | 6  |
| Obrázek 8 - Posuv v Y - Pohyb v Y - Varianta A1 - Profil horní .....               | 6  |
| Obrázek 9 - Posuv v X - Pohyb v X+Y+Z - Varianta A1 - Profil horní.....            | 7  |
| Obrázek 10 - Posuv v Y - Pohyb v X+Y+Z - Varianta A1 - Profil horní.....           | 7  |
| Obrázek 11 - Vazby - Varianta A1 - Rameno dolní .....                              | 9  |
| Obrázek 12 - Posuv v X - Pohyb v X - Varianta A1 - Rameno dolní .....              | 10 |
| Obrázek 13 - Posuv v Y - Pohyb v Y - Varianta A1 - Rameno dolní .....              | 10 |
| Obrázek 14 - Posuv v X - Pohyb v X+Y+Z - Varianta A1 - Rameno dolní.....           | 11 |
| Obrázek 15 - Posuv v Y - Pohyb v X+Y+Z - Varianta A1 - Rameno dolní.....           | 11 |
| Obrázek 16 - Vazby - Varianta A1 - Rameno horní.....                               | 12 |
| Obrázek 17 - Posuv v X - Pohyb v X - Varianta A1 - Rameno horní .....              | 13 |
| Obrázek 18 - Posuv v Y - Pohyb v Y - Varianta A1 - Rameno horní .....              | 13 |
| Obrázek 19 - Posuv v X - Pohyb v X+Y+Z - Varianta A1 - Rameno horní .....          | 14 |
| Obrázek 20 - Posuv v Y - Pohyb v X+Y+Z - Varianta A1 - Rameno horní .....          | 14 |
| Obrázek 21 - Vazby - Varianta B - Rameno dolní .....                               | 17 |
| Obrázek 22 - Posuv v X - Pohyb v X+Y+Z - Varianta B - Rameno dolní.....            | 18 |
| Obrázek 23 - Posuv v Y - Pohyb v X+Y+Z - Varianta B - Rameno dolní.....            | 18 |
| Obrázek 24 - Vazby - Varianta B - Rameno horní .....                               | 19 |
| Obrázek 25 - Posuv v X - Pohyb v X+Y+Z - Varianta B - Rameno horní.....            | 20 |
| Obrázek 26 - Posuv v Y - Pohyb v X+Y+Z - Varianta B - Rameno horní.....            | 20 |
| Obrázek 27 - Spojení ramen - Varianta B .....                                      | 22 |
| Obrázek 28 - Posuv v X - Pohyb v X+Y+Z - Varianta B - Celková úloha .....          | 23 |
| Obrázek 29 - Posuv v Y - Pohyb v X+Y+Z - Varianta B - Celková úloha .....          | 23 |
| Obrázek 30 - Konstrukční úprava - Varianta B .....                                 | 24 |
| Obrázek 31 - Posuv v X - Pohyb v X+Y+Z - Varianta B upravená - Celková úloha ..... | 25 |
| Obrázek 32 - Posuv v Y - Pohyb v X+Y+Z - Varianta B upravená - Celková úloha ..... | 25 |

## Seznam tabulek

|  |    |
|--|----|
| Tabulka 1 - Porovnání posuvů varianty A1 - Profily samostatně.....           | 8  |
| Tabulka 2 - Posuvy varianty A1 - MKP - Kontaktní úloha.....                  | 15 |
| Tabulka 3 - Posuvy varianty B - MKP - Kontaktní úloha.....                   | 21 |
| Tabulka 4 - Posuvy varianty B - MKP – Celková kontaktní úloha.....           | 26 |
| Tabulka 5 - Posuvy varianty B po úpravě - MKP – Celková kontaktní úloha..... | 26 |



IZOMETRICKY  
1:20

| Pril. | Nazev - rozmer | Polkovani | Material kompozitovycha | T.O.     | C.hood | W.hood     | Obj.vykonu       | Pracet k1 |
|-------|----------------|-----------|-------------------------|----------|--------|------------|------------------|-----------|
| Pril. | Titul - opis   | W.hood    | Obj.vykonu              | C.hood   | W.hood | Obj.vykonu | Pracet k1        | Q.hood    |
| 6     | ROZVODNA SKRIN | ---       | ---                     | ---      | ---    | ---        | ---              | 1         |
| 5     | OSA Z          | ---       | ---                     | 47,371   | ---    | ---        | KKS2021-01-01-00 | 1         |
| 4     | POJEZD         | ---       | ---                     | 59,979   | ---    | ---        | KKS2021-01-05-00 | 1         |
| 3     | OSA Y          | ---       | ---                     | 389,976  | ---    | ---        | KKS2021-01-04-00 | 1         |
| 2     | MOST PRAVY     | ---       | ---                     | 1000,862 | ---    | ---        | KKS2021-01-03-00 | 1         |
| 1     | MOST LEVY      | ---       | ---                     | 1000,919 | ---    | ---        | KKS2021-01-02-00 | 1         |

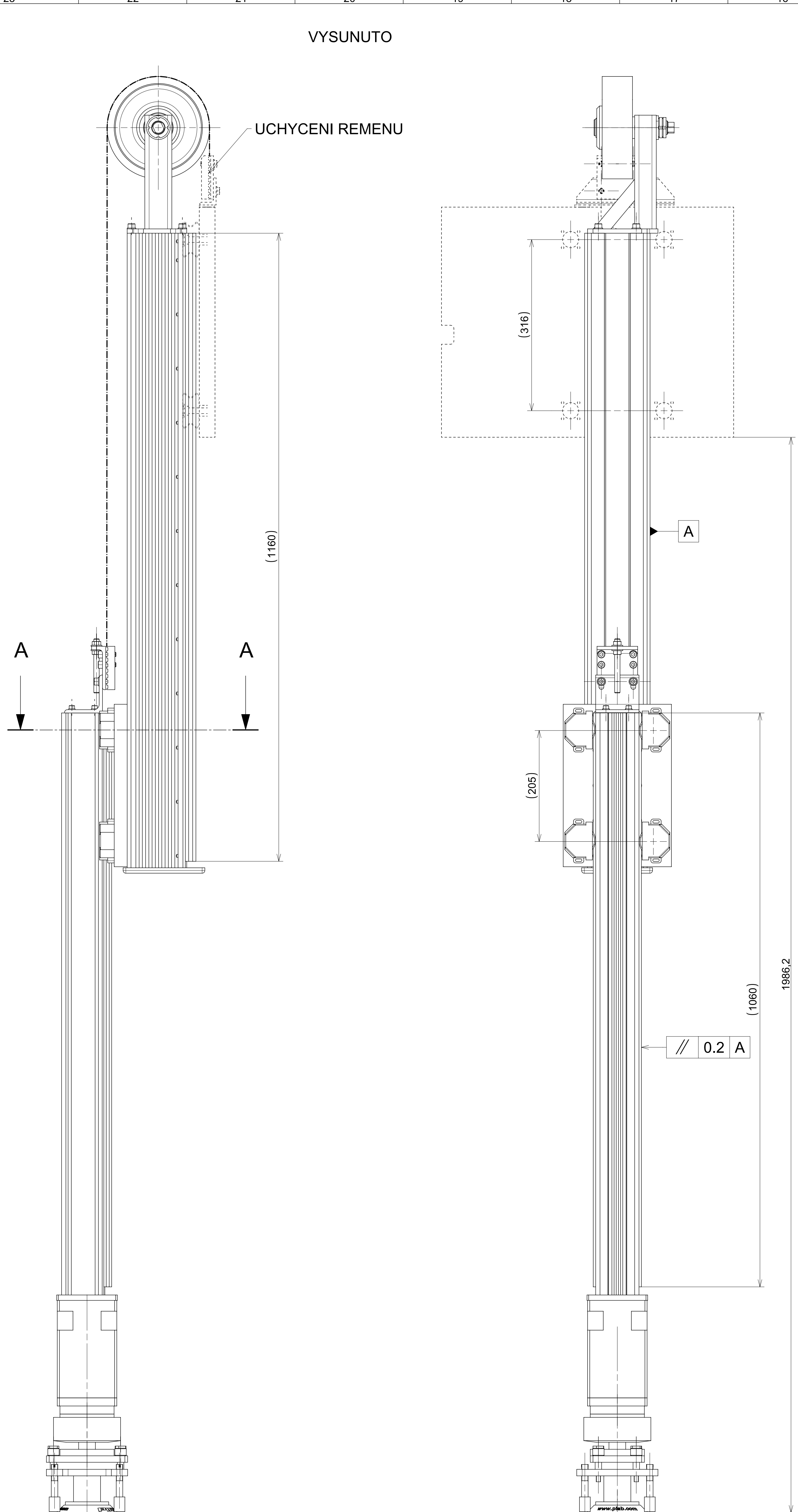
  

|          |              |       |              |       |              |
|----------|--------------|-------|--------------|-------|--------------|
| Pril.    | Titul - opis | Pril. | Titul - opis | Pril. | Titul - opis |
| 5.4.2021 | Jan Houba    | ---   | ---          | ---   | ---          |
| ---      | ---          | ---   | ---          | ---   | ---          |
| ---      | ---          | ---   | ---          | ---   | ---          |
| ---      | ---          | ---   | ---          | ---   | ---          |
| ---      | ---          | ---   | ---          | ---   | ---          |

|           |          |           |                          |         |      |
|-----------|----------|-----------|--------------------------|---------|------|
| ISO 10303 | ISO 9105 | ISO 27694 | PORTAL_FPS_jakoskop_varB | 2499,11 | 1:15 |
| ---       | ---      | ---       | ---                      | ---     | ---  |
| ---       | ---      | ---       | ---                      | ---     | ---  |
| ---       | ---      | ---       | ---                      | ---     | ---  |

**PORTALOVY MANIPULATOR** 0 KKS2021-01-00-00 A0



UCHYCENI REMENU

(1160)

(316)

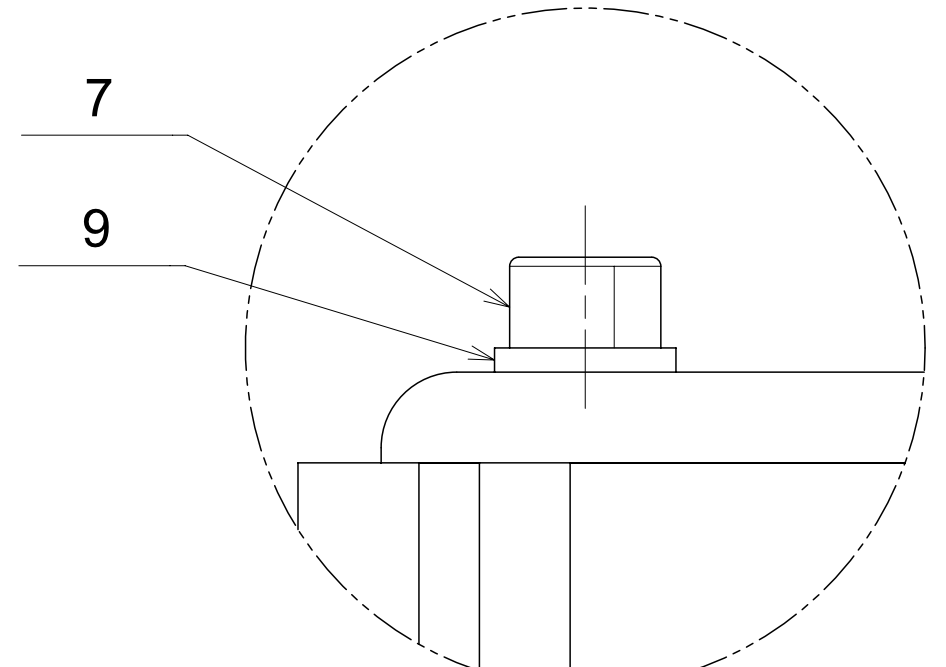
(205)

(1060)

1986.2

// 0.2 A

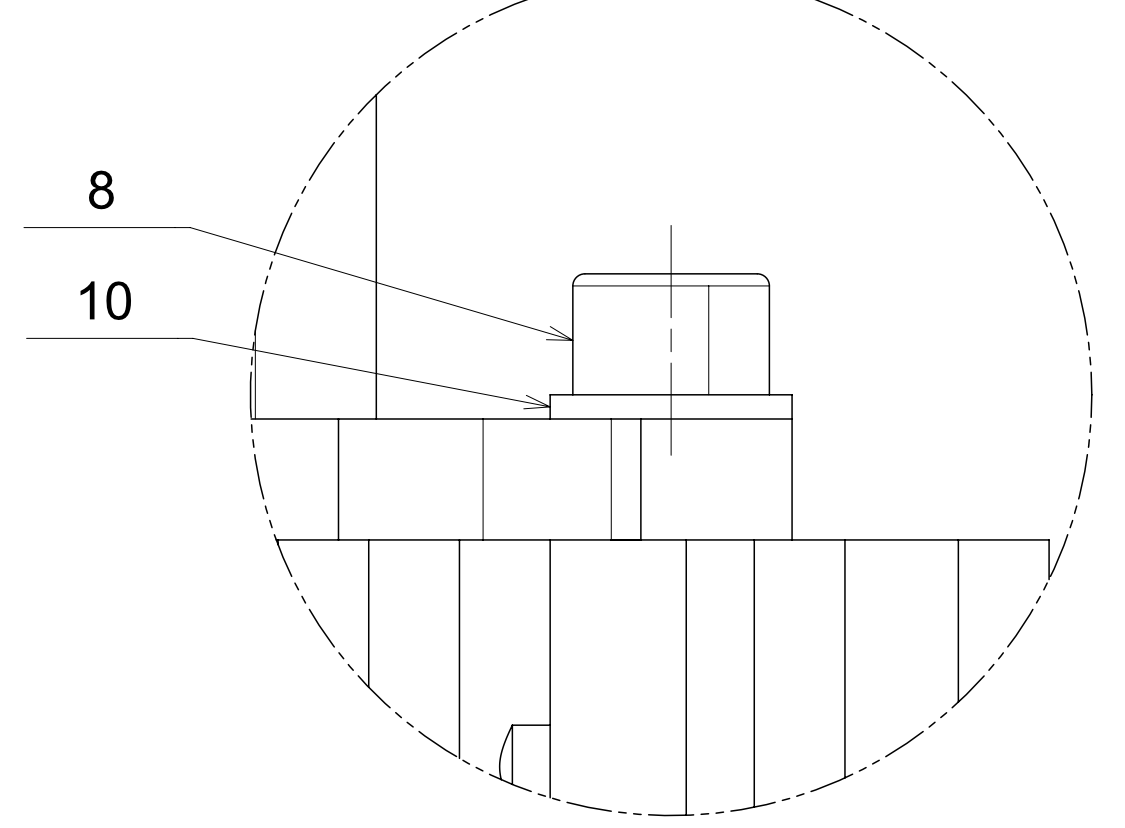
DETAIL X 2:1



7

9

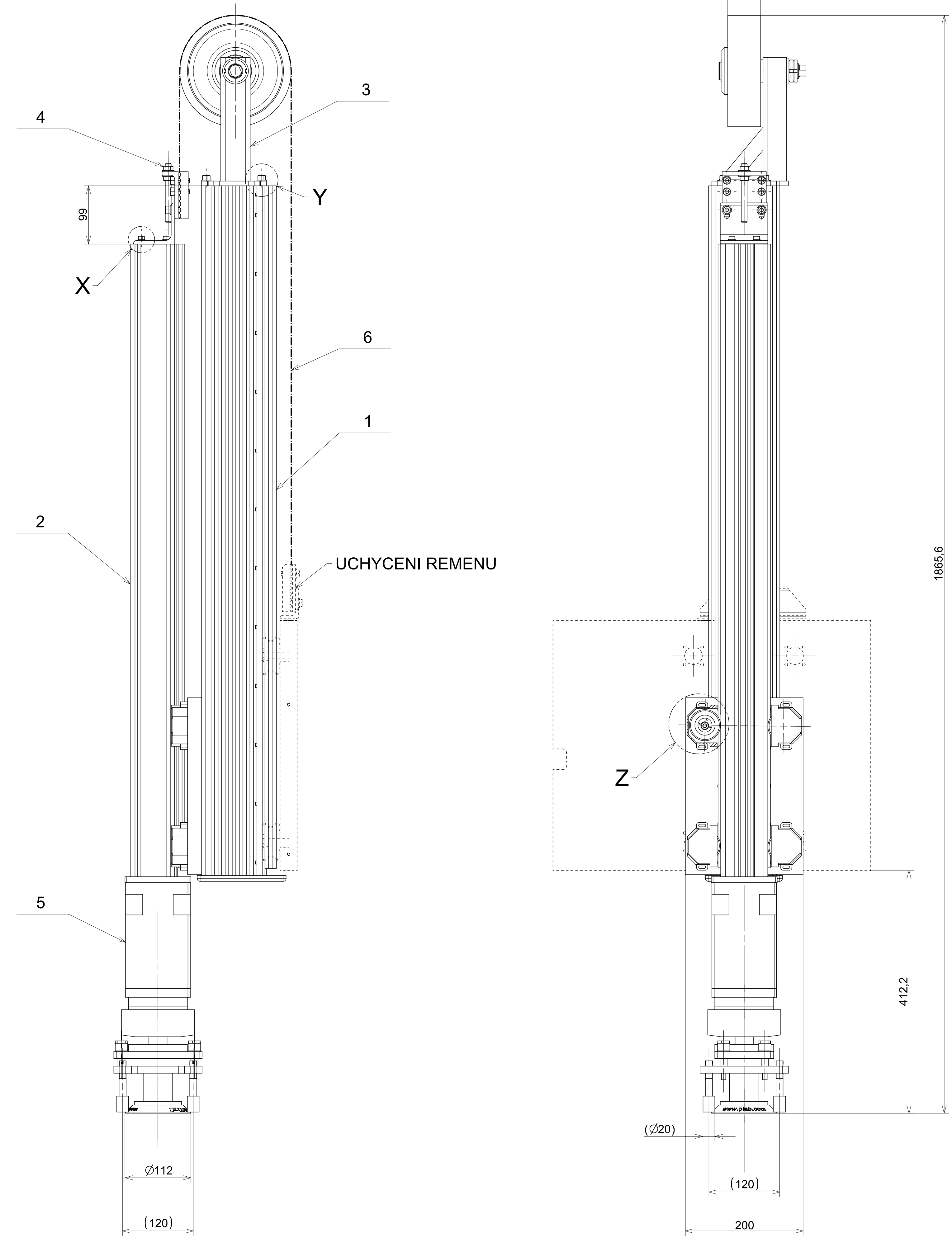
DETAIL Y 2:1



8

10

ZASUNUTO



UCHYCENI REMENU

1965.6

412.2

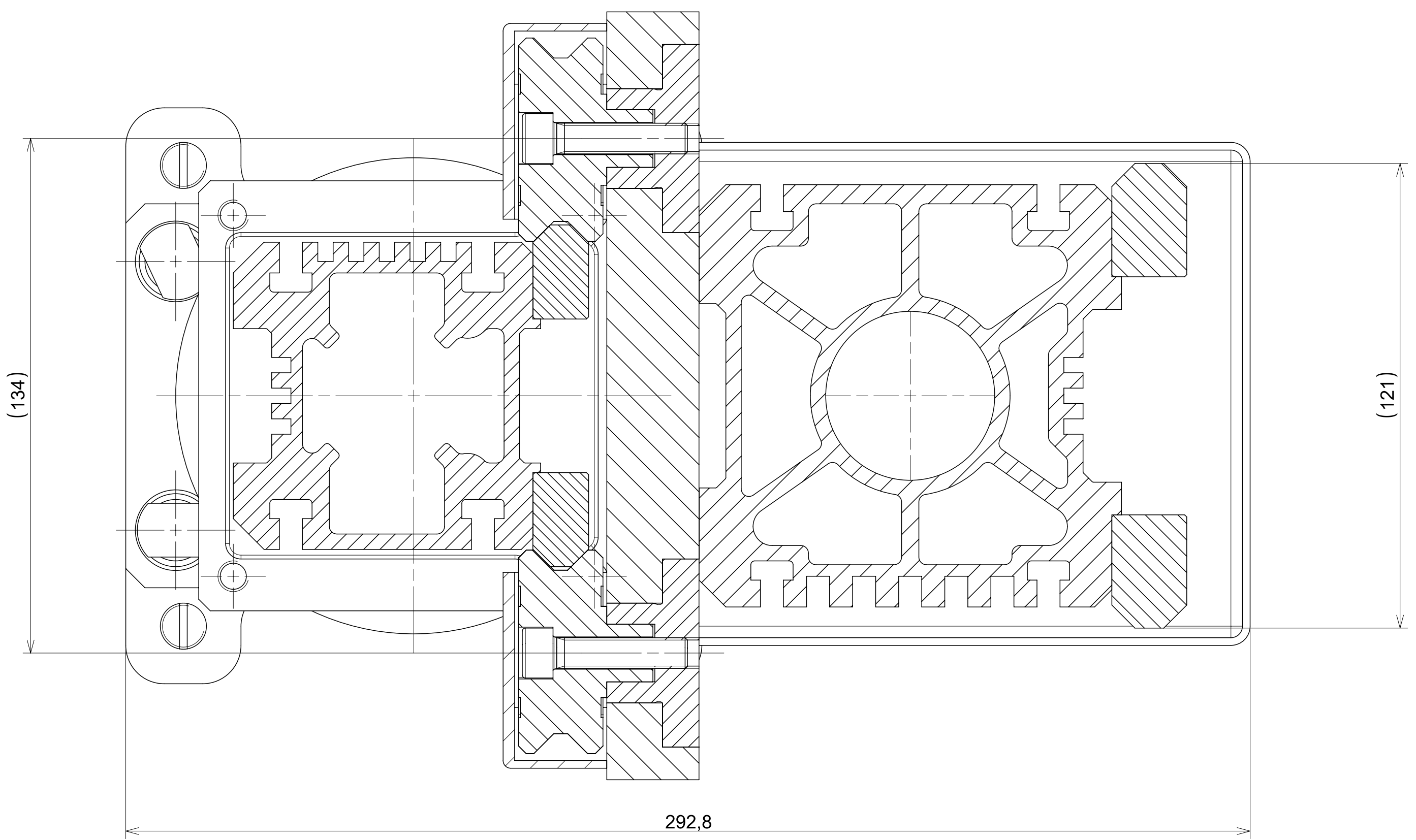
Ø112

(120)

Ø120

(120)

A-A 1:1

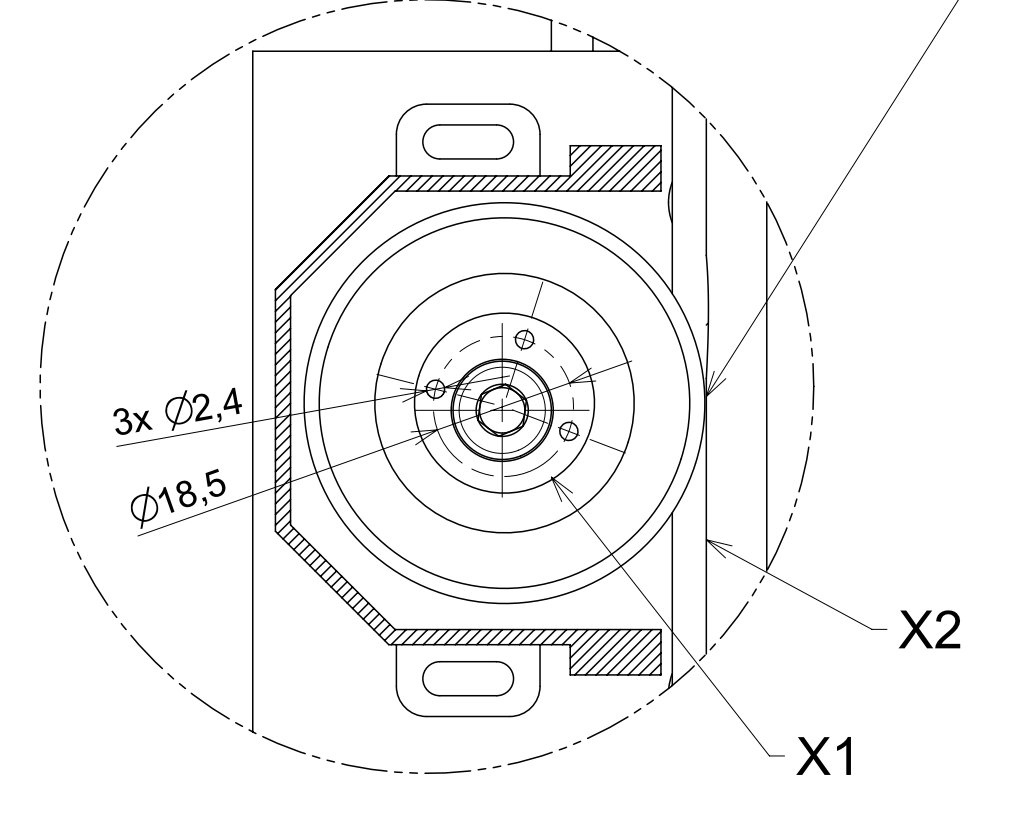


(134)

292.8

PRI MONTAZI VYMEZIT VULE MEZI POZICEMI X1 A X2 OTACENIM POZICE X1 DOPRAVA

DETAIL Z 1:1  
VYMEZENI VULE



3x Ø2.4

Ø18.5

X2

X1

| Pos. | Název         | Objekt | Podstavka | Material       | Koeficient | hm. jednot. | hm. jednot. | hm. jednot. | hm. jednot.      | hm. jednot. |
|------|---------------|--------|-----------|----------------|------------|-------------|-------------|-------------|------------------|-------------|
| 10   | PODLOZKA B    | ---    | ---       | CSN 02 1702 B/ | ---        | 0.003       | ---         | ---         | ---              | 4           |
| 9    | PODLOZKA 6    | ---    | ---       | CSN 02 1702 B/ | ---        | 0.001       | ---         | ---         | ---              | 4           |
| 8    | SROUB M6 x 25 | ---    | ---       | DIN 912/       | ---        | 0.017       | ---         | ---         | ---              | 4           |
| 7    | SROUB M6 x 20 | ---    | ---       | DIN 912/       | ---        | 0.007       | ---         | ---         | ---              | 4           |
| 6    | REMEN         | ---    | ---       | ELATECH/       | ---        | 0.450       | ---         | ---         | T31394           | 1           |
| 5    | EFEKTOR       | ---    | ---       | ---            | ---        | 9.069       | ---         | ---         | ---              | 1           |
| 4    | ZAVESENI      | ---    | ---       | ---            | ---        | 1.123       | ---         | ---         | KKS2021-01-01-04 | 1           |
| 3    | KLADKA        | ---    | ---       | ---            | ---        | 4.926       | ---         | ---         | KKS2021-01-01-03 | 1           |
| 2    | RAMENO DOLNI  | ---    | ---       | ---            | ---        | 12.545      | ---         | ---         | KKS2021-01-01-02 | 1           |
| 1    | RAMENO Horni  | ---    | ---       | ---            | ---        | 26.777      | ---         | ---         | KKS2021-01-01-01 | 1           |

|          |           |            |            |             |              |              |              |              |              |
|----------|-----------|------------|------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Proj.:   | Název:    | Objekt:    | Podstavka: | Material:   | Koeficient:  | hm. jednot.: | hm. jednot.: | hm. jednot.: | hm. jednot.: |
| 5.4.2021 | Jan Houba | ---        | ---        | ---         | ---          | ---          | ---          | ---          | ---          |
| Proj.:   | Objekt:   | Podstavka: | Material:  | Koeficient: | hm. jednot.: | hm. jednot.: | hm. jednot.: | hm. jednot.: | hm. jednot.: |
| ---      | ---       | ---        | ---        | ---         | ---          | ---          | ---          | ---          | ---          |
| Proj.:   | Objekt:   | Podstavka: | Material:  | Koeficient: | hm. jednot.: | hm. jednot.: | hm. jednot.: | hm. jednot.: | hm. jednot.: |
| ---      | ---       | ---        | ---        | ---         | ---          | ---          | ---          | ---          | ---          |

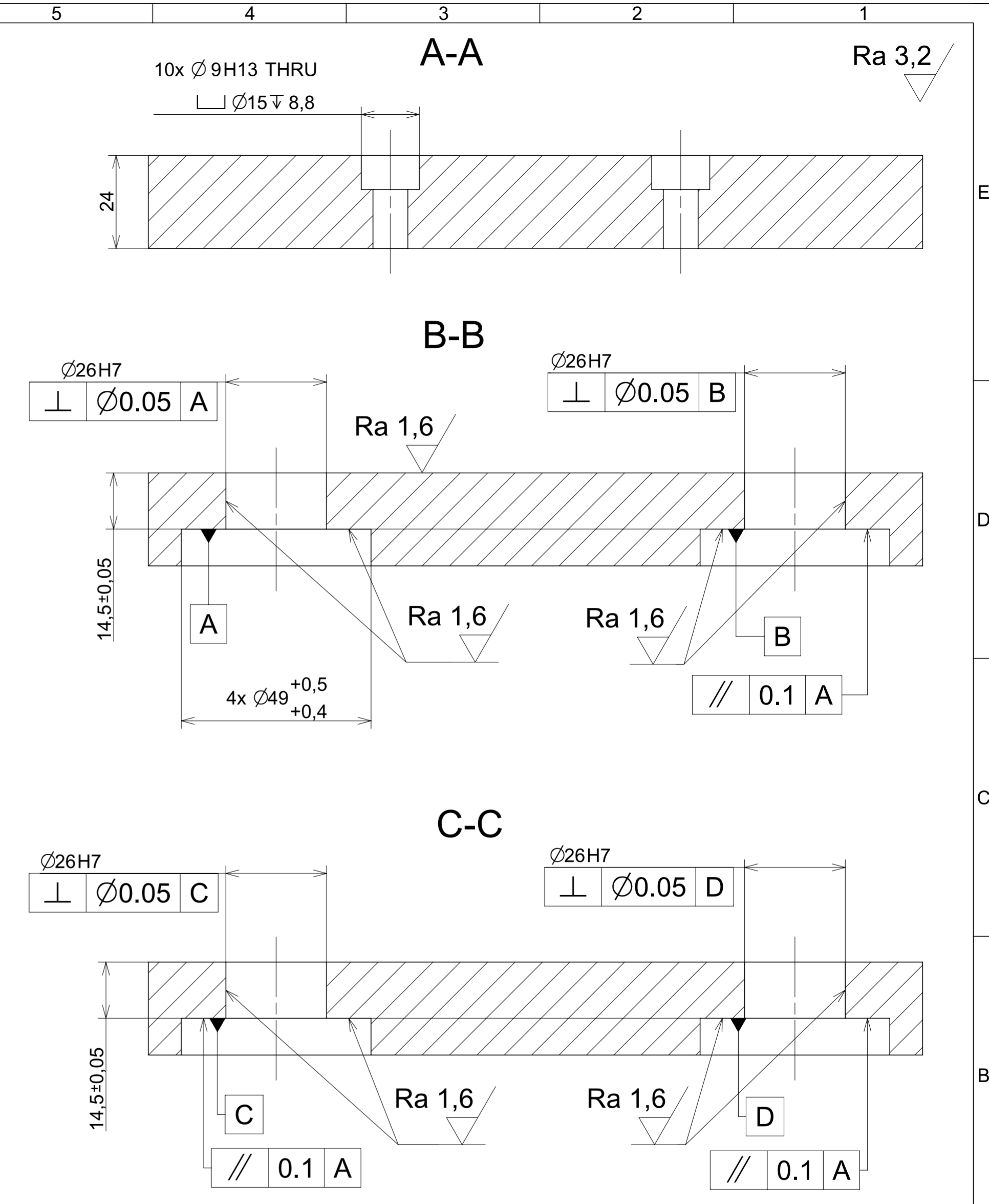
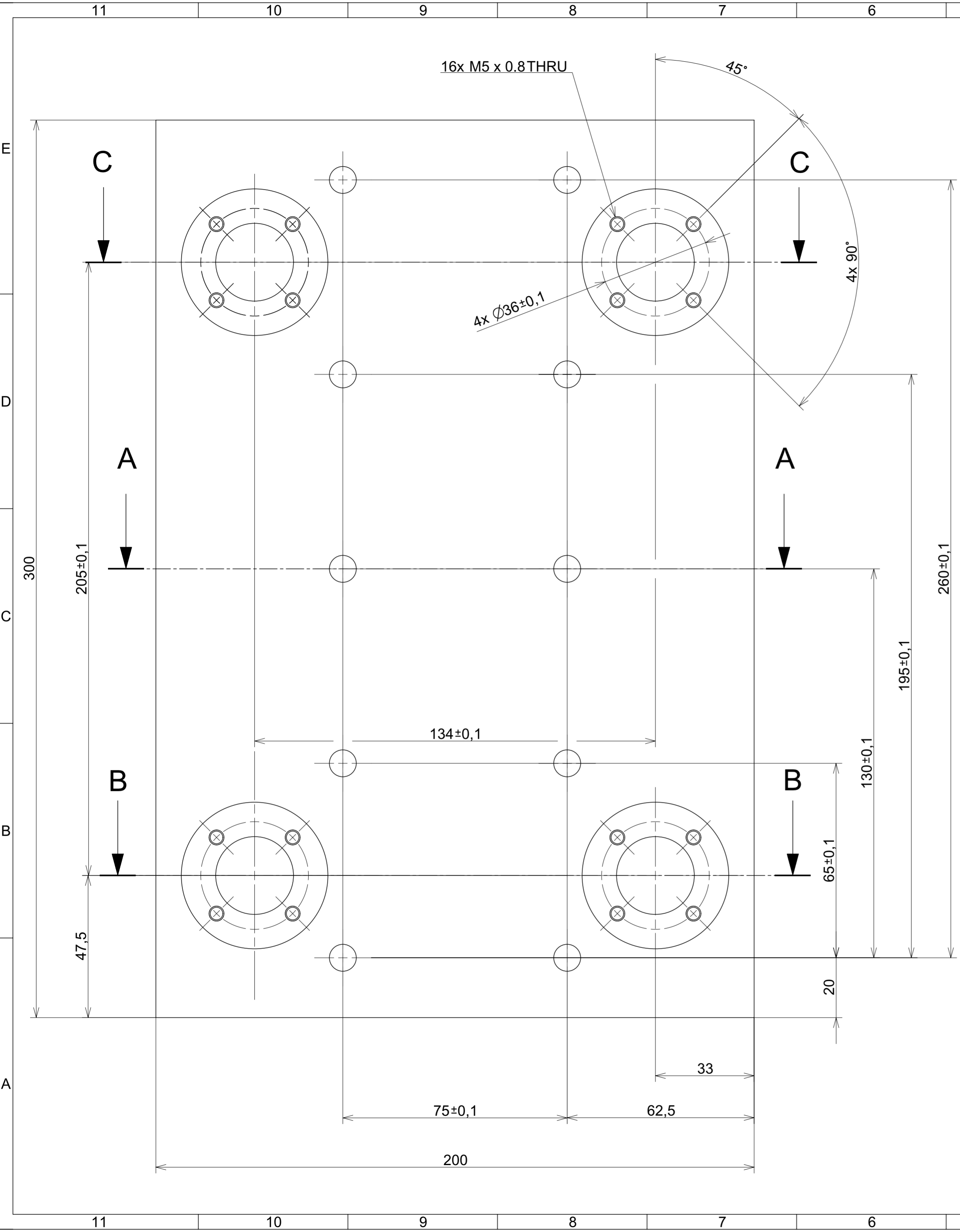
OSA Z - VARIANTA A1 0 KKS2021-01-01-00

FAKULTA STROJNI  
ZAPADOCESKA  
UNIVERSITY  
V PILENI

VARIANTA A1

1:4

A0



|                         |                                  |                          |                             |                          |                             |                      |                       |                 |
|-------------------------|----------------------------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------|-----------------------------|----------------------|-----------------------|-----------------|
| 1                       | ---                              | 306x206x26               | EN AW-6082/                 | ---                      | 3,482                       | ---                  | KKS2021-01-01-01-01   | -               |
| Poz.                    | Nazev - rozmer                   | Polotovar                | Material konecny/vychazi    | T.O.                     | C.hmot.                     | H.hmot.              | Cislo vykresu sestavy | Pocet ks.       |
| Pos.                    | Title - size                     | Blank                    | End material/Start material | C.W.                     | Weight                      | R.weig.              | Assembly drawing no.  | Quant.          |
| cad 1                   | Datum / Date                     | Jmeno / Name             |                             |                          |                             |                      |                       |                 |
| Kreslil / Drawn by      | 5. 4. 2021                       | Jan Houba                |                             |                          |                             |                      |                       |                 |
| Prezkoušel / Checked by | ---                              | ---                      |                             |                          |                             |                      |                       |                 |
| Schválil / Approved by  | ---                              | ---                      |                             |                          |                             |                      |                       |                 |
| Index zmeny             | Popis zmeny / change description | Schval. / APP            | Datum / Date                | Podpis / Signature       | Poznámka / Note:            |                      |                       |                 |
| ---                     | ---                              | ---                      | ---                         | ---                      | ---                         |                      |                       |                 |
| ---                     | ---                              | ---                      |                             |                          |                             |                      |                       |                 |
| ISO 128                 | Tolerance / Tolerovani           | Soubor-model / ASM-file  |                             | Projekt / Project:       | ---                         |                      |                       | Meritko / Scale |
|                         | ISO 8015<br>ISO 2768mK           | Soubor-vykres / DRW-file |                             | C.sestavy / Assembly No. | KKS2021-01-01-01-01         |                      |                       | 1:1             |
| Nazev / Title           |                                  |                          |                             | Rev.                     | Cislo vykresu / Drawing No. |                      |                       | Format          |
| DESKA ULOZENI           |                                  |                          |                             | 0                        | KKS2021-01-01-01-01         |                      |                       | A2              |
|                         |                                  |                          |                             | List / sheet no.         | 1                           | Pocet listu / sheets |                       | 1               |