



---

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**  
**FAKULTA STROJNÍ**



**Ústav konstruování a částí strojů**

**Stínící dveře kalibrační laboratoře**

**Shielding Doors Of Calibration Laboratory**

Bakalářská práce

Studijní program: B2341 STROJÍRENSTVÍ  
Studijní obor: 3901R051 Konstruování podporované počítačem  
Vedoucí práce: Ing. František Lopot, Ph.D.

**Jan Řáda**

---

**Praha 2015**

Vysoká škola: **České vysoké učení technické v Praze**  
Fakulta: **strojní**  
Ústav: **12113, Ústav konstruování a částí strojů**  
Akademický rok: **2014/2015**

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

Student: **Jan Řáda**  
Studijní program: **Strojírenství**  
Studijní obor: **Konstruování podporované počítačem**

Název práce: **Stínící dveře kalibrační laboratoře**

Název práce anglicky: **Shielding Doors Of Calibration Laboratory**

Zadání práce:

Ve spolupráci se zadavatelem, společností UJP PRAHA a.s., v rámci bakalářské práce vypracujte konstrukční řešení pro stínící dveře kalibrační laboratoře se zdrojem ionizujícího záření  $^{60}\text{Co}$ . Práce bude zahrnovat návrh samotné konstrukce dveří z uzavřených ocelových profilů, krytování konstrukce a pohonné jednotky. Součástí výstupu práce bude 3D a 2D výkresová dokumentace a průvodní dokumentace v rozsahu požadovaném zadavatelem. Výkresová dokumentace bude zveřejněna v rozsahu dle podmínek zadavatele.

Stručná osnova zadání:

1. Rešerše používaných technických řešení podobných systémů.
2. Rešerše dostupných pohonných jednotek.
3. Zpracování vlastního konstrukčního návrhu.
4. Nezbytné základní dimenzování a kontrolní výpočty.
5. Tvorba 2D a 3D technické dokumentace.

Rozsah grafické části:

1. 3D model.
2. 2D dokumentace dle požadavků zadavatele.

Specifikace textové části:

1. Formální úprava práce dle požadavků Ú12113.
2. Min. rozsah 30 stran vč. obrázků, přílohy zvlášť.

Doporučené podklady:

- ŠVEC, V. *Části a mechanismy strojů. Spoje a části spojovací*. Praha: ČVUT, 2008.  
ŠVEC, V. *Části a mechanismy strojů. Mechanické převody*. Praha: ČVUT, 2003.  
Katalogy výrobců a dodavatelů materiálu a užitých komponent.

Vedoucí práce: **Ing. František Lopot, Ph.D.**  
Konzultant: **Ing. Pavel Krupička**

Datum zadání: **30. 4. 2015**  
Termín odevzdání: **19. 6. 2015**

Zadání bakalářské práce převzal dne: 30.4.2015



.....  
podpis studenta



.....  
prof. Ing. Vojtěch Dinybyl, Ph.D.  
vedoucí ústavu



.....  
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
děkan fakulty



## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem: „Stínící dveře kalibrační laboratoře“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Františka Lopota, Ph.D., s použitím literatury, uvedené na konci mé bakalářské práce v seznamu použité literatury.

V Praze 9.6.2015

Jan Řáda

## Poděkování

Děkuji vedoucímu práce Ing. Františku Lopotovi, Ph.D., za jeho rady a konzultace v průběhu celé práce. Dále děkuji Ing. Radku Rejnovi za trpělivost a praktické připomínky během návrhu předmětu práce a Ing. Pavlu Krupičkovi za teoretické poznámky a umožnění zpracovat tuto bakalářskou práci z praxe.

Mé poděkování patří také celé rodině za podporu v průběhu studia.

## Anotační list

Jméno autora:	<b>Jan Řáda</b>
Název BP:	<i>Stínící dveře kalibrační laboratoře</i>
Anglický název:	Shielding Doors Of The Calibration Laboratory
Rok:	2015
Studijní program:	B2341 STROJÍRENSTVÍ
Obor studia:	390R051 Konstruování podporované počítačem
Ústav:	<i>Ústav konstruování a částí strojů</i>
Vedoucí BP:	<i>Ing. František Lopot, Ph.D.</i>
Konzultant:	<i>Ing. Pavel Krupička</i>
Bibliografické údaje:	počet stran 64 počet obrázků 40 počet tabulek 3 počet příloh 7
Klíčová slova:	ionizující, stínící, kalibrační
Keywords:	ionizing, shielding, calibration
Anotace:	Předmětem práce je návrh stínících dveří kalibrační laboratoře a to včetně výrobní výkresové dokumentace s přímou vazbou na praxi.
Abstract:	The object of this work is to design a shielding door of a calibration laboratory, including manufacturing drawings with a direct link to the practice.



## Obsah

Seznam zkratk .....	9
1. Úvod .....	12
2. Cíl práce .....	13
3. Rešerše .....	14
3.1. Řešení konstrukčních možností rámu dveří .....	14
3.1.1. Konstrukce z tvarovaných Al profilů .....	14
3.1.2. Konstrukce ze svařených ocelových hutních polotovarů .....	15
3.2. Možnosti stínění ionizujícího záření .....	16
3.3. Pohon stínících dveří.....	17
3.3.1. Průmyslový pohon pro vjezdové brány .....	17
3.3.2. Navržení vlastní sestavy elektromotoru, převodovky a řízení soustavy ....	18
3.4. Problematika vedení napájecích a ovládacích kabelů do soustavy.....	19
3.4.1. Kabelový vozík na ocelovém laně .....	20
3.4.2. Kabelový buben .....	20
3.4.3. Energetický řetěz .....	21
4. Konstrukční návrh .....	23
4.1. Řešení konstrukčních možností rámu vrat .....	23
4.2. Možnosti stínění ionizujícího záření .....	23
4.2.1. Provedení konstrukce olověného stínění .....	23
4.3. Pohon stínících dveří.....	25
4.4. Problematika vedení napájecích a ovládacích kabelů do soustavy.....	29
4.5. Konstrukční varianty.....	29
4.6. Nosný rám.....	31
4.6.1. Volba základních polotovarů .....	31
4.6.2. Svařenec nosného rámu .....	34



4.6.3. Stínění.....	36
4.7. Kolečka .....	37
4.8. Čep kolečka .....	39
4.8.1. Pevnostní výpočet čepu kolečka .....	40
4.9. Uchycení pohonné jednotky .....	44
4.10. Krytování konstrukce .....	45
5. Realizace a montáž .....	46
6. Závěr .....	51
Seznam použité literatury.....	52
Seznam obrázků .....	53
Seznam tabulek .....	55
Seznam příloh .....	55
Přílohy.....	56



## Seznam zkratk

ALARA	[ - ]	As Low As Reasonably Achievable – princip návrhu stínění
PLC	[ - ]	Programovatelný logický automat
SÚJB	[ - ]	Státní úřad pro jadernou bezpečnost
ZIZ	[ - ]	Zdroj ionizujícího záření

### Latinská abeceda:

b	[ mm ]	šířka ozubení
d	[ mm ]	průměr, průměr roztečné kružnice
d <sub>a</sub>	[ mm ]	průměr hlavové kružnice
d <sub>f</sub>	[ mm ]	průměr patní kružnice
F	[ N ]	síla
F <sub>n</sub>	[ N ]	síla na jeden nosník
F <sub>o</sub>	[ N ]	obvodová síla na ozubeném kole
F <sub>t</sub>	[ N ]	tečná síla na ozubeném kole
F <sub>z</sub>	[ N ]	síla na boku zubu
g	[ m/s <sup>2</sup> ]	gravitační zrychlení
h	[ mm ]	výška zubu
h <sub>a</sub>	[ mm ]	výška hlavy zubu
h <sub>f</sub>	[ mm ]	výška paty zubu
i	[ - ]	převodový poměr
J <sub>HV</sub>	[ HV ]	tvrdost jádra zubu
K <sub>A</sub>	[ - ]	součinitel vnějších dynamických sil
K <sub>Fα</sub>	[ - ]	součinitel podílu zatížení jednotlivých zubů (ohyb)
K <sub>Fβ</sub>	[ - ]	součinitel nerovnoměrnosti zatížení zubů po šířce (ohyb)



$K_{Fv}$	[ - ]	součinitel vnitřních dynamických sil (ohyb)
$K_H$	[ - ]	součinitel přídavných zatížení (dotyk)
$K_{H\alpha}$	[ - ]	součinitel podílu zatížení jednotlivých zubů (dotyk)
$K_{H\beta}$	[ - ]	součinitel nerovnoměrnosti zatížení zubů po šířce (dotyk)
$K_{Hv}$	[ - ]	součinitel vnitřních dynamických sil (dotyk)
$l$	[ mm ]	délka
$m$	[ mm ]	modul ozubeného kola
$m$	[ kg ]	hmotnost
$M_k$	[ Nmm ]	kroučící moment
$M_o$	[ Nmm ]	ohybový moment
$p$	[ mm ]	rozteč zubů
$R$	[ N ]	reakční síla
$S_F$	[ - ]	bezpečnost proti únavovému lomu
$S_H$	[ - ]	bezpečnost proti tvorbě pittingu
$V_{HV}$	[ HV ]	tvrdost na boku zubu
$W_o$	[ mm <sup>3</sup> ]	modul průřezu v ohybu
$Y_{FS}$	[ - ]	součinitel tvaru zubu a koncentrace napětí
$Y_\beta$	[ - ]	součinitel sklonu zubu
$Y_\epsilon$	[ - ]	součinitel vlivu záběru pohybu (ohyb)
$z$	[ - ]	počet zubů ozubeného kola
$Z_E$	[ - ]	součinitel mechanických vlastností materiálu
$Z_\epsilon$	[ - ]	součinitel součtové délky dotykových křivek boků zubů



### Řecká abeceda:

$\alpha$	[ ° ]	úhel záběru
$\alpha_o$	[ - ]	součinitel tvaru pro ohyb osazené hřídele
$\beta$	[ ° ]	úhel sklonu zubu
$\varepsilon_\alpha$	[ - ]	součinitel záběru
$\rho$	[ mm ]	poloměr zaoblení osazení hřídele
$\sigma_{Do}$	[ MPa ]	dovolené napětí v ohybu
$\sigma_F$	[ MPa ]	napětí v ohybu na pastorku
$\sigma_{Flim}$	[ MPa ]	mez únavy v ohybu
$\sigma_{Fmax}$	[ MPa ]	napětí v ohybu pro statickou únosnost
$\sigma_{FPmax}$	[ MPa ]	maximální napětí v ohybu pro statickou únosnost
$\sigma_{Hlim}$	[ MPa ]	mez únavy v dotyku
$\sigma_{Hmax}$	[ MPa ]	napětí v dotyku pro statickou únosnost
$\sigma_{Ho}$	[ MPa ]	napětí v dotyku na pastorku
$\sigma_{HPmax}$	[ MPa ]	maximální napětí v dotyku pro statickou únosnost
$\sigma_o$	[ MPa ]	ohybové napětí
$\sigma_{otvar}$	[ MPa ]	ohybové napětí s ohledem na součinitel tvaru
$\psi_{bd}$	[ - ]	poměrná šířka ozubeného kola

# 1. Úvod

Zdroje ionizačního záření se díky svým vlastnostem využívají ve stále rostoucím počtu nejen průmyslových aplikací. Jejich nespornými výhodami je stálost fyzikálních parametrů a jejich snadná deklarace bez ohledu na podmínky okolního prostředí. Díky využití moderních technologií (osobní dozimetrie, GPS navigace apod.) se významně snižují rizika spojená s používáním zdrojů ionizujícího záření (ZIZ). Přesto je nutné věnovat bezpečnosti a postupům při jejich používání velkou pozornost a zejména nepodceňovat nebezpečí tohoto záření, které není viditelné, ale jeho dopad na okolní prostředí, a to včetně ohrožení lidského života a dlouhodobých dopadů na životní prostředí, je obrovský. Z uvedených faktů je zřejmé, že úroveň znalostí o radiaci z oboru fyziky je vysoká a jejich aplikace do praxe dostupná. Nejdůležitějším krokem k zajištění jakosti a bezpečnosti při využívání ionizujícího záření je možnost měření fyzikálních parametrů těchto zdrojů. Kalibrační laboratoře se stávají jedním z nejkvalitnějších nástrojů pro stanovení parametrů ZIZ, protože porovnávají známou úroveň radiačních parametrů s ukazateli, které poskytují měřidla určená pro měření v běžné praxi včetně osobní dozimetrie. Nejčastěji se pracuje se zdrojem  $^{60}\text{Co}$ , který je etalonem pro další měření. Primárním zaměřením kalibračních laboratoří je kalibrace ionizačních komor pro měření dávkových příkonů ZIZ, ale díky koncepci je možné je použít také k výzkumným projektům např. pro zjišťování odolnosti materiálů a přístrojů vůči ionizačnímu záření. Tyto činnosti jsou velmi nápomocné při samotném výzkumu chování ZIZ a jeho působení na okolí. Každá kalibrační laboratoř podléhá přísným požadavkům Státního úřadu pro jadernou bezpečnost (SÚJB), který se řídí Atomovým zákonem č. 18/1997 Sb. v platném znění pozdějších předpisů, který předepisuje podmínky pro mírové využití jaderné energie a ionizujícího záření.

Zadavatel, společnost UJP PRAHA a.s. se zabývá několika průmyslovými obory a to obalovými soubory (kontejnery pro transport ZIZ), zdravotnickou technikou (radioterapeutické vybavení ozařoven v nemocnicích po celém světě) a výrobou defektoskopů, včetně servisu. Dalšími obory, kterými se UJP PRAHA a.s. zabývá, jsou dlouho i krátkodobé výzkumy, výroba pseudoslitin wolframu a mnoho dalších. Do produktové linie pod názvem Zdravotnická technika spadá mimo jiné segment radioterapeutických ozařovačů se systémem ozařovací hlavičky se ZIZ  $^{60}\text{Co}$ .

## 2. Cíl práce

Cílem práce je zpracování konstrukčního řešení stínících dveří pro kalibrační laboratoř T100-1400 včetně jejich pohonu. Vzhledem k odbornému zaměření zadavatele hlavně na stacionární řešení radioterapeutických systémů je tento projekt, který je koncepčně řešený jako pojízdny po kolejích považován za prototypový.

Předmět práce je součástí rozsáhlého projektu modernizace a dovybavení stávající horké komory, která bude po zkouškách a schválení SÚJB sloužit k ozařování vzorků vysoceaktivním ZIZ kobaltového zdroje  $^{60}\text{Co}$ .

Cíle práce bude dosaženo v následujících krocích při splnění definovaných konstrukčních omezení a technických požadavků:

### Postup práce:

1. Rešerše dostupných technických možností
2. Vypracování vlastních konstrukčních návrhů
3. Vypracování výrobní dokumentace
4. Montáž a vyladění sestavy v horké komoře

### Konstrukční omezení:

1. Využití stávající zástavby
2. Využití stávajících pojezdových kolejí
3. Poloha ozařovny v suterénu s omezenými možnostmi manipulace

### Technické požadavky:

1. Racionální řešení konstrukce z pohledu zajištění vstupního materiálu a komponent
2. Pohonná jednotka bude jako celek umístěná na samostatném demontovatelném rámu
3. Využití výsledků vývoje prototypu pro další řešení montáže ozařovačů
4. Splnění požadavků schvalovacího orgánu a legislativy

## 3. Rešerše

Následující kapitoly jsou věnovány shrnutí základních poznatků týkajících se možností konstrukce stínících dveří kalibrační laboratoře. Součástí této rešerše je mimo jiné i řešení problematiky stínění ionizujícího záření, pohonu stínících dveří kalibrační laboratoře včetně problematiky řízení, regulace a bezpečnosti. Dalším předmětem rešerše bude neméně důležité řešení vedení napájecích a ovládacích kabelů.

### 3.1. Řešení konstrukčních možností rámu dveří

#### 3.1.1. Konstrukce z tvarovaných Al profilů

S konstrukcemi z tvarovaných Al profilů má zadavatel práce široké zkušenosti. Konstrukce z tvarovaných profilů je používána v konstrukčním oddělení zadavatele v podstatě v každém případě, kdy je dodávána ozařovací hlavice v jiné než standardní podobě radioterapeutického ozařovače, tj. například vybavení laboratoří pro kalibrační, nebo výzkumné účely. Jedním z hlavních důvodů širokého využití hliníkových profilů (obr. 1) je i značná variabilita a jednoduchost úprav konstrukce při montáži, ale i jednoduchost doplnění konstrukce o různorodé příslušenství.



Obr. 1: Ukázka základních tvarovaných AL profilů

## Výhody

- Jednoduchost montáže
- Možnost dopravy v částečně rozloženém stavu
- Jednoduchost případné úpravy konstrukce při montáži u zákazníka

## Nevýhody

- Vyšší cena než u svařované konstrukce z hutních polotovarů
- Omezená tuhost závislá na konstrukci spojovacích uzlů

### 3.1.2. Konstrukce ze svařených ocelových hutních polotovarů

Svařenec z hutních polotovarů je základním řešením konstrukcí všech možných tvarů a typů. V konstrukčních řešeních zadavatele se této variantě vyhýbáme, protože pro potřeby zadavatele, hlavně tedy pro nosné konstrukce ozařovacích hlavic je nutné, aby byl rám co nejpřesnější. Vzhledem k velkému vnesenému vnitřnímu pnutí do materiálu během svařování, není vždy možné zaručit, že bude svařenec dostatečně přesný a velmi často je nutné přistoupit k následnému tepelnému zpracování a třískovému obrábění pro dosažení přesných rozměrů konstrukce. Dalším důvodem častějšího použití hliníkových profilů je i značná variabilita a jednoduchost úprav konstrukce při montáži, ale i jednoduchost doplnění konstrukce o různorodé příslušenství.

## Výhody

- Nižší cena než u konstrukce z tažených tvarovaných Al profilů
- Vysoká tuhost spojů
- Materiálově homogenní konstrukce

## Nevýhody

- Složitější sledování přesnosti výroby
- Nutnost závěrečné povrchové úpravy

## 3.2. Možnosti stínění ionizujícího záření

Zdroj ionizujícího záření  $^{60}\text{Co}$ , který je vložen do dozimetrického ozařovače, emituje gamma záření o průměrné energii 1,2 MeV. Z principu toto ionizující záření proniká do materiálů lépe než záření alfa nebo beta (i když je méně ionizující). Proto je pro stínění zapotřebí materiálů s vyšším atomovým číslem, tedy s vyšší hustotou.

Parametry stínění vyplývají z požadavků na bezpečnost při práci se ZIZ, kterou stanovuje Atomový zákon č. 18/1997 Sb. o mírovém využití jaderné energie a ionizujícího záření a příslušná prováděcí vyhláška SÚJB. Výchozím principem pro návrh stínění je tzv. systém ALARA (As Low As Reasonably Achievable).

Tab. 1 přináší přehled vlastností, které jsou v systému hodnocení rozhodné pro uplatnění daného materiálu.

tab. 1: Zhodnocení použití stínících materiálů v oblasti ALARA

Materiál	Výhody	Nevýhody
Ocel	Běžně dostupný materiál, snadná zpracovatelnost	Nejmenší účinnost stínění z uvažovaných materiálů
Olovo	Dobrá dostupnost, snadné opracování, dobré stínící vlastnosti pro gama záření	Nutnost přizpůsobení konstrukce pro použití olova (tečení při pokojové teplotě, omezené typy polotovarů)
Ochuzený uran	Nejlepší stínící vlastnosti pro gama záření	Speciální technologie opracování, legislativní povinnosti – nakládání s jaderným materiálem je pod kontrolou Euratomu, povinnost vytýčení speciálního prostoru, kde se nakládá s tímto materiálem
Wolfram	Po ochuzeném uranu má druhé nejlepší stínící vlastnosti gama záření	Nejvyšší cena (cca. desetinásobná oproti oceli), těžko obrobitelný materiál





### 3.3. Pohon stínících dveří

Pro pohon stínících dveří byl zvolen převod ozubeným kolem (pastorkem) spoluzabírající s ozubeným hřebenem. Ozubený hřeben je uvažován společný pro pohon stínících dveří i ozařovací hlavice s ozařovacím stolkem.

#### 3.3.1. Průmyslový pohon pro vjezdové brány

Sériově vyráběný pohon pro vjezdové brány je většinou složen z elektromotoru, jednostupňové převodovky a jednoduché řídicí jednotky. Celý pohon je uspořádán do kompaktního tvaru usnadňujícího montáž (obr. 2). Takto kompaktní tvar je vhodný i pro nestandardní montáž na stínící dveře kalibrační laboratoře.

#### Výhody průmyslového pohonu vjezdových bran

- Objednání jedné kompletní hotové sestavy motoru s převodovkou a řídicí jednotkou
- Minimum práce se sestavením a odladěním sestavy
- Motor s převodovkou a řídicí jednotkou zakomponován do kompaktního tvaru

#### Nevýhody průmyslového pohonu vjezdových bran

- Vyšší pořizovací cena za samotný materiál
- Nutnost částečných úprav hotového výrobku pro zástavbové řešení



Obr. 2: Příklad průmyslového pohonu

### 3.3.2. Navržení vlastní sestavy elektromotoru, převodovky a řízení soustavy

Vzhledem k podobnosti druhé a třetí uvažované varianty řešení pohonu stínících dveří budou tyto dvě varianty popisovány v jedné kapitole.

Sestavení vhodné kombinace elektromotoru s převodovkou je již o něco složitější úkol. V dnešní době lze koupit již hotovou sestavu motoru s převodovkou, která bude mít parametry alespoň přibližně stejné, jako jsou parametry požadované. V situaci použití vlastní sestavy elektromotoru by bylo poté zapotřebí vyřešit krytování kvůli bezpečnosti.

Dalším vcelku rozsáhlým úkolem při řešení pohonu stínících dveří vlastní sestavou elektromotoru s převodovkou je řízení této sestavy, resp. vytvoření vlastní řídicí jednotky. Řízení elektromotoru je možné pomocí frekvenčního měniče, elektronického softstartéru nebo kombinací frekvenčního měniče a programovatelného logického automatu (PLC).

#### Výhody řízení frekvenčním měničem

- široké možnosti programování řízení – možnost regulace rychlosti, doby rozběhu a doběhu, případně možnost řízení doběhu a rozběhu optickými bránami
- V některých případech možnost řízení dvou motorů jedním frekvenčním měničem

#### Nevýhody řízení frekvenčním měničem

- Nutnost navržení vhodné kombinace elektromotoru, převodovky a frekvenčního měniče – s tímto oborem nemá zadavatel pro tuto aplikaci příliš mnoho zkušeností

#### Výhody řízení frekvenčním měničem v kombinaci s PLC

- Téměř nekonečné možnosti programování řízení – možnost regulace rychlosti, doby rozběhu a doběhu, možnost řízení doběhu a rozběhu optickými bránami,

nebo koncovými spínači, jednoduché naprogramování děje po stisknutí havarijního tlačítka

- Možnost použití jednoho PLC pro více frekvenčních měničů (pohonných jednotek)
- Jednoduchost modifikace stávajících funkcí soustavy
- Pomocí PLC lze ovládat zároveň i další zařízení v soustavě, například koncové spínače v rámci radiační ochrany

### **Nevýhody řízení frekvenčním měničem v kombinaci s PLC**

- Složitě programování PLC – nutno oslovit externí firmu
- Další náklady spojené s pořízením a vytvořením programu po PLC

### **Výhody řízení pomocí elektronického softstartéru**

- Jednoduché časové řízení rozběhu a doběhu
- Levnější alternativa frekvenčního měniče

### **Nevýhody řízení pomocí elektronického softstartéru**

- Nemožnost regulace rychlosti mezi rozběhem a doběhem
- Nutnost použití dalšího řízení pro zajištění bezpečnosti provozu v případě stisknutí nouzového stop tlačítka

## **3.4. Problematika vedení napájecích a ovládacích kabelů do soustavy**

Pro jednotnost a jednoduchost montáže je vhodné použít stejný systém přívodu elektrické energie jak pro stínící dveře, tak pro sestavu s ozařovací hlavicí. Vzhledem k nestacionárnímu provedení celé sestavy, se stává tato kapitola vcelku zajímavou a rozmanitou částí projektu. Navíc je potřeba brát v úvahu nutnost oddělení silových kabelů od kabelů ovládajících samotnou hlavici.

### 3.4.1. Kabelový vozík na ocelovém laně

Tato varianta má bezesporu řadu výhod i nevýhod. Pro použití v našem případě by bylo nutné, aby vodící ocelové lano procházelo dírou skrz stínění. Tato díra by musela být vzhledem k nepřesnosti kolejí o dost větší, než je průměr vodícího lana. Daný problém je řešitelný s možností výroby zátky, kterou by se díra pro lano dostínila, je to ovšem dost diskutabilní. Bylo by nutné zvolit vhodnou polohu díry vzhledem k toku ionizujícího záření a celkově by toto řešení nebylo příliš vhodné pro budoucí uživatele.



Obr. 3: Varianty kabelových vozíků od firmy Wampfler

#### Výhody

- Nízká cena
- Jednoduchost samotné konstrukce

#### Nevýhody

- Vedení dírou skrz stínící dveře

### 3.4.2. Kabelový buben

Odvíjení a navíjení kabelu na buben je vhodné zejména z hlediska rozměrové náročnosti. Navíjení kabelu na buben je zajištěno pomocí pružiny, pro odvíjení je nutné sílu pružiny překonat dostatečnou tažnou silou. Pro minimalizaci kroucení kabelů při odvíjení a navíjení jsou použité sběrné kroužky – do bubnu je přiveden stacionární kabel a pomocí sběrných kartáčků je přenášen na kabel pevně přidělaný

pouze k bubnu. Tento fakt znemožnil použití pro vedení ovládacích kabelů pro ozařovací hlavici. Pro případ použití řešení s kabelovým bubnem byl uvažován návrh na rozpojitelný přívod ovládacích kabelů k ozařovací hlavici – po dojetí stolice s ozařovací hlavici do určené polohy by byl obsluhou kalibrační laboratoře fyzicky připojen ovládací kabel pomocí jednoho ze systémů elektrických rychlospojek. Tato myšlenka byla v průběhu řešení projektu zamítnuta z důvodu bezpečnosti.



Obr. 4: Kabelový buben v různých provedeních od firmy Wampfler

## Výhody

- Zástavbové možnosti

## Nevýhody

- Nemožnost vedení ovládacích signálů
- Vysoká pořizovací cena

### 3.4.3. Energetický řetěz

Možnost vedení kabelů, ať již silových, tak i ovládacích pomocí energetického řetězu, bylo od počátku považováno za řešení, které přijde v úvahu až jako poslední.

Důvod pro to byl jednoduchý – vedení energetického řetězu pro naše podmínky přichází v úvahu pouze po zemi. S vedením po zemi (dně kanálu) je spojený problém s dostíněním prostoru kolem kolejí. Jako velké plus považuji možnost oddělení silových a ovládacích kabelů v jednom řetězu, což je velmi výhodné hlavně pro sestavu stolu s ozařovací hlavicí.



*Obr. 5: Náhled na možnosti použití energetického řetězu*

## **Výhody**

- Zkušenosti s energetickými řetězy
- Možnost oddělení silových a ovládacích kabelů

## **Nevýhody**

- Problematika dostínění prostoru mezi kolejemi

## 4. Konstrukční návrh

V této části bakalářské práce budou řešeny konstrukční možnosti, jednotlivých dílčích uzlů, vycházející z teoretických poznatků nabitých v rešerši.

### 4.1. Řešení konstrukčních možností rámu vrat

Vzhledem k tlaku zákazníka na co nejnižší cenu celého projektu, předpokládané hmotnosti stínícího materiálu a problematice teplotní roztažnosti kvůli velkému rozdílu teplot na obou stranách stínících dveří byla zvolena konstrukce svařovaná z ocelových hutních polotovarů. Riziko zvýšené nepřesnosti konstrukce bylo vyhodnoceno jako nevýznamné z důvodu dostatečné vůle kolem stínících dveří (v řádu desítky mm).

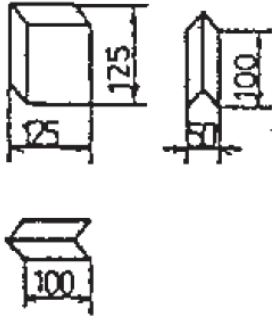
### 4.2. Možnosti stínění ionizujícího záření

Nejvhodnějším materiálem je v tomto případě olovo. Kontrola dostatečnosti stínících konstrukcí pro kalibrační laboratoř byla provedena pomocí kódu MCNP5 (Monte Carlo N-Particle Transport Code System), který je uznávaným mezinárodním standardem v této oblasti [1]. Při výpočtu byl modelován válcový zdroj  $^{60}\text{Co}$  v kolimační hlavě dozimetrického ozařovače se stíněním a 3D rozmístění stínících konstrukcí včetně příslušných materiálů. Pro výpočet byly použity vhodné metody redukce variance. Veškeré rozměry stínících konstrukcí potřebné pro modelování byly odečteny z projektového výkresu pro příslušný objekt. Pro zákazníkem požadovanou aktivitu zdroje byla výpočtářmi vypočtena tloušťka stínění na 50 mm. Při stínění v případech segmentového stínění je důležité, aby bylo stínění konstruováno s překlady (zámky, labyrinty), aby bylo zabráněno přímé dráze paprsku ionizujícího záření.

#### 4.2.1. Provedení konstrukce olověného stínění

Konstrukce olověného stínění je specifická zejména pro vlastnosti olova, hlavně pro vysokou hustotu, potažmo hmotnost. V některých oblastech použití olova jako stínícího materiálu je možné použít stínění z celistvého odlitého kusu olova, to ale není pro stínící dveře možné hlavně z důvodu obtížné manipulace při montáži, ale např. i z důvodu obtížnosti (v rozměrech stínících dveří až nemožné) výroby.

Segmentové stínění je možné dvěma metodami. První variantou jsou olověné pláty, kde je překlad (zámek, labyrint) tvořen kladením jednotlivých vrstev plátů přes sebe. Druhou, elegantnější možností segmentového stínění je použití olověných stínících cihel (obr. 6) vyrobených dle normy ČSN 40 3802 – tato norma je v současnosti zatím bez náhrady neplatná. Olověné cihly jsou vyráběny se specifickými zámkem šípovitého tvaru a tím tvoří samy o sobě dostatečný zámek k zamezení přímé dráhy paprsku ionizujícího záření. Zhodnocení jednotlivých variant segmentového stínění je sepsáno v následujících odstavcích.

č. 2 PSD 50  ČSN 40 3802 obr. 3	Přímá se spodní drážkou		6 kg
---	-------------------------------	---	------

Obr. 6: Olověná stínící cihla dle ČSN 40 3802 - náhled do normy

### Výhody olověných plátů

- Nižší náklady na výrobu
- Výroba přímo na míru

### Nevýhody olověných plátů

- Složitost a s tím spojená vyšší hmotnost nosné konstrukce kvůli překladům jednotlivých vrstev plátů
- Nutnost brát ohled na rozměry, respektive hmotnost jednotlivých plátů, aby byla možná montáž bez použití zdvihacích zařízení (běžně pláty do hmotnosti 30 kg, o tloušťce 10 mm)
- Problematické uchycení plátů na rám z důvodu snahy olova „téct“ a to i za pokojové teploty – nutnost použití velkého množství spojovacího materiálu



## Výhody olověných cihel

- Olověná cihla dle ČSN 40 3802 zabraňuje přímo svým tvarem přímé dráze paprsku ionizujícího záření – tvoří zámek (labyrint)
- Olověné cihly se vyrábějí v tloušťkách 50 a 100 mm
- Jednoduchost usazení olověných cihel do nosného rámu
- Relativně nízká hmotnost jednotlivých cihel – přibližně 6kg na cihlu

## Nevýhody olověných cihel

- Dražší výroba a s ní spojená dražší pořizovací cena
- Nutnost upravit okrajové cihly dle konstrukce

Při prvotních výpočtech tloušťky stínění byla stanovena jeho tloušťka na 200 mm. Po následném posunutí stínících dveří blíže ke zdroji ionizujícího záření byla tloušťka přepočítána na 50 mm. Vzhledem k tomuto faktu byla volba olověných stínících cihel jednoznačně lepší. S ohledem na konstrukční jednoduchost a ulehčení práce při montáži byly zvoleny olověné stínící cihly o tloušťce 50 mm.

## 4.3. Pohon stínících dveří

Pro výběr pohonné jednotky byl za stěžejní vstupní parametr považován předběžný odhad celkové hmotnosti stínících dveří – 3000kg. S ohledem na předchozí zkušenosti zadavatele byla po poradě s vedením vybrána první varianta, a to zařízení bránového pohonu Nice TUB3500. Během telefonické konzultace s jedním z prodejců těchto motorů bylo potvrzeno, že zvolený motor je osazen řídicí jednotkou, programovatelnou v zadavatelem požadovaném rozsahu.

Jedná se o motor z „nejtěžší“ série používaný pro průmyslové brány až do hmotnosti 3500 kg. Sériově vyráběný pohon od Italského výrobce Nice řady TUB3500 je složen z elektromotoru, převodovky a programovatelné řídicí jednotky. Celý pohon je zabudovaný v kovové krabici ve tvaru kvádrů s možností jednoduché zástavby i pro případ nestandardní (horizontální) montáže na stínící dveře kalibrační laboratoře.

Volba této varianty měla ale určitá úskalí a nedostatky, kterým se budu věnovat v kapitole 5.

### 4.3.1. Kontrola pastorku a ozubeného hřebenu

Kontrolní výpočet je proveden dle ČSN 01 4686. Výpočet podle této normy obsahuje kontrolu na ohyb a otláčení. Kontrola je provedena pouze pro pastorek. Ozubený hřeben je považován za spoluzabírající ozubené kolo o nekonečně velkém průměru, je tedy uvažováno několikanásobně mohutnější, resp. pevnější a je rovnou předpokládáno, že je v případě kontrole vyhovujícího pastorku také vyhovující.

#### Vstupní hodnoty:

Pastorek je čelní ozubené kolo s přímými zuby.

$$M_k = 140 \text{ Nm}$$

$$i = 1$$

$$z = 18$$

$$\varepsilon_\alpha = 1$$

$$d = 108 \text{ mm} = 0,108 \text{ m}$$

Materiál 12 051

$$p = 18,8 \text{ mm}$$

$$J_{HV} = 200$$

$$m = 6$$

$$V_{HV} = 637,5$$

$$\alpha = 20^\circ$$

$$\sigma_{Flim} = 390 \text{ MPa}$$

$$\beta = 0^\circ$$

$$\sigma_{Hlim} = 1140 \text{ MPa}$$

$$b = 40 \text{ mm}$$

#### Výpočet rozměrů pastorku:

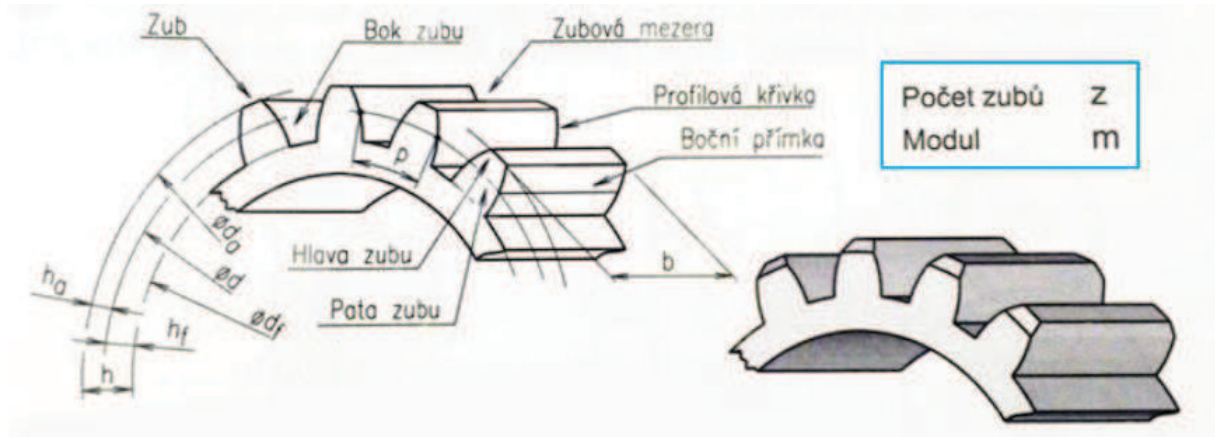
$$h_a = 1 * m = 1 * 6 = 6 \text{ mm}$$

$$h_f = 1,25 * m = 1,25 * 6 = 7,5 \text{ mm}$$

$$h = h_a + h_f = 6 + 7,5 = 13,5 \text{ mm}$$

$$d_a = d + 2 * h_a = 108 + 2 * 6 = 120 \text{ mm}$$

$$d_f = d - 2 * h_f = 108 - 2 * 7,5 = 93 \text{ mm}$$



Obr. 7: Popis ozubeného kola

### Kontrola únavy v dotyku:

$$K_H = K_A * K_{H\beta} * K_{H\alpha} * K_{Hv} = 1,25 * 1,35 * 1,2 = 2,025$$

$$K_A = 1,25$$

$$K_{H\beta} = 1,35$$

$$\psi_{bd} = \frac{b}{d} = \frac{40}{108} = 0,37$$

$$K_{H\alpha} * K_{Hv} = 1,2$$

$$Z_E = 190 \text{ MPa}$$

$$Z_H = 2,5$$

$$Z_\varepsilon = 0,9$$

$$F_O = \frac{M_k}{\frac{d}{2}} = \frac{2 * M_k}{d} = \frac{2 * 140}{0,108} = 2\,592,59 \text{ N}$$

$$F_z = \sqrt{F_O^2 + F_t^2} = \sqrt{2592,59^2 + 943,63^2} = 2\,758,98 \text{ N}$$

$$F_t = F_O * \sin\alpha = F_O * \sin(20^\circ) = 943,63 \text{ N}$$

$$\sigma_{Ho} = Z_E * Z_H * Z_\varepsilon * \sqrt{\frac{F_z}{b * d} * \frac{i + 1}{i}} = 190 * 2,5 * 0,9 * \sqrt{\frac{2758,98}{40 * 108} * \frac{1 + 1}{1}} = 483,15 \text{ MPa}$$



$$S_H = \frac{\sigma_{Hlim}}{\sigma_{H0} * \sqrt{K_H}} = \frac{1140}{483,15 * \sqrt{2,025}} = 1,66 \rightarrow \text{Vyhovuje}$$

### Kontrola statické únosnosti v dotyku:

$$F_{zmax} = K_A * F_Z = 1,25 * 2758,98 = 3\,448,73 \text{ N}$$

$$\sigma_{HPmax} = 4 * V_{HV} = 4 * 637,5 = 2\,550 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Hmax} = \sigma_{H0} * \sqrt{\frac{F_{zmax}}{F_Z} * K_H} = 483,15 * \sqrt{\frac{3448,73}{2758,98} * 2,025} = 768,68 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Hmax} \leq \sigma_{HPmax} \rightarrow 768,68 \text{ MPa} \leq 2\,550 \text{ MPa} \rightarrow \text{Vyhovuje}$$

### Kontrola únavy v dotyku:

$$K_{F\beta} = K_{H\beta} = 1,45$$

$$K_{F\alpha} * K_{Fv} = 1,2$$

$$Y_{FS} = 3,85$$

$$Y_{\beta} = 1 \rightarrow \text{přímé zuby}$$

$$Y_{\epsilon} = \frac{1}{\epsilon_a} = \frac{1}{1} = 1$$

$$\sigma_F = \frac{F_Z}{b * m} * K_A * K_{F\beta} * 1,2 * Y_{FS} * Y_{\beta} * Y_{\epsilon} = \frac{2758,98}{40 * 6} * 1,25 * 1,45 * 1,2 * 3,85 * 1 * 1$$

$$\sigma_F = 96,26 \text{ MPa}$$

$$S_F = \frac{\sigma_{Flim}}{\sigma_F} = \frac{390}{96,26} = 4,05 \rightarrow \text{vyhovuje}$$

### Kontrola statické únosnosti v ohybu:

$$\sigma_{Fmax} = \sigma_F * \frac{F_{zmax}}{F_Z} = 96,26 * \frac{3448,73}{2758,98} = 120,33 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{FPmax} = 0,8 * 2,5 * \sigma_{Flim} = 0,8 * 2,5 * 390 = 780 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Fmax} \leq \sigma_{FPmax} \rightarrow 120,33 \text{ MPa} \leq 780 \text{ MPa} \rightarrow \text{Vyhovuje}$$

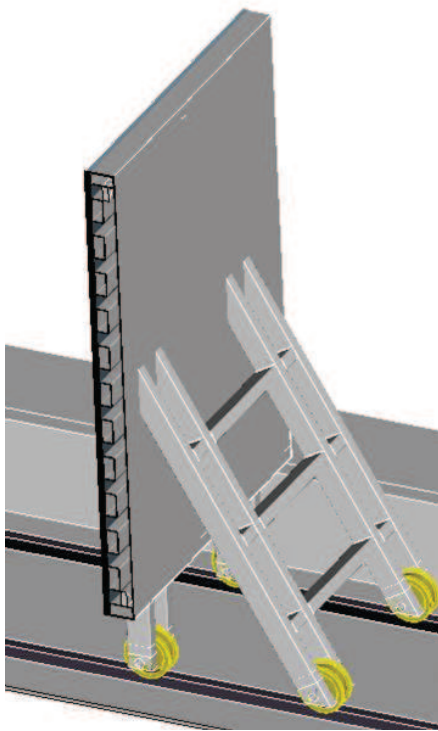
Uvedený převod, pastorek/hřeben je dostatečně dimenzovaný na statickou únosnost v dotyku i ohybu a vyhovuje tedy ve všech aspektech normě ČSN 01 4686 pojednávající o pevnostním dimenzování kol ozubených převodů. Potřebné součinitele byly určeny z příslušných diagramů (Příloha 2).

#### **4.4. Problematika vedení napájecích a ovládacích kabelů do soustavy**

Po pečlivém promyšlení všech variant přívodu elektrických kabelů uvedených v rešerši bylo rozhodnuto o použití energetického řetězu. Problém s dostíněním prostoru mezi kolejemi byl vyřešen vhodnou polohou uchycení energetických řetězů tak, že při zavřených stínících dveřích nedosahuje energetický řetěz ozařovací hlavice polohy stínění kanálu.

#### **4.5. Konstrukční varianty**

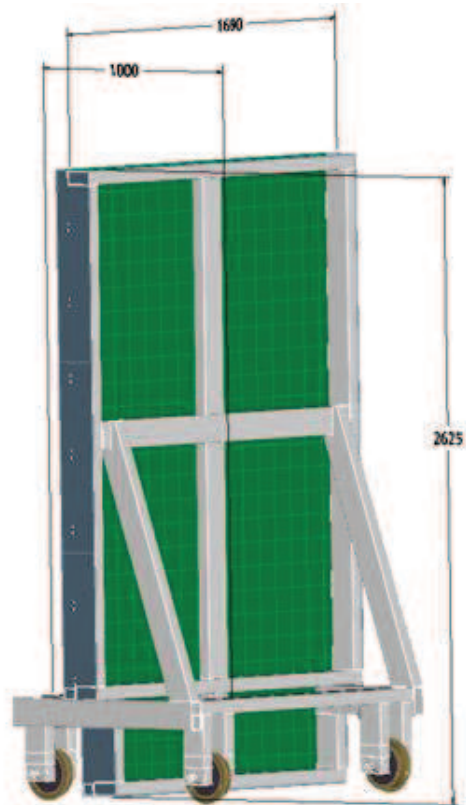
Při prvotním zadání bylo uvažováno krytování ozařovací hlavice, které značně zmenšovalo vnitřní prostor v horké komoře. Díky tomuto faktu nebyl dostatek místa pro umístění koleček před hmotu stínícího materiálu a celá konstrukce musela být vyvážena dodatečným závažím k zajištění bezpečného provozu. V této fázi vývoje byly představeny dvě konstrukční varianty (obr. 8 a obr. 9). Následně bylo od krytování hlavice upuštěno a bylo tedy možné předsunout kolečka před hmotu stínícího materiálu. Tím bylo možné konstrukci značně odlehčit odstraněním přídavného protizávaží, ale také zlevnit. V této fázi byla představena třetí konstrukční varianta (obr. 10), u této varianty je již vyřešeno stínění kanálu. Ve čtvrtém konstrukčním návrhu (obr. 11) již bylo dořešeno i zakomponování pomocného rámu pro pohonnou jednotku. To vedlo k prodloužení celkové délky stínících dveří na 1350mm.



Obr. 8: První konstrukční návrh



Obr. 9: Druhý konstrukční návrh



Obr. 10: Třetí konstrukční návrh



Obr. 11: Čtvrtý (finální) konstrukční návrh bez krytování

V následujících několika podkapitolách bude popisován pouze 4. (finální) konstrukční návrh.

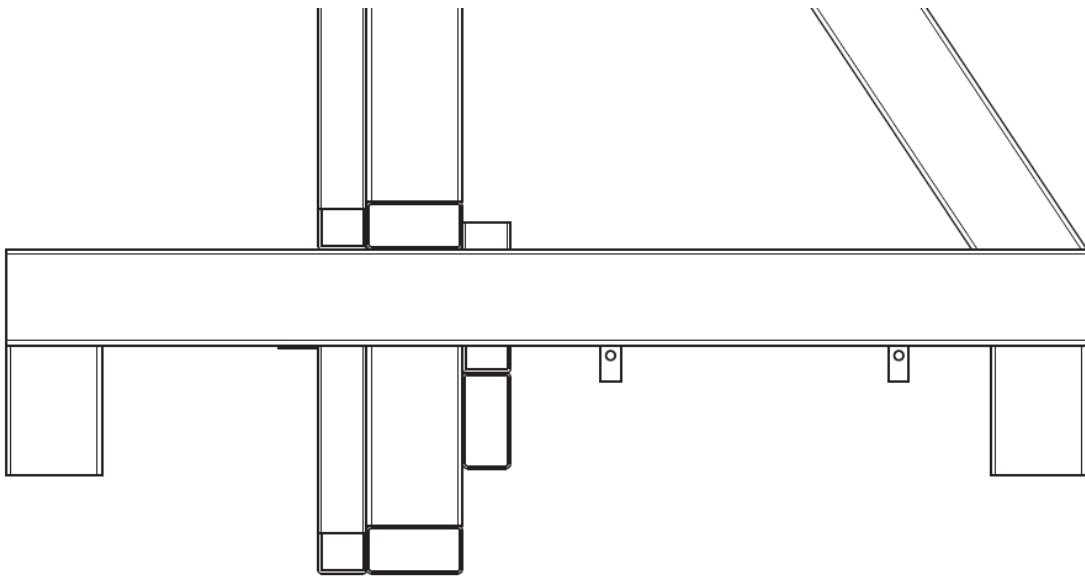
## 4.6. Nosný rám

Nosný rám – základní stavební kámen celých stínících dveří byl navržen v podobě svařence z uzavřených hutních polotovarů. Konkrétně z uzavřených ocelových profilů obdélníkového průřezu. Výběr této konstrukční varianty byl zdůvodněn v kapitole 4.1.

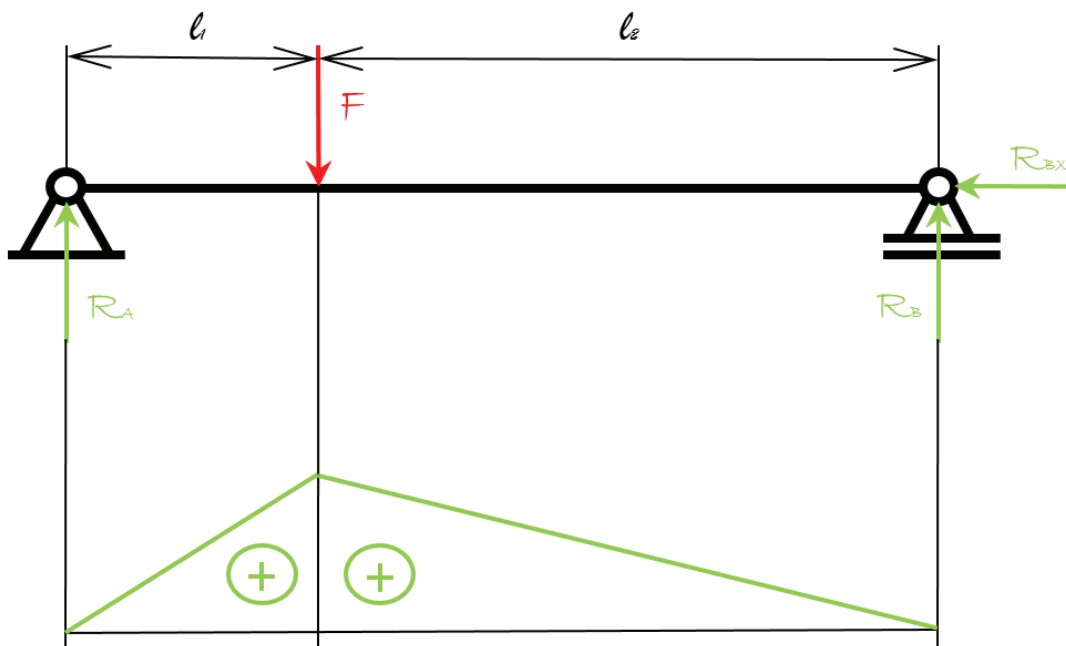
### 4.6.1. Volba základních polotovarů

Rám byl po diskuzi se zadavatelem kvůli zjednodušení zajištění polotovarů navržen z jednoho rozměru uzavřených ocelových profilů. Předběžně byl navržen ocelový uzavřený profil dle ČSN EN 10 219-2 o rozměru 120 x 60 x 3 mm (B x H x T). Návrh tohoto rozměru byl následně zkontrolován výpočtem na ohyb podélného nosného profilu, který je nejvíce namáhanou částí celého svařence nosného rámu.

## Výpočet podélného nosného profilu na ohyb



Obr. 13: Reálný model pro výpočet nosného profilu



Obr. 12: Výpočtový model podélného nosníku

### Vstupní hodnoty:

$$m = 3100 \text{ kg}$$

$$\sigma_{D0} = 165 \text{ MPa}$$

$$l_1 = 360 \text{ mm}$$

$$g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$l_2 = 870 \text{ mm}$$

$$F = m * g = 3100 * 9,81 = 30\,411 \text{ N}$$



Celkové zatížení silou  $F$  se rozloží na dva nosné profily, proto bude dále počítáno s poloviční hodnotou označenou  $F_n$ .

$$F_n = \frac{F}{2} = \frac{30\,411}{2} = 15\,205,5 \text{ N}$$

### Výpočet reakčních sil:

$$R_{Bx} = 0$$

$$R_A + R_B - F = 0$$

$$R_A = F_n * \frac{l - l_1}{l} = 15\,205,5 * \frac{1230 - 360}{1230} = 10\,755,11 \text{ N}$$

$$R_B = F_n * \frac{l - l_2}{l} = 15\,205,5 * \frac{1230 - 870}{1230} = 4\,450,39 \text{ N}$$

$$l = l_1 + l_2 = 360 + 870 = 1230 \text{ mm}$$

### Výpočet napětí v ohybu:

$$\sigma_o = \frac{M_o}{W_o} = \frac{3\,871\,839,6}{27\,036} = 143 \text{ MPa}$$

$$M_o = R_A * l_1 = 10\,755,11 * 360 = 3\,871\,839,6 \text{ Nmm}$$

$$W_o = \frac{B * h^2}{6} - \frac{(B - 2 * T) * (H - 2 * T)^2}{6} = \frac{60 * 120^2}{6} - \frac{(60 - 6) * (120 - 6)^2}{6}$$

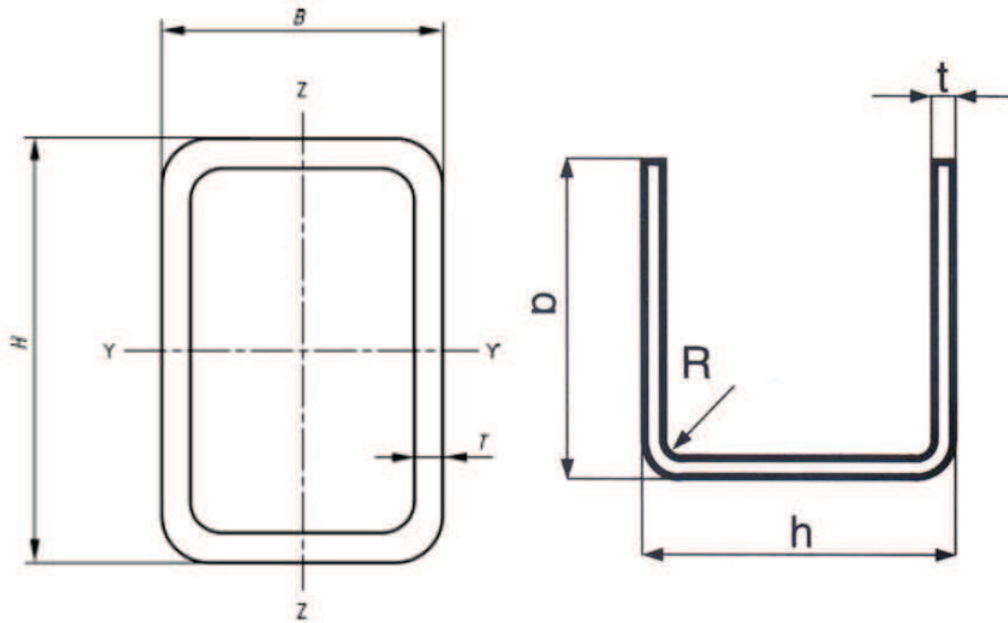
$$W_o = 27\,036 \text{ mm}^2$$

### Pevnostní podmínka:

$$\sigma_o \leq \sigma_{Do} \rightarrow 143 \text{ MPa} \leq 165 \text{ MPa} \rightarrow \text{Vyhovuje}$$

Výpočtem bylo ověřeno, že je možné použít jako jednotný polotovár uzavřený ocelový profil obdélníkového průřezu o rozměrech 120 x 60 x 3 mm (B x H x T) dle ČSN EN 10 219-2 (obr. 14).

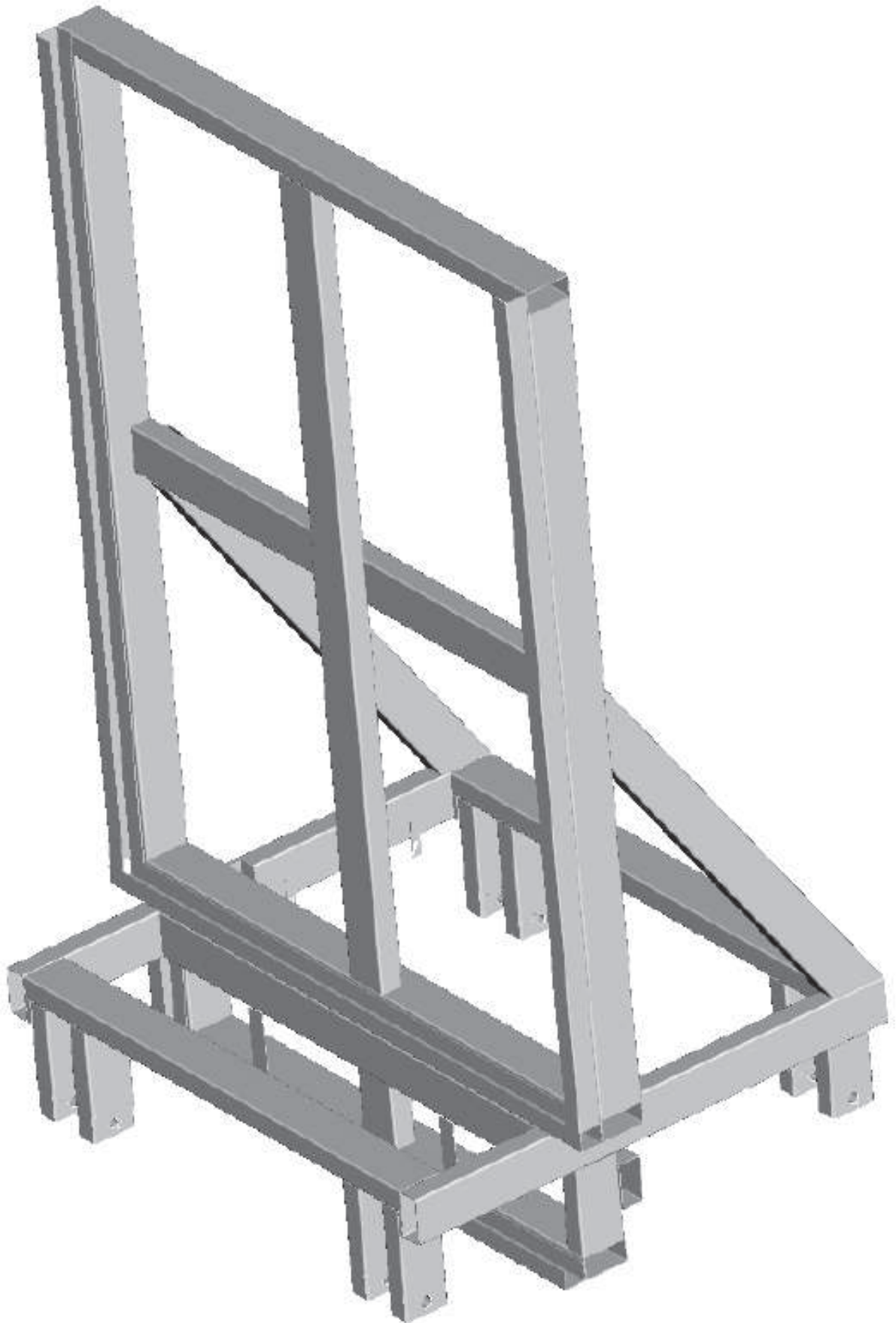
Další polotovarem byl zvolen otevřený ocelový profil průřezu U o rozměrech 50 x 60 x 4 (a x h x t) dle ČSN EN 10 162. Tento U profil bude sloužit jako nosný pro ustavení stínících olověných cihel (obr. 14).



Obr. 14.: Obecné rozměry polotovarů ČSN EN 10 219-2 A ČSN EN 10 162

#### 4.6.2. Svařenec nosného rámu

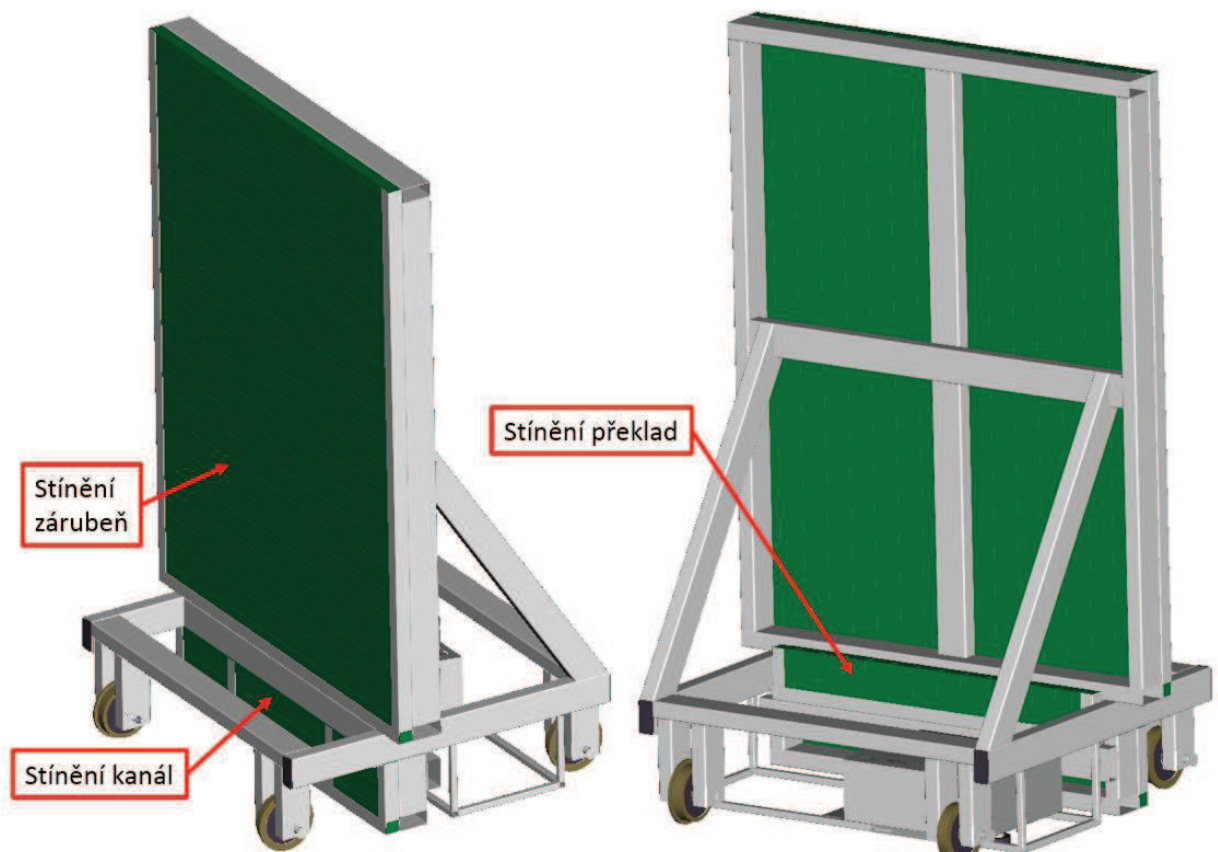
Nosný rám (obr. 15) byl navrhován s ohledem na jednoduchost výroby, resp. její nízkou časovou náročnost, dostatečnou únosnost, funkčnost a proporcionalitu. Z těchto důvodů byl použit polotovar o jednotném rozměru a byl brán ohled na co nejmenší počet úhlových zakončení jednotlivých délek polotovarů.



*Obr. 15: Celkový pohled na svařenec nosného rámu*

### 4.6.3. Stínění

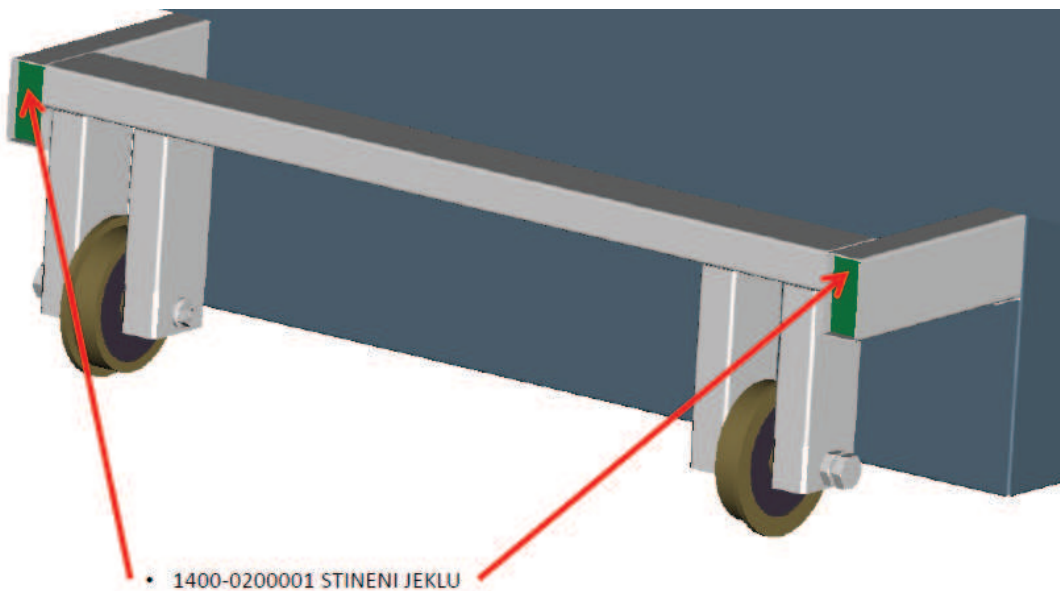
V předchozích kapitolách bylo rozhodnuto o použití stínícího materiálu, olova, v polotovarech v podobě olověných stínících cihel o tloušťce 50 mm. Celá stíněná plocha byla rozdělena do tří segmentů – stínění zárubeň, stínění překlad a stínění kanál (obr. 16). Toto názvosloví bylo zaneseno do výrobní výkresové dokumentace a je oficiálně používáno. Obvodové olověné cihly jednotlivých segmentů byly dále rozměrově upraveny dle výkresové dokumentace a ustaveny do obvodových otevřených ocelových profilů průřezu U, které jsou pevnou součástí nosného rámu.



Obr. 16: Názvosloví stínících segmentů

Stínění zárubeň je největší ze segmentů. Jedná se o hlavní stínící plochu. Celková hmotnost segmentu Stínění zárubeň je 2100 kg. Stínění kanál je segment stínící prostor pod úrovní podlahy o celkové hmotnosti 230 kg. Stínění překlad je segment o celkové hmotnosti přibližně 140 kg, který slouží k dostínění výztuhy nosného rámu. Posledním místem, které je nutné dostínit je podélný horizontální ocelový uzavřený profil obdélníkového průřezu. Toto dostínění je realizováno

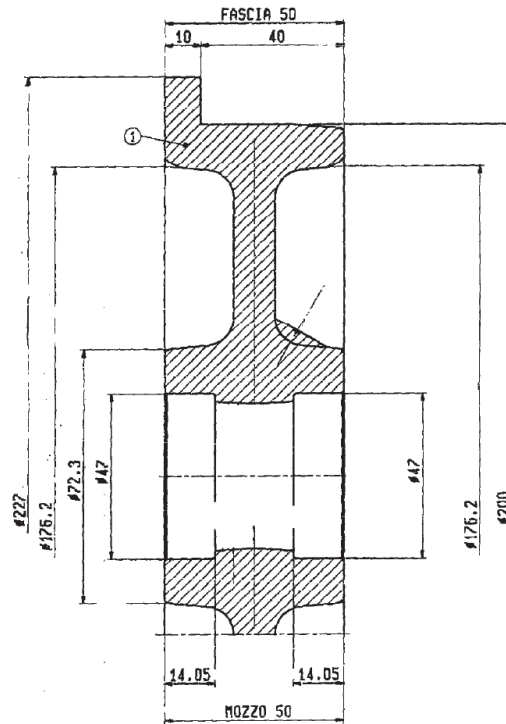
vyfrézovaným olověným blokem (obr. 17). Tloušťka olověného bloku je 50 mm, stejně jako u olověných cihel a jeho rozměry jsou totožné s vnitřními rozměry uzavřeného ocelového profilu obdélníkového průřezu 120x60x3 dle ČSN EN 10 219-2 (obr. 14). Takto vyfrézovaný olověný blok je vsazen na kraj uzavřeného ocelového profilu obdélníkového průřezu a zakryt plastovou záslepkou příslušných rozměrů.



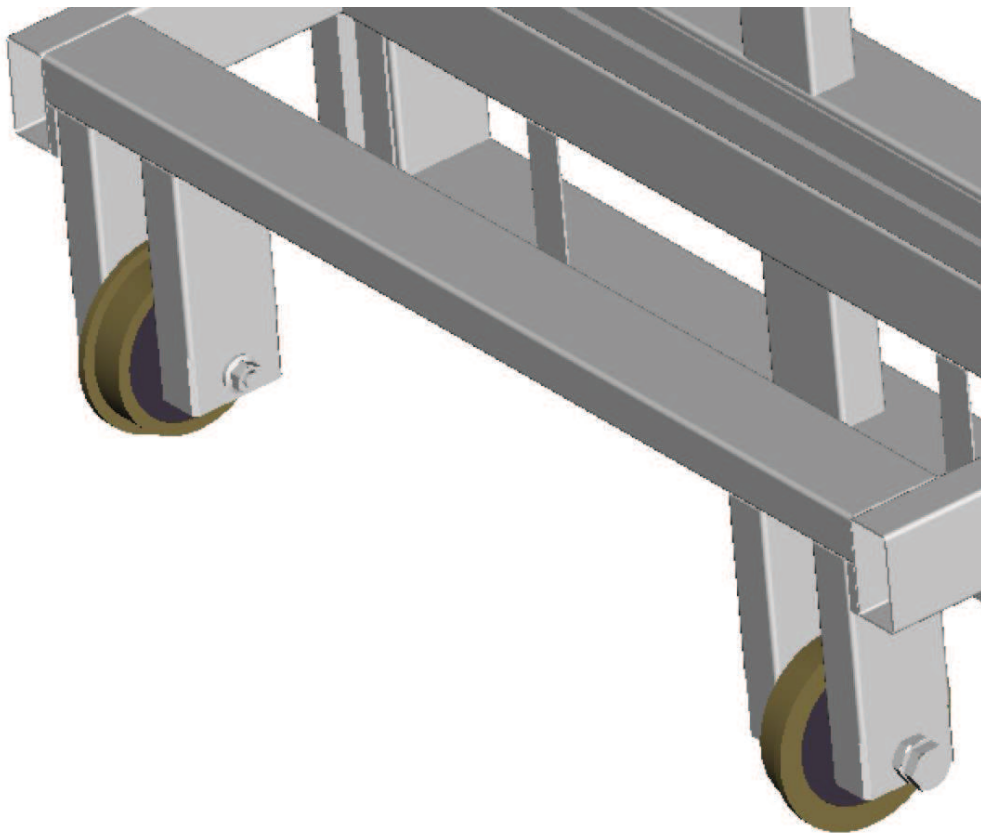
Obr. 17: Dostínění uzavřených ocelových profilů

## 4.7. Kolečka

Ze známé hmotnosti celé sestavy byly pro pojezd na kolejích vybrány velkosériově vyráběná kolečka výrobce LAG typu 1105 (obr. 19). Jedná se o litinová kolečka od výrobce již osazená dvojicí kuličkových ložisek s typizovanou nosností 1200 kg. Při celkové hmotnosti stínících dveří cca 3100 kg jsou tyto kolečka vyhovující s relativně velkou bezpečností. Při výběru koleček nebyl brán v úvahu pouze parametr hmotnosti, ale také rozměry samotného kolečka. Z rozměrů bylo přihlíženo hlavně na průměr čepu kolečka a to z důvodu výroby speciálních čepů pro možnost axiálního seřízení kolečka do optimální polohy při montáži podle rozchodu kolejí ve stávající zástavbě (viz. kapitola 4.8).



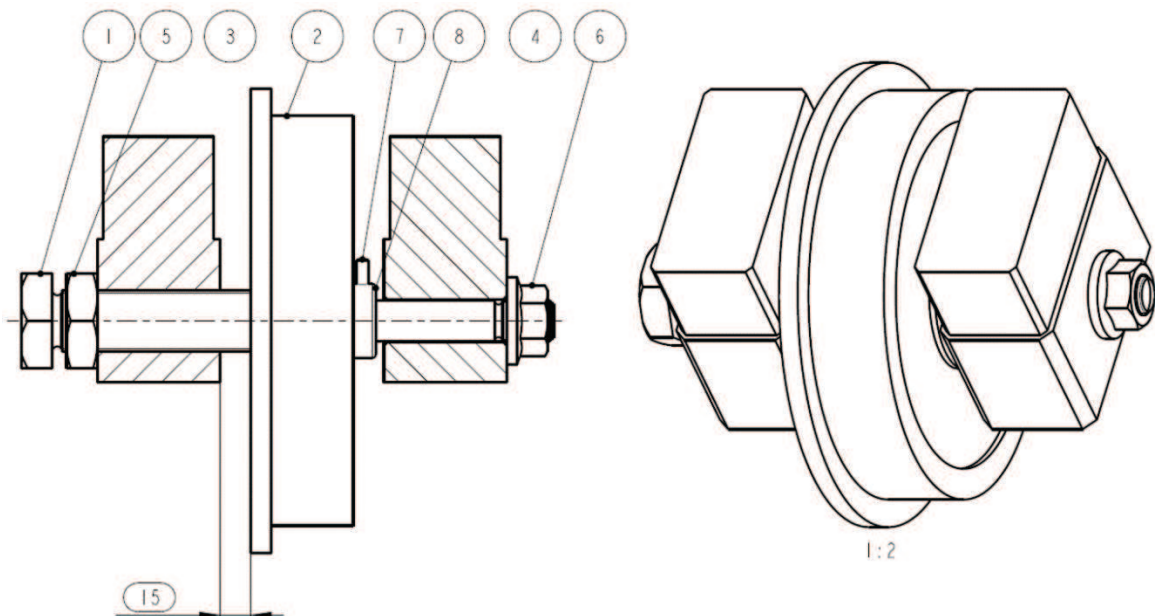
Obr. 19: Detail kolečka typu 1105 výrobce LAG v řezu



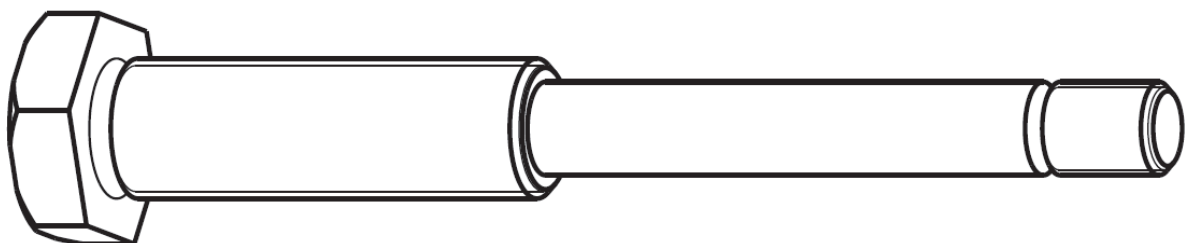
Obr. 18: Detail přední části nosného rámu osazeného kolečky LAG 1105

## 4.8. Čep kolečka

Čep kolečka byl navrhován s ohledem na možnost axiálního seřízení kolečka. Axiální seřízení kolečka (obr. 20, celý výkres viz. příloha 1) je zajištěno tak, že kolečko (obr. 20 poz.2) je na vnější straně opřené o osazení na čepu (obr. 21) a zajištěné pomocí stavěcího kroužku (obr. 20 poz.8) s červíkem (obr. 20 poz.7) proti axiálnímu pohybu. Postupné zašroubování čepu (obr. 20 poz.1) do patek (obr. 20 poz.3 a 4), přivařených na svařenec po jeho vyrovnaní, umožňuje axiální seřízení rozvoru koleček podle nerovností kolejí ve stávající zástavbě. Zajištění požadované polohy kolečka je pojištěno z vnější strany maticí M30 DIN 439 (obr. 20 poz.5) a z vnitřní strany maticí M20 DIN 6923 (obr. 20 poz.6).



Obr. 20: Detail možnosti axiálního seřízení kolečka

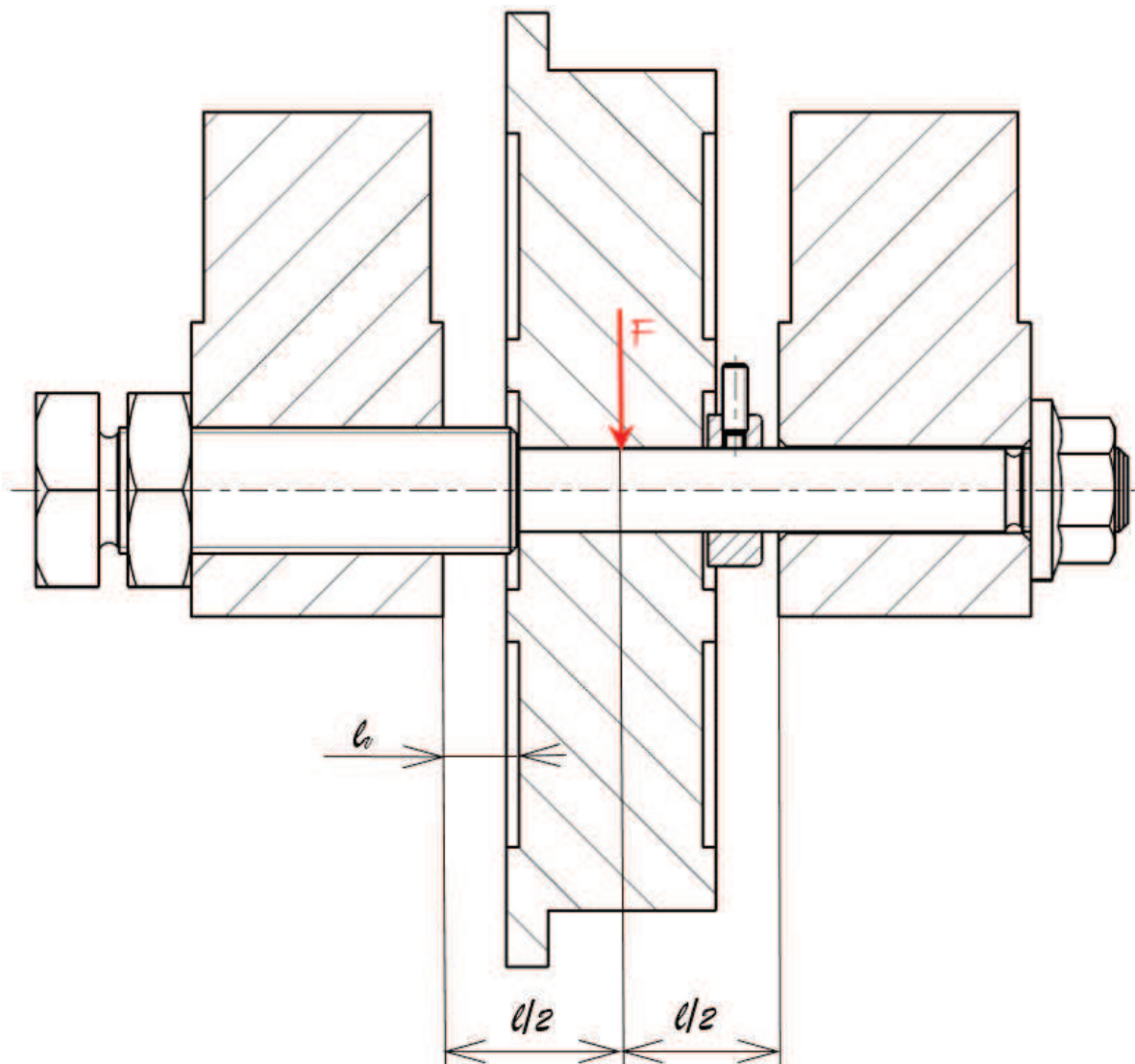


Obr. 21: Výkresový ISO pohled na čep kolečka

### 4.8.1. Pevnostní výpočet čepu kolečka

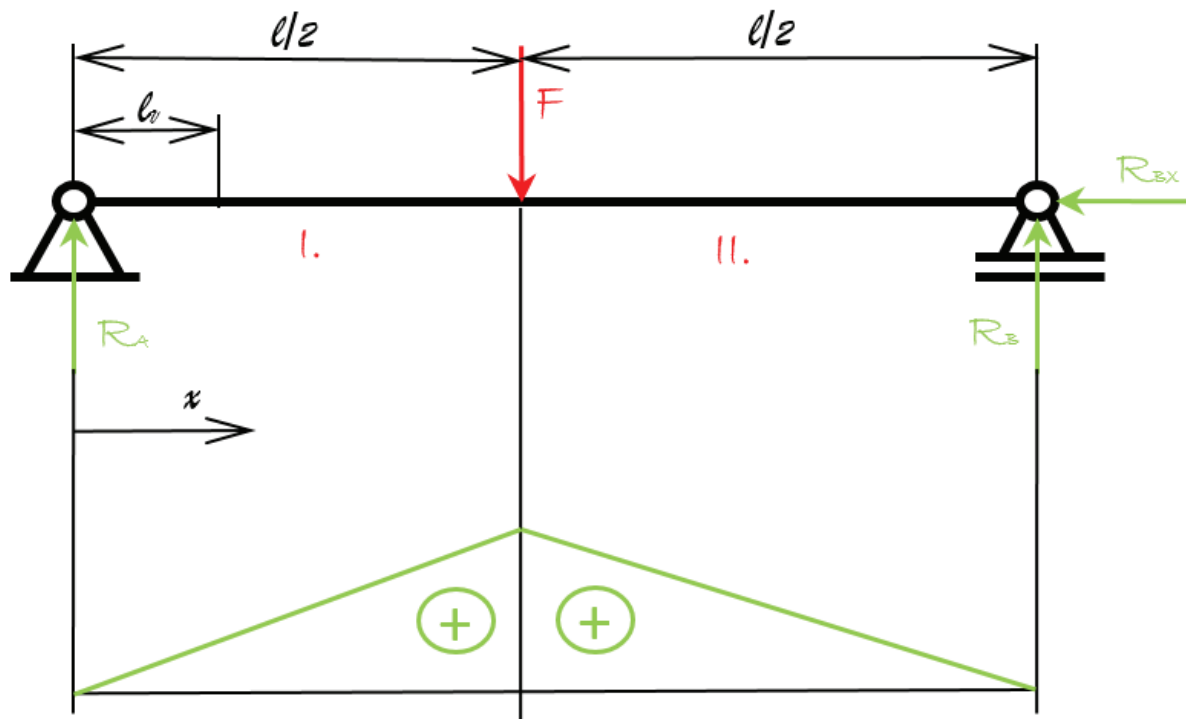
Vzhledem k faktu, že čep kolečka nebyl nakupován jako průmyslově vyráběný díl, ale byl vyroben podle výkresů zadavatele, bylo pro návrh materiálu vycházeno z faktu, že kolečko má vnitřní díru pro čep 20 mm. Pro čep o tomto průměru bylo vypočteno ohybové napětí. Podle vypočteného napětí v ohybu pro zjednodušený čep byl vybrán vyhovující materiál pro výrobu skutečné podoby čepu (materiál s dostatečnou hodnotou dovoleného ohybového napětí  $\sigma_{D0}$ ). Zatěžující síla je uvažována uprostřed mezi podporami.

#### Analytický výpočet



Obr. 22: Schematický model pro výpočet čepu kolečka





Obr. 23: Výpočtový model čepu kolečka

### Vstupní hodnoty:

$$F = 10\,755,11 \text{ N}$$

$$d_1 = 20 \text{ mm}$$

$$l = 80 \text{ mm}$$

$$d_2 = 30 \text{ mm}$$

$$l_v = 15 \text{ mm}$$

### Výpočet reakčních sil:

$$R_{Bx} = 0$$

$$R_A = R_B = \frac{F}{2} = \frac{10\,755,11}{2} = 5\,377,56 \text{ N}$$

### Průběh ohybového momentu:

$$x \in \left\langle 0; \frac{l}{2} \right\rangle$$

$$x \in \left\langle \frac{l}{2}; l \right\rangle$$

$$M_{O_1(x)} = R_a * x$$

$$M_{O_2(x)} = R_a * x - F * \left(x - \frac{l}{2}\right)$$

## Výpočet ohybového napětí v místech s předpokladem největšího napětí:

Výpočet napětí byl proveden ve dvou polohách,  $x = l_v$ , kde je skoková změna průměru a v  $x = l/2$ , kde je čep zatížen silou, potažmo částí hmoty stínících dveří. V těchto místech byla předpokládána největší koncentrace napětí od ohybového namáhání.

$$x = \frac{l}{2}$$

$$M_{o_{l/2}} = R_a * \frac{l}{2} = \frac{F}{2} * \frac{l}{2} = \frac{10755,11}{2} * \frac{80}{2} = 215\,102,2 \text{ Nmm}$$

$$W_{o1} = \frac{\pi * d_1^3}{32} = \frac{\pi * 20^3}{32} = 785,4 \text{ mm}^3$$

$$\sigma_{o1} = \frac{M_{o_{l/2}}}{W_{o1}} = \frac{215102,2}{785,4} = 273 \text{ MPa}$$

$$x = l_v$$

$$M_{o_{l_v}} = R_a * l_v = \frac{F}{2} * l_v = \frac{10755,11}{2} * 15 = 80\,663,33 \text{ Nmm}$$

$$W_{o2} = \frac{\pi * d_2^3}{32} = \frac{\pi * 30^3}{32} = 2\,650,72 \text{ mm}^3$$

$$\sigma_{o2} = \frac{M_{o_{l_v}}}{W_{o2}} = \frac{80663,33}{2650,72} = 30,43 \text{ MPa}$$

$$\frac{\rho}{D-d} = \frac{0,2}{30-20} = 0,02; \frac{\rho}{d} = \frac{0,2}{20} = 0,01 \rightarrow \alpha_o = 4,2$$

$$\sigma_{o2tvar} = \sigma_o * \alpha_o = 127,81 \text{ MPa}$$

Z vypočtených hodnot ohybového napětí v daných polohách bude dále v pevnostní podmínce uvažována pouze vyšší hodnota, tedy 273 MPa. Potřebný součinitel tvaru byl určen z diagramu (Příloha 3).

## Pevnostní podmínka:

$$\sigma_o \leq \sigma_{Do}$$

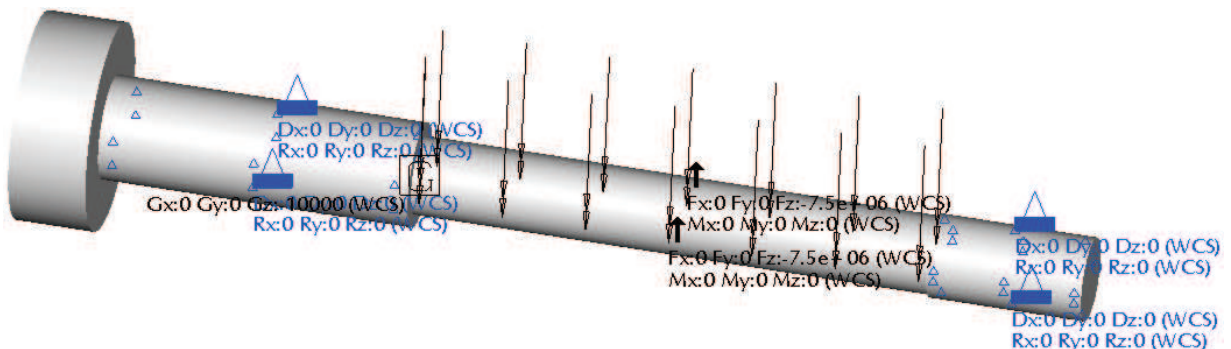
Materiál 11 700 -  $\sigma_{Do} = 230 - 345 \text{ MPa}$

$273 \text{ MPa} \leq 345 \text{ MPa} \rightarrow \text{Vyhovuje}$

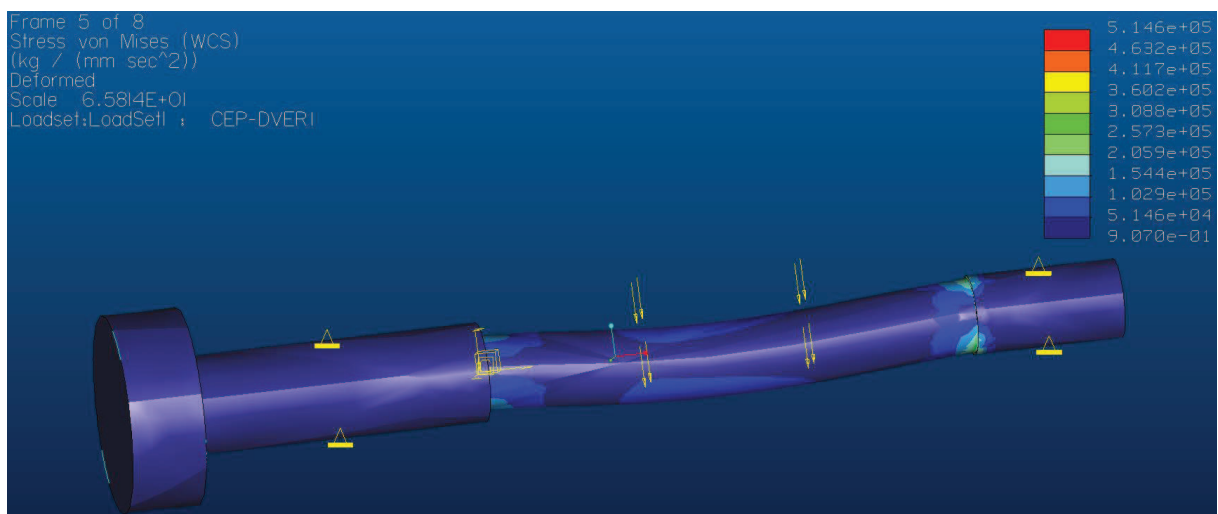
Hodnota ohybového napětí je 273 MPa. Pro výrobu čepu byl zvolen materiál 11 700 s dovoleným napětím v ohybu až 345 MPa. Při dodání materiálu bude požadována garantovaná hodnota dovoleného ohybového napětí 300 MPa.

## MKP výpočet pomocí programu proEngineer

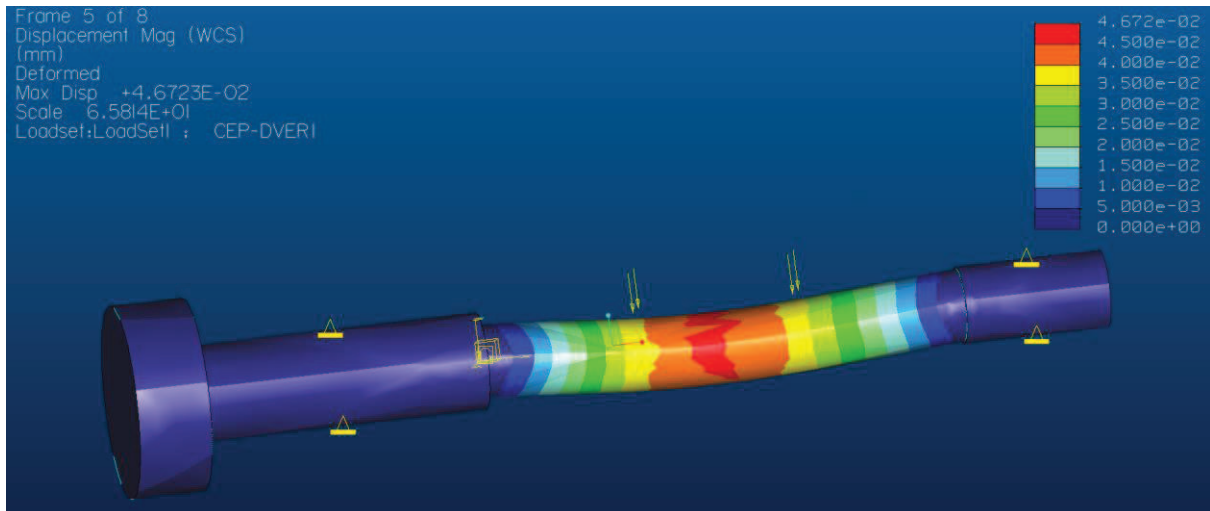
Pro MKP výpočet byl vytvořen zjednodušený model čepu kolečka (obr. 25), odpovídající svými rozměry reálnému tvaru. Pro výpočet byly použity parametry materiálu vycházející z analytického výpočtu. Při výpočtu bylo uvažováno vetknutí na obou stranách a spojitě zatížení o velikosti 750kg, potažmo 7364.4N.



Obr. 25: Vetknutí a spojitě zatížení MKP modelu čepu kolečka



Obr. 24: Výsledek MKP výpočtu napětí

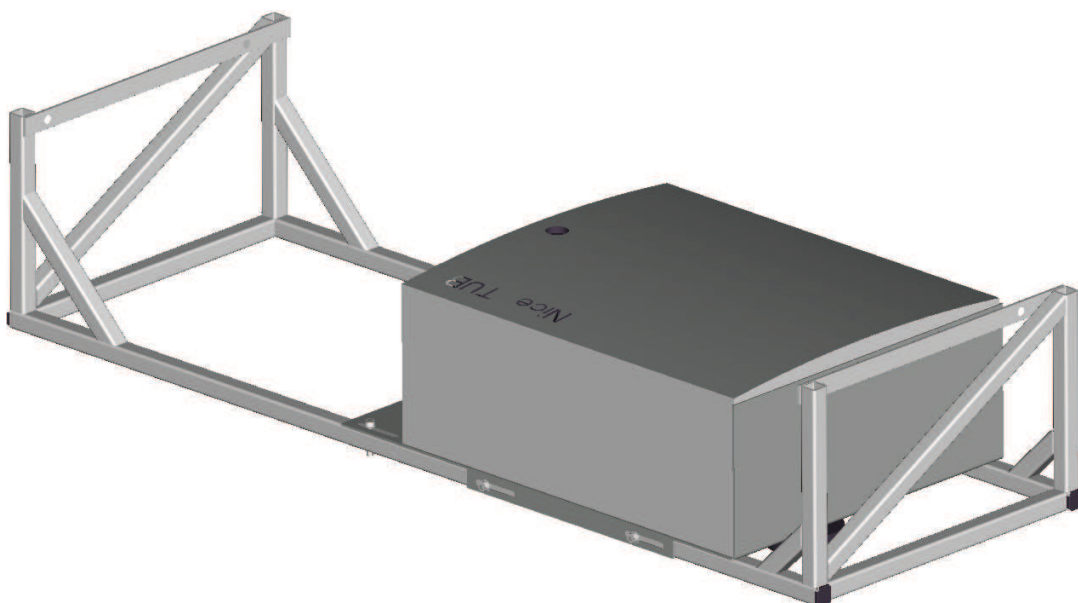


Obr. 26: Výsledek MKP výpočtu průhybu

## 4.9. Uchycení pohonné jednotky

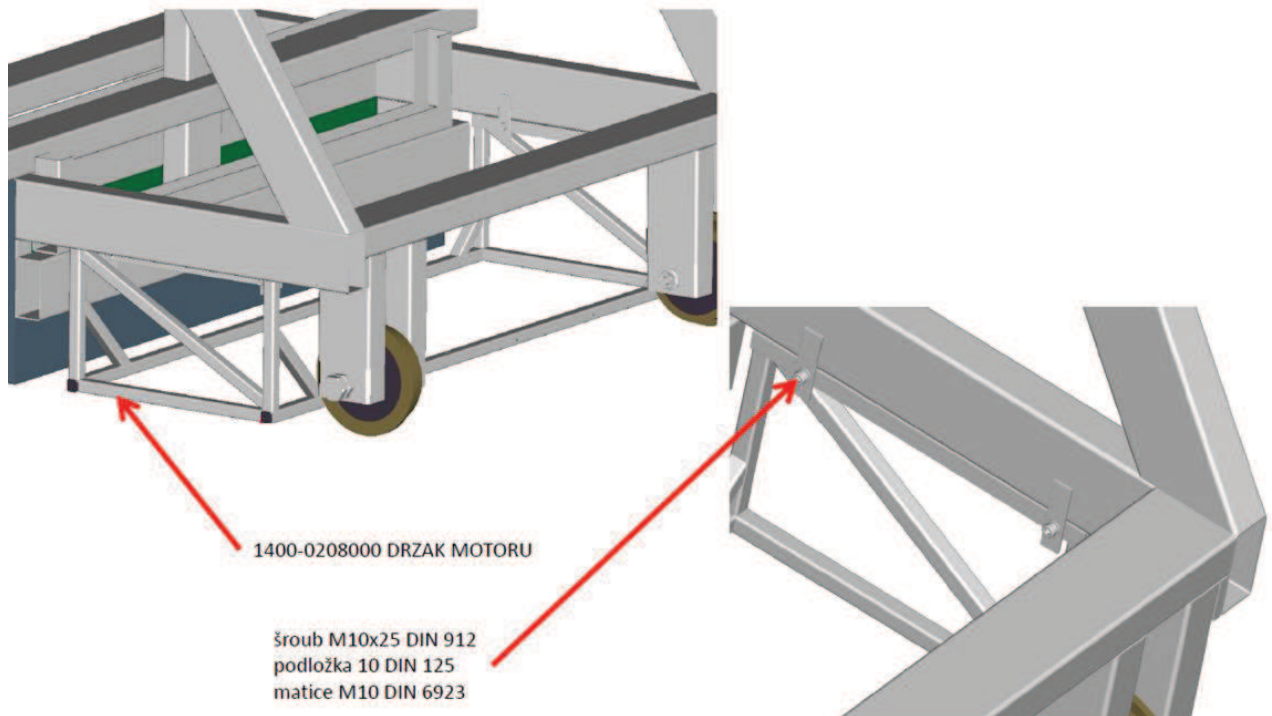
Uchycení pohonné jednotky bylo rozděleno na sestavu o třech dílech – pohonná jednotka, plech motoru a držák motoru (obr. 27).

Pohonná jednotka je přišroubována pomocí šroubů k plechu motoru a tato podsestava je přišroubována k držáku motoru. Plech motoru byl konstruován s ohledem na možnost seřízení záběru a vyřazení pohonné jednotky ze záběru. Tato možnost je realizována drážkami místo děr pro uchycení plechu motoru na držák motoru.



Obr. 27: Uchycení pohonné jednotky

Vyřazení pohonné jednotky ze záběru je také možné po odkrytí víka pohonné jednotky, pomocí speciálního přípravku, ale z důvodu bezpečnosti byla uvažována i možnost vyřazení pohonné jednotky ze záběru i pomocí povolení šroubů plechu motoru a jeho následné odsunutí.



Obr. 28: Detail montáže držáku motoru

Celá tato sestava je přimontována na nosný rám pomocí čtyř šroubů M10x25 DIN912 k předem přivařeným nosným dílcům (obr. 28). Při prvním zkušebním provozu se zdálo být toto řešení nedostatečně tuhé a celá podsestava pohonné jednotky s držákem se měla tendenci značně kroutit. Dořešení této problematiky bude vyjasněno v následujících odstavcích v kapitole 5.

## 4.10. Krytování konstrukce

Hlavním důvodem krytování konstrukce je zakrytí olověných stínících segmentů, aby bylo zabráněno přímému kontaktu olova s člověkem. Vedlejším efektem krytování je rozhodně estetické hledisko a vytvoření uceleného designu. Krytování konstrukce bylo navrženo s rozdělením na osm samostatných dílců s ohledem na přípustnou manipulační náročnost při budoucí montáži. Krytování stínění zárubně je složeno ze čtyř dílců, stínění překlady z jednoho dílce a stínění kanálu ze tří dílců.

## 5. Realizace a montáž

Vzhledem k prototypovému zaměření celého projektu, bylo počítáno s úpravami, opravami a změnami na základě praktických poznatků ze samotné montáže. CAD model se také na základě úprav během montáže v drobných detailech liší od reálného výrobku. Úpravám, změnám a doladění celé soustavy budou věnovány následující odstavce.

Objednané olověné cihly nebyly vyrobeny s dostatečnou přesností, což vedlo k nutnosti zkušební montáže stínění (obr. 29). Na základě poznatků ze zkušební montáže a měření olověných stínících cihel byla upravena výrobní dokumentace pro okrajové bloky.



*Obr. 29: První zkušební montáž olověných stínících cihel*

Po dodání pohonné jednotky dodavatelem (obr. 30) byl proveden zkušební provoz samotného pohonu s cílem seznámení se s řízením. Během této zkoušky bylo zjištěno, že řídicí jednotka dodaná společně s pohonnou jednotkou bude

s největší pravděpodobností pro požadavky zadavatele nedostačující. Rychlost na výstupní hřídeli bez zatížení byla příliš vysoká a programovat bylo možné pouze dobu běhu motoru. Přesto bylo rozhodnuto o dořešení této problematiky na místě montáže po zkušebním provozu celé sestavy.

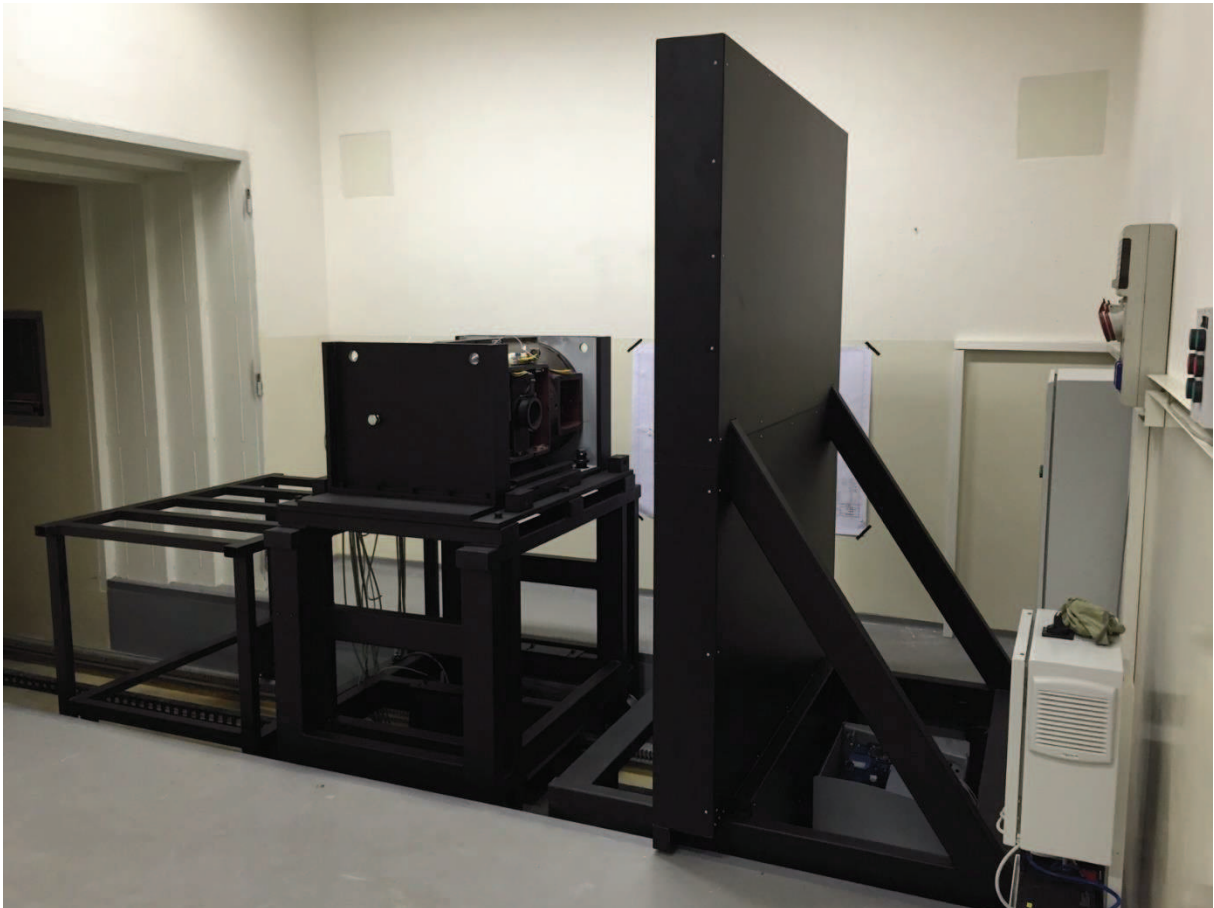


Obr. 30: Pohonná jednotka NICE TUB3500 s integrovanou řídicí jednotkou

Zkušební provoz celé sestavy potvrdil předchozí obavy z nedostatečné možnosti regulace a programování. Držák motoru se značně kroutil, což bylo způsobeno tím, že motor neměl žádnou rozběhovou rampu a rychlost pohybu byla příliš vysoká i v zatíženém stavu. Tato problematika byla vyřešena nahrazením stávající řídicí jednotky pohonu frekvenčním měničem v kombinaci s PLC a koncovými spínači. Pomocí tohoto typu řízení byly vyřešeny všechny drobné nedostatky – rozběhové a doběhové rampy, rychlost hlavního pohybu a snaha kroucení se zpočátku zdánlivě poddimenzované podsestavy uchycení pohonné jednotky. Celý cyklus otevření a zavření kalibrační laboratoře je umožněn jak pomocí dotykového panelu, tak manuálně pomocí tlačítkových vypínačů. Videonahrávka celého cyklu otevření a zavření dveří bude obsažena na příloženém DVD. Popis logického řízení celé sestavy je obsažen v příloze 4.



Obr. 31: Ovládací panel otevření/uzavření kalibrační laboratoře



Obr. 32: Celkový pohled na sestavu vybavení kalibrační laboratoře

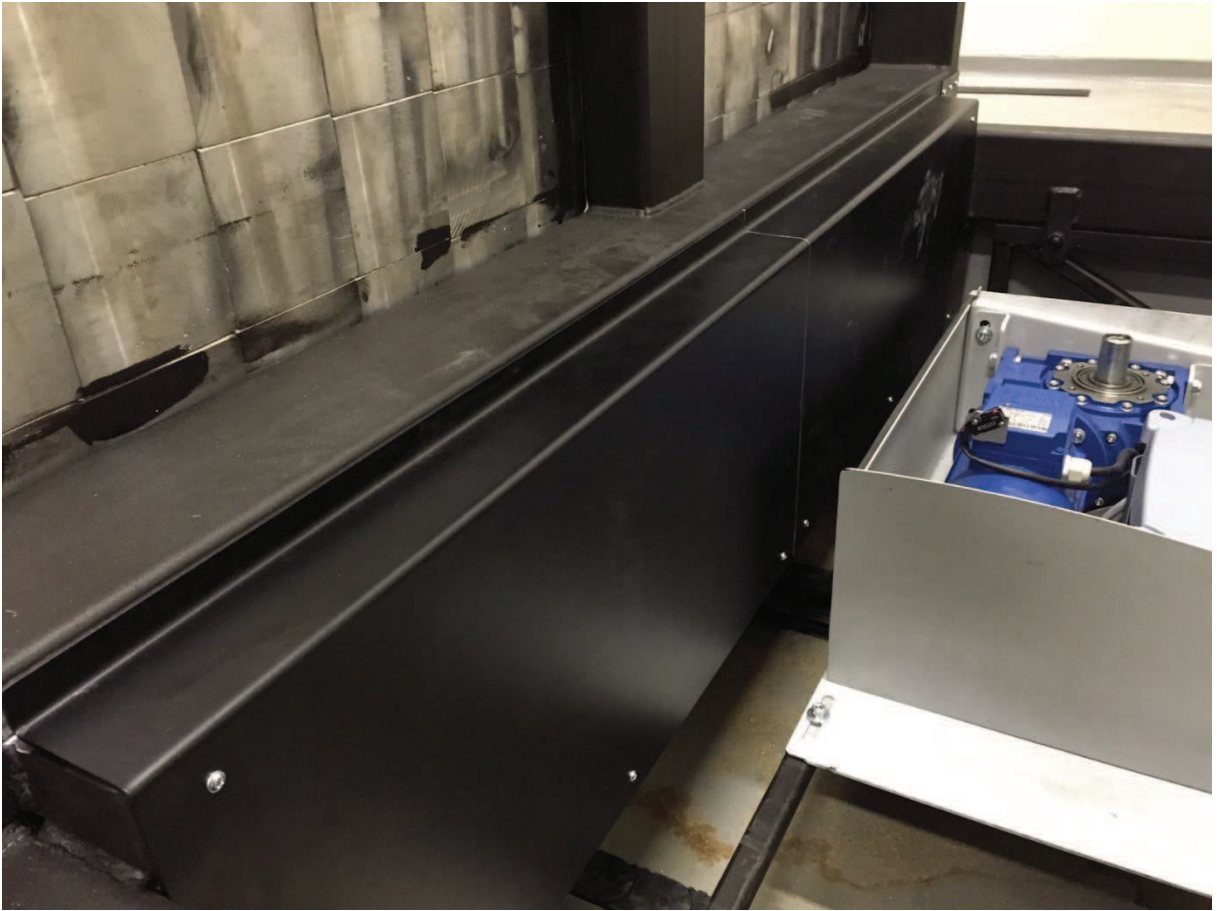




Obr. 33: Pohled na uzavřenou kalibrační laboratoř



Obr. 34: Částečně zakrytované stínění kanálu



*Obr. 35: Částečný pohled na uchycení pohonné jednotky*

## 6. Závěr

Cílem práce bylo zpracování konstrukčního řešení stínících dveří kalibrační laboratoře T100-1400 včetně kompletní výrobní dokumentace, z které je zveřejněna pouze část dle svolení zadavatele.

K celému projektu bylo přistupováno jako k prototypovému s možným cílem zavést tento výrobek jako novou produktovou linii pro doplnění standardní nabídky zadavatele.

Během vypracování této práce byl celý projekt kompletně nainstalován, odladěn, předán zákazníkovi a schválen Státním úřadem pro jadernou bezpečnost.

## Seznam použité literatury

- [1] RSICC Computer Code Collection – MCNP5. *Monte Carlo N-Particle Transport Code System, CCC-740 MCNP5/MCNPX*. Oak Ridge National Laboratory, June 2001
- [2] ŠVEC, V.: Části a mechanismy strojů. Spoje a části spojovací. Praha: ČVUT, 2008.
- [3] ŠVEC, V.: Části a mechanismy strojů. Příklady. Praha: ČVUT, 2003.
- [4] OTMAR, K., HOUKAL, J., TOMEK, P., ZÝMA, J.: Projekt – III. ročník. Praha: ČVUT, 2005
- [5] ŘASA, J, ŠVERCL, J.: Strojnické tabulky 1. Praha: Scientia, spol. s.r.o., 2004.
- [6] Katalogy výrobců a dodavatelů materiálu a užitých komponent.

## Seznam obrázků

Obr. 1: Ukázka základních tvarovaných AL profilů .....	14
Obr. 2: Příklad průmyslového pohonu .....	17
Obr. 3: Varianty kabelových vozíků od firmy Wampfler .....	20
Obr. 4: Kabelový buben v různých provedeních od firmy Wampfler .....	21
Obr. 5: Náhled na možnosti použití energetického řetězu .....	22
Obr. 6: Olověná stínící cihla dle ČSN 40 3802 - náhled do normy .....	24
Obr. 7: Popis ozubeného kola .....	27
Obr. 8: První konstrukční návrh .....	30
Obr. 9: Druhý konstrukční návrh .....	30
Obr. 10: Třetí konstrukční návrh .....	30
Obr. 11: Čtvrtý (finální) konstrukční návrh bez krytování .....	31
Obr. 12: Výpočtový model podélného nosníku .....	32
Obr. 13: Reálný model pro výpočet nosného profilu .....	32
Obr. 14.: Obecné rozměry polotovarů ČSN EN 10 219-2 A ČSN EN 10 162 .....	34
Obr. 15: Celkový pohled na svařenec nosného rámu .....	35
Obr. 16: Názvosloví stínících segmentů .....	36
Obr. 17: Dostínění uzavřených ocelových profilů .....	37
Obr. 18: Detail přední části nosného rámu osazeného kolečky LAG 1105 .....	38
Obr. 19: Detail kolečka typu 1105 výrobce LAG v řezu .....	38
Obr. 20: Detail možnosti axiálního seřízení kolečka .....	39
Obr. 21: Výkresový ISO pohled na čep kolečka .....	39
Obr. 22: Schematický model pro výpočet čepu kolečka .....	40
Obr. 23: Výpočtový model čepu kolečka .....	41
Obr. 24: Výsledek MKP výpočtu napětí .....	43
Obr. 25: Vetknutí a spojitě zatížení MKP modelu čepu kolečka .....	43
Obr. 26: Výsledek MKP výpočtu průhybu .....	44
Obr. 27: Uchycení pohonné jednotky .....	44
Obr. 28: Detail montáže držáku motoru .....	45
Obr. 29: První zkušební montáž olověných stínících cihel .....	46
Obr. 30: Pohonná jednotka NICE TUB3500 s integrovanou řídicí jednotkou .....	47
Obr. 31: Ovládací panel otevření/uzavření kalibrační laboratoře .....	48
Obr. 32: Celkový pohled na sestavu vybavení kalibrační laboratoře .....	48



Obr. 33: Pohled na uzavřenou kalibrační laboratoř .....	49
Obr. 34: Částečně zakrytované stínění kanálu .....	49
Obr. 35: Částečný pohled na uchycení pohonné jednotky .....	50
Obr. 36: Diagram pro určení součinitele $K_{HB}$ .....	57
Obr. 37: Součinitel tvaru zubů v dotyku $Z_H$ .....	58
Obr. 38: Součinitel součtové délky dotykových křivek boků zubů $Z_\epsilon$ .....	59
Obr. 39: Součinitel tvaru zubu a koncentrace napětí $Y_{FS}$ .....	59
Obr. 40: Diagram pro určení součinitele tvaru $\alpha_o$ v ohybu a $\alpha_k$ krutu .....	60

## Seznam tabulek

tab. 1: Zhodnocení použití stínících materiálů v oblasti ALARA .....	16
tab. 2: Součinitel $K_A$ podle vlivu vnějších dynamických sil .....	57
tab. 3: Součinitel mechanických vlastností materiálu spoluzabírajícího hřebene .....	58

## Seznam příloh

Příloha 1: Výkresová a průvodní dokumentace

Příloha 2: Tabulky a grafy pro určení součinitelů pro výpočet ozubení

Příloha 3: Tabulky pro určení součinitele vrubu

Příloha 4: Popis funkce sestavy



## Přílohy

### Příloha 1:

Výkresová dokumentace:

1400 – 0200000 STINICI DVERE

1400 – 0101010 KOLECKO

1400 – 0101011 CEP KOLECKA

Průvodní dokumentace:

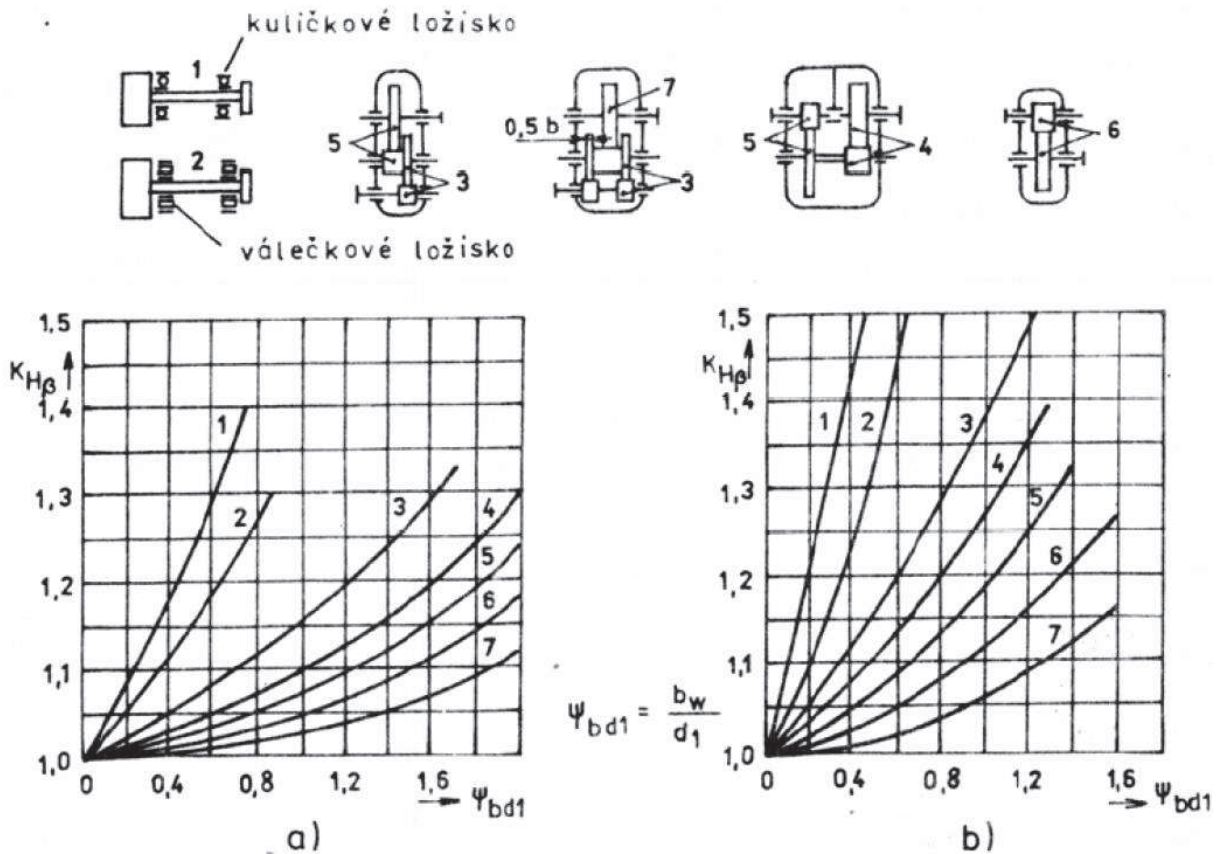
1400 – 02000 MONTÁŽNÍ POSTUP



**Příloha 2:** Tabulky a grafy pro určení součinitelů pro výpočet ozubení

tab. 2: Součinitel  $K_A$  podle vlivu vnějších dynamických sil

Zatěžování převodovky hnacím strojem	Zatěžování převodovky hnaným (pracovním) strojem			
	plynulé	s malou nerovnoměrností	se střední nerovnoměrností	s velkou nerovnoměrností
plynulé	1,0	1,25	1,5	1,75
s malou nerovnoměrností	1,1	1,35	1,6	1,85
se střední nerovnoměrností	1,25	1,50	1,75	2,0
s velkou nerovnoměrností	1,5	1,75	2,0	2,25

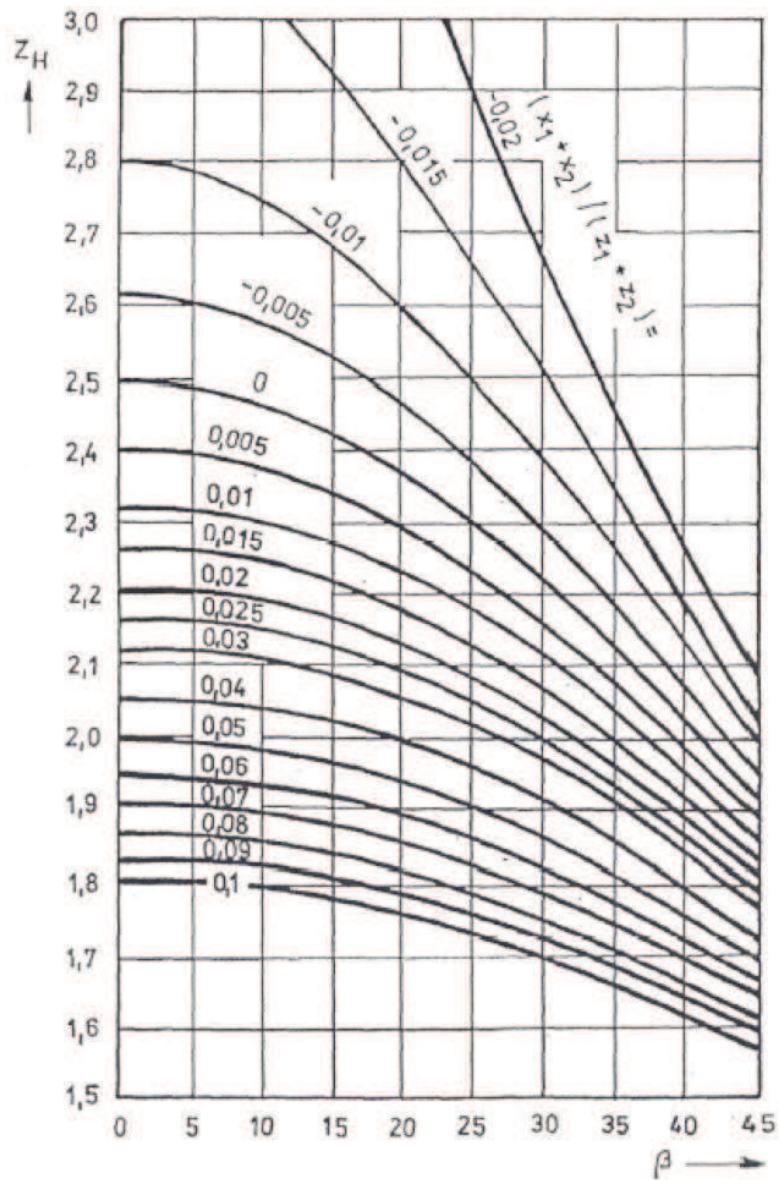


Obr. 36: Diagram pro určení součinitele  $K_{H\beta}$

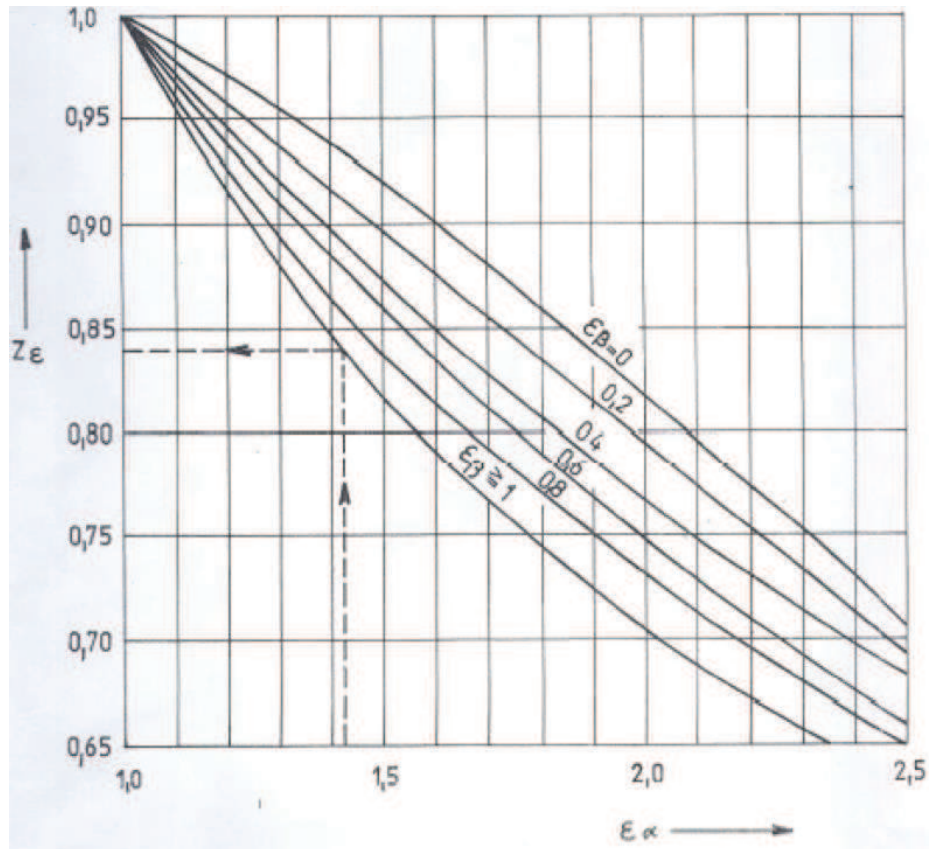
- a) tvrdost boku zubů  $V_{HV} \leq 350 \text{ HV}$
- b) tvrdost boku zubů  $V_{HV} \geq 350 \text{ HV}$

tab. 3: Součinitel mechanických vlastností materiálu spoluzabírajícího hřebene

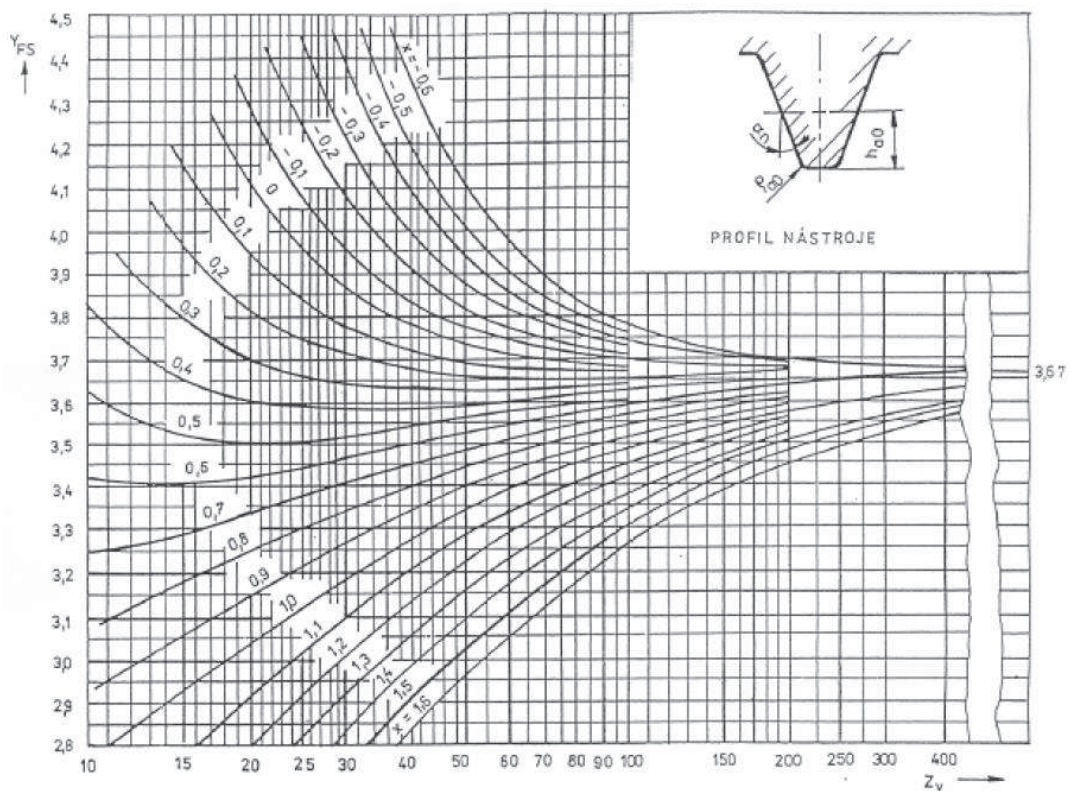
Pastorek			Kolo			$Z_E$
Materiál	Modul pružnosti $E_1$	Poissonovo číslo $\mu_1$	Materiál	Modul pružnosti $E_2$	Poissonovo číslo $\mu_2$	
Ocel	$2,1 \cdot 10^5$	0,3	Ocel	$2,1 \cdot 10^5$	0,3	190
			Litá ocel	$2,0 \cdot 10^5$		189
			Tvárná litina	$1,7 \cdot 10^5$		181
			Litý cínový bronz	$1,0 \cdot 10^5$		155
			Cínový bronz	$1,1 \cdot 10^5$		160
Litá ocel	$2,0 \cdot 10^5$		Litá ocel	$2,0 \cdot 10^5$		188
			Tvárná litina	$1,7 \cdot 10^5$		181
Tvárná litina	$1,7 \cdot 10^5$		Tvárná litina	$1,7 \cdot 10^5$		174



Obr. 37: Součinitel tvaru zubů v dotyku  $Z_H$

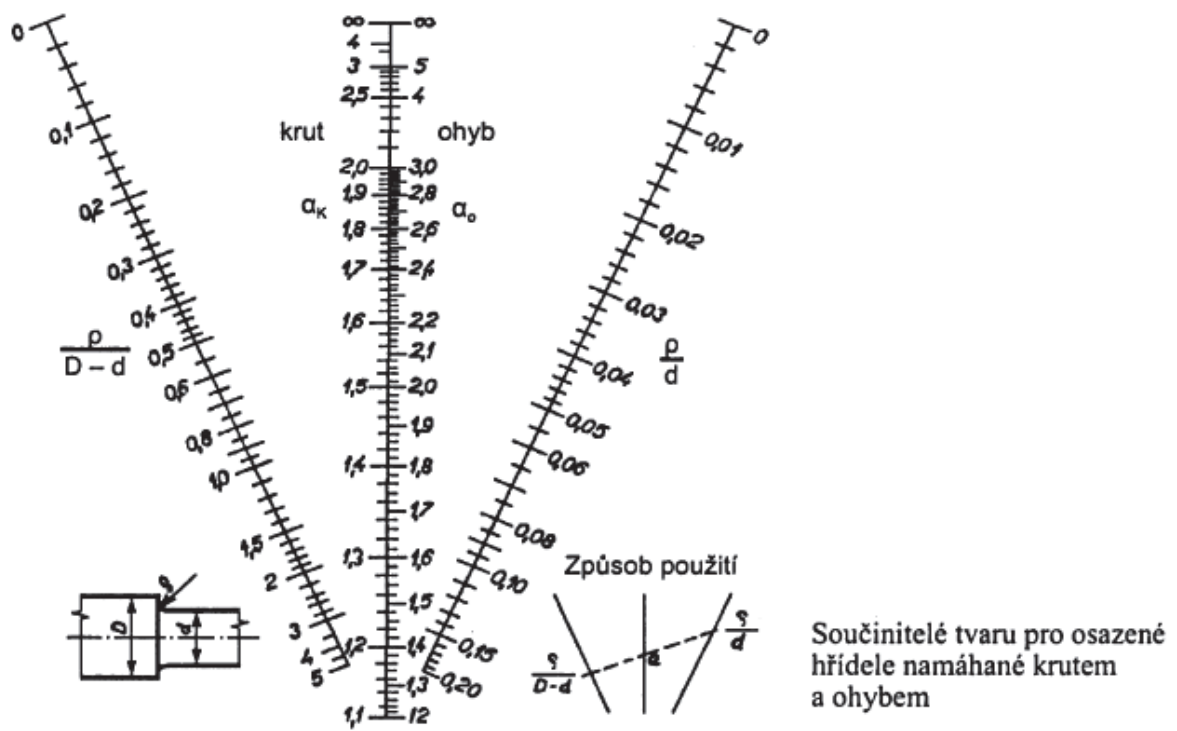


Obr. 38: Součinitel součtové délky dotykových křivek boků zubů  $Z_\epsilon$



Obr. 39: Součinitel tvaru zubu a koncentrace napětí  $Y_{FS}$

**Příloha 3:** Tabulky pro určení součinitele vrubu



Obr. 40: Diagram pro určení součinitele tvaru  $\alpha_0$  v ohybu a  $\alpha_k$  krutu

## Příloha 4: Popis funkce sestavy

### **Bezpečnostní pokyny**

**Před použitím systému vždy překontrolujte neporušenost pohyblivých přívodů k pojezdům.**

**Před každým uvedením pojezdů do pohybu zkontrolujte, že v jejich dráze není nic, co by bránilo jejich volnému pohybu a zajistěte, aby se v jejich blízkosti nenacházely žádné osoby.**

**V případě nebezpečí použijte tlačítko CENTRAL STOP.**

### **Ovládání**

Pojezdy měřicí hlavice a stínících dveří je možné ovládat buď z dotykového panelu, nebo při jeho poruše pomocí tlačítek. Při obou způsobech ovládání jsou aktivní blokace vzájemné nedovolené polohy obou pojezdů a všechny koncové spínače pojezdů.

Pokud nejsou stínící dveře v koncové otevřené poloze, je blokován pohyb měřicí hlavice ven z komory.

Pokud není měřicí hlavice v koncové poloze uvnitř komory, je blokováno uzavření stínících dveří.

### **Ruční ovládání pomocí tlačítek**

Pro ovládání pojezdu měřicí hlavice slouží dvojice tlačítek „hlavice – ven“ a „hlavice – do“.

Pro ovládání pojezdu stínících dveří slouží dvojice tlačítek „dveře – ven“ a „dveře – do“.

Po stisknutí tlačítka se pojezd plynule rozjede na maximální rychlost. Pojezd se pohybuje pouze po dobu stisknutí příslušného tlačítka. Při jeho uvolnění se pojezd řízeně zastaví (zpomalení z maximální rychlosti do zastavení za 1 sekundu). Při dalším stisknutí tlačítka se pojezd znovu plynule rozjede. Pokud pojezd dosáhne zpomalovací zónu, řízeně zpomalí na cca ¼ maximální rychlosti a touto sníženou rychlostí pak dojede do koncové polohy, aby bylo zajištěno jeho hladké zastavení. Po uvolnění tlačítka a jeho opětovném stisknutí se pojezd ve zpomalovací zóně směrem ke koncové poloze bude dál pohybovat sníženou rychlostí. Při stisknutí tlačítka pro obrácený směr pohybu pojezd postupně zrychlí na maximální rychlost.

## Ovládání pomocí dotykového panelu

Na dotykovém panelu je umístěno 8 tlačítek pro ovládání jednotlivých pojezdů a pro automatizované sekvence zavření resp. otevření dveří a měřicí hlavice.



### Ovládání jednotlivých pojezdů

Stisknutím modrého tlačítka se aktivuje pohyb příslušného pojezdu zvoleným směrem. I po uvolnění zůstává tlačítko ve stisknuté poloze a „podsvícené“ a pojezd se pohybuje zvoleným směrem (postupně zrychlí na max. rychlost a po dosažení zpomalovací zóny zpomalí a následně v koncové poloze zastaví). Okamžité zastavení pojezdu lze kdykoliv vyvolat stisknutím tlačítka STOP. Po zastavení pojezdu (na konci dráhy nebo po stisknutí tlačítka STOP) se původně stisknuté tlačítko „vrátí“ do původní polohy.



### Automatické sekvence

Řídicí systém má uloženy dvě sekvence pro otevření resp. uzavření obou pojezdů.

Sekvence se spouští stisknutím příslušného zeleného tlačítka „vše otevřít“ resp. „vše zavřít“.

Po aktivaci sekvence zůstane tlačítko stisknuté a podsvícené a současně se podsvítí i tlačítko signalizující pohyb příslušného pojezdu, který je v pohybu.

Sekvence se automaticky deaktivuje v okamžiku, kdy jsou oba pojezdy v příslušné koncové poloze.

Sekvenci lze přerušit stisknutím tlačítka STOP pro pojezd, který je právě v pohybu.

Při sekvenci „vše otevřít“ se nejprve aktivuje pojezd stínících dveří (pokud již dveře nejsou v koncové otevřené poloze) a po dosažení jeho koncové otevřené polohy se aktivuje pojezd měřicí hlavice.



Analogicky při sekvenci „vše zavřít“ se nejprve aktivuje pojezd měřicí hlavice (pokud již hlavice není v koncové poloze uvnitř komory) a po dosažení koncové polohy se aktivuje pojezd stínících dveří.

### Vydání protichůdného povelu

Pokud je při pohybu některého pojezdu stisknuto tlačítko pro opačný směr pohybu (omylem nebo úmyslně s cílem vyvolat pomalé zastavení), pojezd se řízeně zastaví. Na rozdíl od „okamžitého“ zastavení po stisknutí tlačítka STOP probíhá v tomto případě zastavení pozvolně (podle stejné křivky jako při zpomalení ve zpomalovací zóně). Obě tlačítka zůstanou zablokována ve stisknuté poloze a pojezd zůstane stát. K odblokování tohoto stavu je třeba stisknout tlačítko STOP příslušného pojezdu.



## Bezpečnostní spínače

Pro nouzové zastavení pojezdů slouží tlačítka CENTRAL STOP umístěná u dotykové obrazovky a na konstrukci vozíku hlavice.

Po jejich stisknutí dojde k přerušení napájení v rozvaděči na zadní stěně a tím k okamžitému zastavení pojezdů.

Stejnou funkci má kolizní spínač bránící kolizi obou pojezdů při selhání řízení nebo koncových spínačů.

Obnovení provozu smí provést pouze osoba s elektrotechnickou kvalifikací po odstranění příčiny, kvůli které byl systém odstaven

## Zapnutí systému/obnovení provozu po výpadku nebo vypnutí napájení

Řídící systém a akční členy (frekvenční měniče) jsou připraveny k provozu ihned po zapnutí přívodu a systém je tedy možné ihned ovládat ručně pomocí tlačítek.

Dotykový panel po přivedení napájení prochází inicializací a jeho použití je možné až po zobrazení obrazovky s tlačítky (cca po 30 sekundách od zapnutí).

