

# Konstrukce manipulačního podvozku pro zařízení na 3D tisk domů

## Bakalářská práce

*Studijní program:*

B2301 Strojní inženýrství

*Studijní obor:*

Strojní inženýrství

*Autor práce:*

**Aleš Vodsedálek**

*Vedoucí práce:*

Ing. Robert Voženílek, Ph.D.

Katedra vozidel a motorů





## Zadání bakalářské práce

# Konstrukce manipulačního podvozku pro zařízení na 3D tisk domů

*Jméno a příjmení:* **Aleš Vodsedálek**  
*Osobní číslo:* S17000142  
*Studijní program:* B2301 Strojní inženýrství  
*Studijní obor:* Strojní inženýrství  
*Zadávající katedra:* Katedra vozidel a motorů  
*Akademický rok:* **2020/2021**

### Zásady pro vypracování:

1. Provedte rozbor možných mechanických uspořádání manipulačního podvozku.
2. Navrhněte vlastní konstrukční uspořádání manipulačního podvozku.
3. Provedte pevnostní kontrolu vybraných dílů.

*Rozsah grafických prací:*  
*Rozsah pracovní zprávy:*  
*Forma zpracování práce:*  
*Jazyk práce:*

Vybraná výkresová dokumentace  
cca 40 stran  
tištěná/elektronická  
Čeština



### **Seznam odborné literatury:**

- [1] PEŠÍK, L.: Části strojů 2. díl. Liberec, TU 2005. ISBN 80-7083-939-2.  
[2] PEŠÍK, L.: Části strojů. 1. díl. Liberec, TU 2005. ISBN 80-7083-938-4

*Vedoucí práce:* Ing. Robert Voženílek, Ph.D.  
Katedra vozidel a motorů

*Datum zadání práce:* 15. listopadu 2020  
*Předpokládaný termín odevzdání:* 15. května 2022

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld  
děkan

L.S.

Ing. Robert Voženílek, Ph.D.  
vedoucí katedry

## Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

28. června 2021

Aleš Vodsedálek



## **Konstrukce manipulačního podvozku pro zařízení na 3D tisk domů**

### **Construction of handling vehicle for 3D house printer**

#### **Anotace:**

Bakalářská práce se zabývá návrhem konceptu automatického vozíku pro převoz polovičního funkčního modelu 3D tiskárny pro tisk domů projektu 3D-STAR. V práci jsou popsány používané konfigurace pohonu, včetně výběru té nejvhodnější pro daný případ. S ohledem na zadané požadavky bylo zkonstruováno kompletní řešení sestavy vozíku, včetně výběru kupovaných dílů a pevnostní kontroly nosných částí. Součástí práce je také návrh převozního systému tiskárny.

#### *Klíčová slova:*

*3D tisk domů, automaticky řízený vozík, diferenciální pohon, 3D-STAR .*

#### **Annotation:**

This bachelor thesis deals with designing of a concept of automated vehicle used to transport half-scale working model of 3D house printer 3D-STAR. Thesis describes different used drive configurations including the selection of the best one for this application. With regards to given requirements, the complete assembly of vehicle is then designed including the selection of purchased parts and load simulations. Designing of printer's transportation system is also included.

#### *Keywords:*

*3D house printing, automatic guided vehicle, differential drive, 3D-STAR .*

## **Poděkování**

Moje poděkování patří v první řadě vedoucímu bakalářské práce Ing. Robertovi Voženílkovi, Ph.D. za cenné rady, komentáře a také za čas strávený při konzultacích. Dále bych také chtěl poděkovat Ing. Tomášovi Petrovi za poskytnutí důležitých informací týkajících se konstrukce tiskového robota.

V neposlední řadě bych rád poděkoval mojí rodině, přítelkyni a přátelům za jejich podporu a trpělivost v průběhu celého studia.

## Obsah

Seznam použitých zkratk	9
1 Úvod	10
2 Teoretická část	11
2.1 3D tiskárny	11
2.2 Konstrukční provedení 3D tiskáren pro tisk domů	11
2.2.1 Portálová konstrukce	11
2.2.2 Robotická ruka	12
2.3 3D-STAR	14
2.4 Funkce manipulačního podvozku	16
2.5 Požadavky	17
2.6 Automaticky řízené vozíky (AGV)	18
2.7 Konfigurace pohonu AGV	19
2.7.1 Nezávislé řízení (4WS)	19
2.7.2 Všesměrová kola	20
2.7.3 Diferenciální pohon	22
3 Praktická část	23
3.1 Výběr konfigurace pohonu podvozku	23
3.2 Návrh vyrovnávání	24
3.2.1 Vyrovnávání pružinami	24
3.2.2 Vyrovnávání pomocí ramen	25
3.3 Výběr pohonu	25
3.4 Výběr otočných koleček	27
3.5 Rám	28
3.5.1 Hlavní rám	28

3.5.2	Ramena .....	29
3.5.3	Otočný mechanismus .....	30
3.5.4	Doraz .....	30
3.5.5	Rozmístění řídicí elektroniky.....	31
3.6	Výsledná konstrukce vozíku .....	33
3.7	Kontaktní systém.....	34
4	Pevnostní kontrola .....	37
4.1	Simulace zatížení vybraných dílů .....	38
4.1.1	Zatížení Hlavního rámu .....	38
4.1.2	Zatížení ramene.....	40
4.1.3	Zatížení závěsu.....	40
5	Závěr .....	41
	Použitá literatura .....	42
	Seznam příloh.....	45

## Seznam použitých zkratk

4WS	-	Four wheel steering, Řízení všemi koly	
AGV	-	Automatic guided vehicle, Automaticky řízený vozík	
CAD	-	Computer aided design, Počítačem podporované projektování	
VZV	-	Vysokozdvihový vozík	
$B_l$	-	Šířka ložiska	[mm]
$d$	-	Průměr čepu	[mm]
$F_Z$	-	Zatěžující síla	[N]
$g$	-	Gravitační zrychlení	[m*s <sup>-2</sup> ]
$k$	-	Koeficient bezpečnosti	[-]
$K_0$	-	Dovolený tlak v ložisku	[MPa]
$m_t$	-	Hmotnost tiskárny	[kg]
$m_{vp}$	-	Přibližná hmotnost vozíku	[kg]
$n_h$	-	Počet hnacích kol	[-]
$n_K$	-	Počet kontaktních bodů	[-]
$n_l$	-	Počet ložisek ramene	[-]
$p_{DOV}$	-	Dovolený tlak v plechu	[MPa]
$p_l$	-	Tlak v ložisku	[MPa]
$p_p$	-	Tlak v plechu	[MPa]
$R_{Ax}$	-	Vodorovná reakce v bodě A	[N]
$R_{Ay}$	-	Svislá reakce v bodě A	[N]
$R_C$	-	Reakce v čepu	[N]
$R_{eH}$	-	Minimální mez kluzu	[MPa]
$t_p$	-	Tloušťka plechu	[mm]

# 1 Úvod

Metody 3D tisku se staly již běžným prostředkem vytváření prototypů a funkčních dílů v mnoha odvětvích. V posledních letech tento způsob výroby úspěšně proniká i do stavebnictví a 3D tiskem tak již byla na světě zhotovena řada objektů. Již teď je zřejmé, že potenciál této technologie je veliký. Automatizování stavebních procesů nabízí totiž jak ekologický, tak i ekonomický posun při zvýšení designových možností tvorby staveb.

Zvyšování míry automatizace celé stavby má také pozitivní dopad na zvýšení produktivity. Plně automatický systém tisku je totiž schopen pracovat nepřetržitě a jeho největším omezením je pouze doba potřebná pro tuhnutí materiálu. Zhotovení celého objektu zcela bez lidského přičinění má také výhodu v tom, že tiskový robot může pracovat i v prostředích nebezpečných pro lidský život (např. ve vesmíru, nebo v místech přírodních a průmyslových katastrof).

K úspoře materiálu přispívá i samotný princip 3D tisku. Lze totiž vytvořit struktury jen obtížně vyrobitelné jinými stavebními procesy. Tyto struktury můžou mít jak designový, tak i konstrukční účel a lze tak vytvářet díly o pevnosti srovnatelné s běžnými stavebními postupy pouze se zlomkem materiálu. Další úspory je dosaženo tím, že všechen tiskový materiál je přetvořen ve výslednou strukturu. Odpad takové operace je pak minimální.

Využitelnost této technologie je důvodem vzniku projektu 3D-STAR TU v Liberci. Ten si dává za cíl vytvoření nejen vlastního tiskového robota, ale i vývoj vhodných stavebních hmot a návrh domů vyrobitelných tímto způsobem. Jeho výsledkem tedy bude kompletní systém pro tvoření staveb pomocí 3D tisku.

Vývoj tiskového robota je náročným úkonem, proto bude nejdříve pro testovací účely vytvořen jako funkční model v poloviční velikosti. Bude tak možno vyzkoušet všechny předpoklady pro tvorbu stavby, při nižší prostorové a logistické náročnosti. Tento tiskový robot má ale omezený pracovní rozsah a pro úspěšné dokončení stavby bude nutné ho automaticky přemísťovat po jednotlivých tiskových pozicích.

Cílem této práce je tedy vytvoření konceptu automatického manipulačního podvozku (AGV), určeného pro převážení tiskového robota po stavební ploše. Konkrétně se bude jednat o převážení funkčního modelu tiskárny projektu 3D-STAR v polovičním měřítku.

## 2 Teoretická část

### 2.1 3D tiskárny

3D tisk nebo-li aditivní výroba je počítačem řízený sekvenční systém vrstvení 2D obrazců k vytvoření trojrozměrného tvaru. Obzvláště užitečný je k výrobě prototypů a pro výrobu tvarově složitých součástí, jejichž výroba by jinými způsoby byla velmi obtížná nebo nemožná. Byl vyvinut a patentován již v 80. letech minulého století, ale v té době byl ještě velmi náročným a drahým způsobem výroby, a tak se využíval pouze velmi výjimečně. [1] Až po roce 2009, kdy jeho patent [2] vypršel a technologie se posunuly, se stal více dostupným a tím pádem využívaným prostředkem výroby. Jeho využití je nyní velmi rozšířené do mnoha odvětví, od výroby strojních prototypů, přes díly v letectví a kosmonautice, lékařství, až po tisk domů. [1]

### 2.2 Konstrukční provedení 3D tiskáren pro tisk domů

#### 2.2.1 Portálová konstrukce



Obr. 1 KampC - Dvoupatrový dům vytvořený 3D tiskárnou BOD2 [3]

Mezi tiskárnami pro 3D tisk domů se nejčastěji používají portálové tiskové systémy. Jejich základ tedy tvoří portálová konstrukce, díky které je celá tiskárna tuhá, rozebíratelná a přemístitelná.

Oblíbenými se staly také kvůli jejich všeobecně jednoduššímu provedení a tím pádem i nižší ceně. Zvládají pracovat samočinně a lze s nimi vytvářet i dvoupatrové domy (Obr. 1). Navíc zvládají tisk celého domu najednou, bez přerušení, díky čemuž se zvýší pevnost hotového díla. Nejsou ale příliš vhodné pro tisk ve stísněných prostorech, protože kolem domu musí být navíc manipulační prostor. Dalším omezením je samotná velikost domu, která nemůže převýšit pracovní rozsah tiskárny. Rovněž postavení celého rámu tiskárny je náročným úkolem, který může zabrat i několik dní. Jejich výhodou ale je, že toto konstrukční řešení s pohybem tiskové hlavy ve 3 osách využívá drtivá většina 3D tiskáren. Lze tedy využít jejich ovládací software (slicer), který se upraví pro jiné rychlosti a větší rozměry. Základní kód tohoto ovládacího programu 3D tiskáren je volně přístupný a na jeho zdokonalování se již řadu let podílí firmy i běžní uživatelé. Díky tomu se stal součástí některých CAD programů, kde se po vytvoření 3D modelu a zadání parametrů automaticky vytvoří dráhy tiskové hlavy, podle kterých už tiskárna zvládne sama pracovat. [6]

### 2.2.2 Robotická ruka

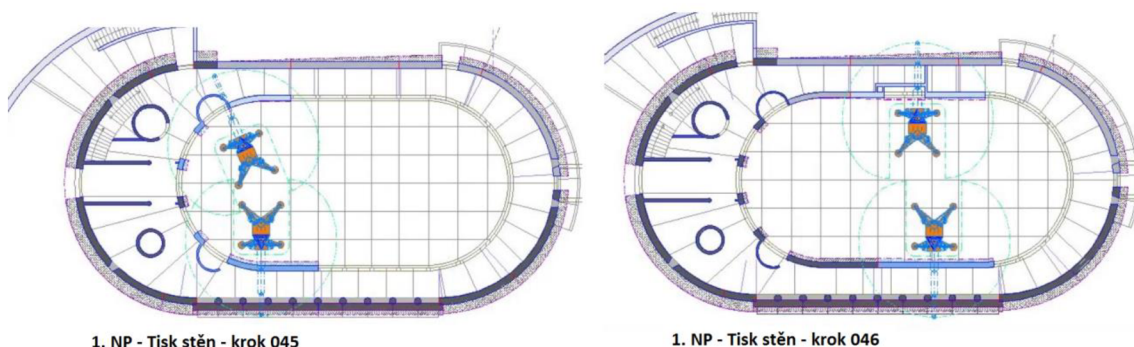


Obr. 2 3D tiskárna BauMinator® [4]

Dalším způsobem konstrukce 3D tiskárny pro tisk domů je využití robotické ruky. Tato robotická ruka umožňuje pohyb tiskové hlavy ve více osách. Celá tiskárna potom zvládne tvorbu složitějších útvarů a lze navazovat na již vytisknuté části domu. Nevýhodou takového řešení ale bývá velikost tiskového prostoru, do kterého není možné umístit celý dům najednou. Tento prostor je určen délkou robotické ruky a také tím, že většina robotických rukou není schopna se otočit kolem své osy o 360°.



Tiskový prostor takové tiskárny je potom válec o kruhové podstavě s kruhovou výsečí. Kvůli tomuto omezení je třeba pro tisk mimo její pracovní rozsah zajistit pohyb tiskárny po pracovní ploše. Toho lze docílit pevným spojením pohonu s tiskárnou anebo využitím jiných prostředků, například VZV anebo robotickým podvozkem. Pak je možné po dotisknutí na jedné pozici přesunout tiskárnu na další nebo ji otočit kolem její osy. Výzvou pro úspěšné využívání takovéto 3D tiskárny je programování, a to hlavně díky jejímu vyššímu počtu stupňů volnosti. Pro tisk jedné části je totiž více možností a je třeba vybrat to nejvýhodnější. Výzvou je to také kvůli tomu, že na rozdíl od portálové tiskárny není tento druh řešení 3D tiskárny příliš rozšířený. Tím pádem nelze využít volně dostupné programy pro vytváření drah tiskové hlavy. Jejich vytváření je tedy podstatně zdlouhavější, ale dá se při něm využít výhod více stupňů volnosti a tím zlepšit pevnost a kvalitu tisku konkrétních míst. Další z výhod tohoto typu tiskárny je, že může pracovat ve skupinách a na jedné stavbě může spolupracovat víc tiskáren. Tiskové prostory takových tiskáren na sebe mohou navazovat a lze tisknout rychleji, než při využití portálové konstrukce.



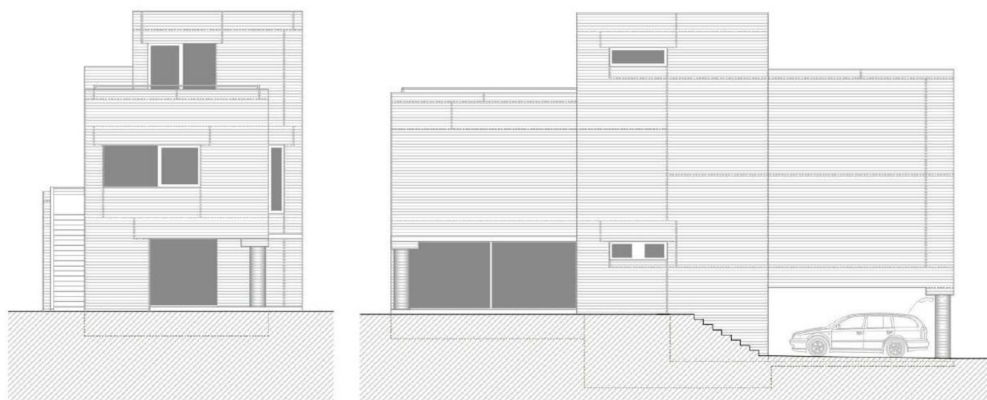
**Obr. 3 Spolupráce dvou 3D tiskáren [5]**

Výhodou tohoto druhu tisku oproti předchozí je také rychlost přípravy. Ta spočívá pouze ve vytvoření základové desky a umístění tiskárny na pozici. Tato příprava zabere zlomek času, protože veškeré úkony spojené s tiskem se odehrávají na základní desce a není třeba manipulačního prostoru okolo. Díky tomu lze tisknout i ve stísněných prostorech, např. mezi domy. [6]

## 2.3 3D-STAR

*"Projekt 3D-STAR, realizovaný na Technické univerzitě v Liberci v letech 2018 – 2022, se zabývá vývojem robotického zařízení a souvisejícího know-how pro tisk svislých a vodorovných stavebních konstrukcí budov. Zároveň jsou zkoumány a vyvíjeny vhodné tiskové směsi a konstrukční principy, využívající možnosti 3D tisku. Jeho cílem je vývoj technologie, umožňující realizaci půdorysně rozsáhlejších vícepodlažních objektů metodou jejich postupného tisku na staveništi. Mezioborově sestavený řešitelský tým, ve kterém je kromě čtyř fakult TUL zastoupen i Kloknerův ústav ČVUT v Praze, se zabývá všemi dotčenými souvislostmi." [7]*

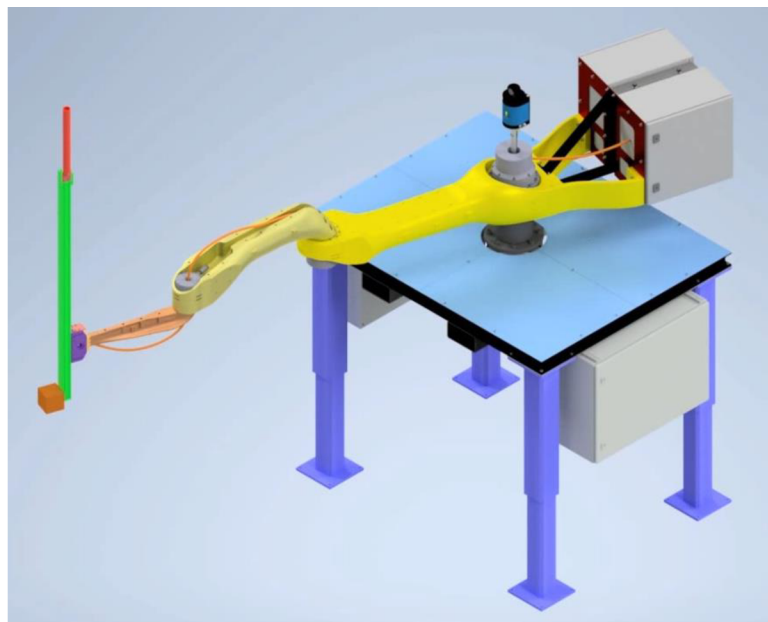
Tento projekt si dává za cíl maximální mobilitu a přesnost celého tiskového zařízení. Z toho důvodu bylo zvoleno řešení 3D tiskárny s robotickou rukou, která zajišťuje snadnou přepravu i přípravu pro tisk při současně vysoké kvalitě tisku. Přesnost tisku finální verze by měla být 2-3 mm, to ale bude záviset na tuhosti systému. Současně dochází k vývoji jak řídicího software, konstrukčního řešení samotné tiskárny a tiskové hlavy, tak i k návrhu studií objektů vytisknutelných právě touto 3D tiskárnou (Trial House 01, kostel Neratovice).



**Obr. 4 Trial House 01 [7]**

Kvůli jeho rozsáhlosti je třeba projekt vývoje robotické tiskárny rozdělit na více kroků. Prvním bylo vytvoření funkčního modelu ramene v měřítku 1:4. Na něm byla ověřena funkce řídicího software a jeho schopnost navádět ruku po tiskových drahách. Současně s ním probíhá vývoj a testování jak tiskové hlavy, tak i vhodných tiskových materiálů.

Druhým krokem je vytvoření funkční tiskárny v měřítku 1:2 (Obr. 5), se kterou už bude možné tisknout přímo na staveništi. Cílem tohoto kroku je ověřit a zdokonalit všechny organizační i funkční záležitosti tisku a logistiky.



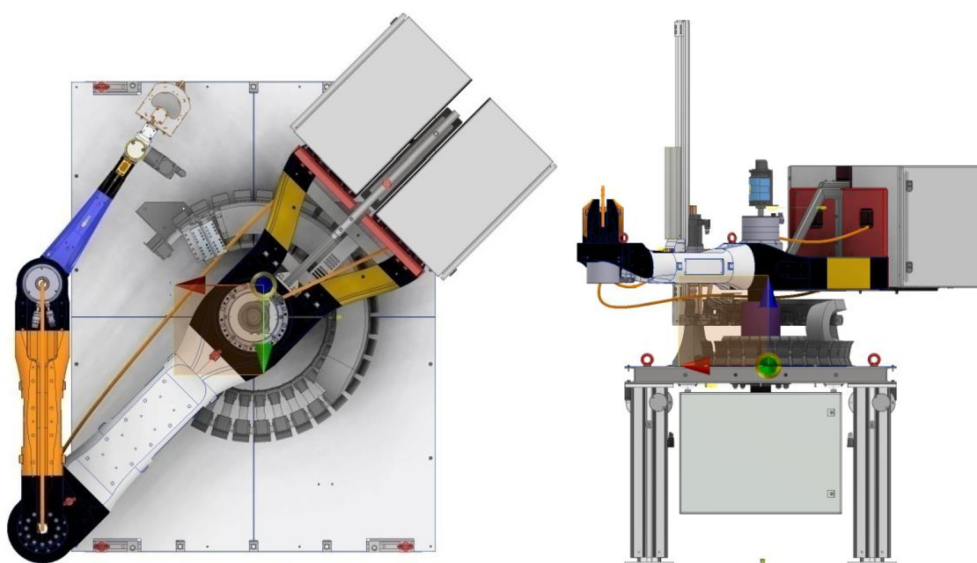
Obr. 5 CAD model 3D tiskárny v měřítku 1:2 (Autor: Tomáš Petr)

Posledním krokem bude vytvoření samotné tiskárny a její následné praktické využití. Pracovní dosah ramene této tiskárny bude do vzdálenosti 5,6m a do výšky 3,2m, což odpovídá výšce jednoho patra.

Zjednodušení logistiky bude dosaženo tak, že tiskárna bude schopna vytisknout kromě stěn domu, také stropní a střešní díly přímo na staveništi. Ty budou z prostorových důvodů vytištěny v poloze na boku, mimo jejich finální polohu. Bude je tak stále třeba po vytvrnutí otočit a usadit jeřábem, avšak jejich přeprava z výrobní haly na staveniště nebude potřebná. [7] [8]

## 2.4 Funkce manipulačního podvozku

Manipulační podvozek bude sloužit jako další možnost převozu tiskového robota po připravené základové desce. První možností budou oka pro jeřáb, druhá možnost jsou kapsy pod rámem pro přemístování pomocí VZV. Třetí možností bude právě tento podvozek, který bude spolupracovat s tiskárnou a bude ji převážet po jejích pracovních pozicích bez lidského přičinění. Poté, co 3D tiskárna dokončí svůj program na dané stavební pozici, dá signál vozíku, který pod ni vjede. Tiskárna složí svoje rameno do transportní pozice, aby bylo její těžiště co nejbližší jejího středu.



Obr. 6 Rameno ve složené pozici (Autor: Tomáš Petr)

Dále zasune svoje nohy a tím dosedne na manipulační podvozek. Nohy budou v kompletně zasunuté pozici několik centimetrů nad zemí, aby při převážení nebyly v kontaktu se základovou deskou. Podvozek poté otočí, nebo převezde tiskárnu do její další pracovní pozice, kde vysune svoje nohy a podvozek bude moct odjet pryč. Díky tomu, že podvozek není pevně svázan s tiskárnou se umožní jeho větší variabilita, kdy při správném plánování může různě po stavbě převážet více tiskáren.

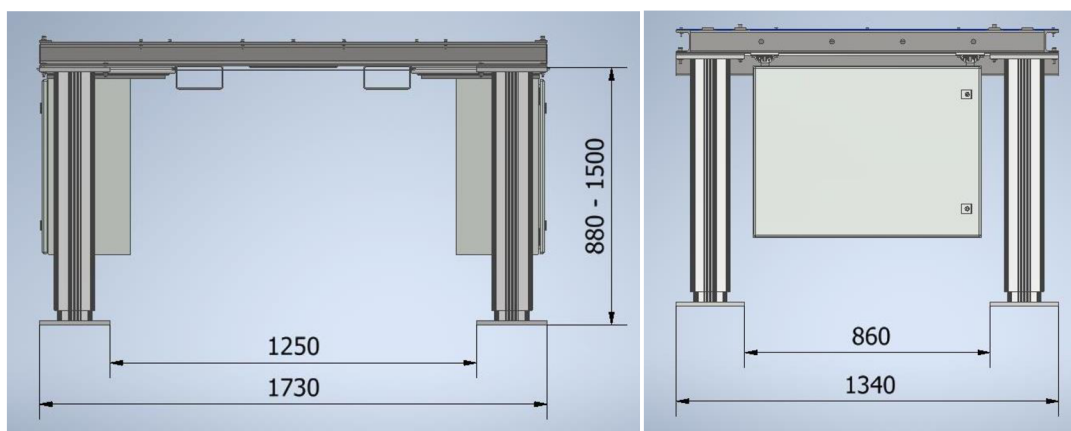
## 2.5 Požadavky

Pohon tohoto vozíku by měl být řešen pomocí elektromotorů s jeho vlastním bateriovým zdrojem. Kvůli potřebným manévřům je třeba, aby se podvozek zvládl otočit okolo své osy a mohl zatáčet na prostoru omezeném jak tiskárnou, tak již vytištěnými díly stavby.

Rám vozíku by měl vydržet zatížení jak svoje, tak od tiskárny i při mírné nerovnosti podlahy. Rámem bude svařovaná konstrukce z ocelových profilů a plechových dílů. Měl by poskytovat dostatečně prostorné umístění pro baterie, jeho řídicí elektroniku a laserový radar.

Protože základní rám tiskárny je přizpůsoben pouze pro převážení VZV a jeřábem, je třeba vytvořit kontaktní systém pro převoz vozíkem. Tento systém musí mít dostatečnou pevnost pro dané zatížení. Musí umožnit úspěšný transport i v případě, že tiskárna na podvozek nedosedne přesně. Je třeba také určit jakým způsobem bude tiskárna jištěna proti vzájemnému posouvání tiskárny po převozní ploše.

### Zadané parametry:



Obr. 7 Prostor pod tiskárnou (Autor: Tomáš Petr)

*Hmotnost tiskárny* -  $m_t = 900\text{kg}$

*Koeficient bezpečnosti* -  $k = 2$

## 2.6 Automaticky řízené vozíky (AGV)



Obr. 8 HOMAG TRANSBOT [9]

Automaticky řízené vozíky jsou robotická přepravní zařízení, která jsou schopna s minimálním lidským úsilím nebo plně automaticky dopravovat náklady v průmyslových podmínkách. Tyto vozíky jsou hojně využívány ve skladech a výrobních halách téměř každého výrobního odvětví. K jejich širokému využití přispívá také široká škála různých konstrukčních řešení. Od vozíků, které převáží náklad přímo na svojí přepravní ploše (Obr. 8), přes zařízení určená k tahání přívěsů, až po automatické VZV (Obr. 9).



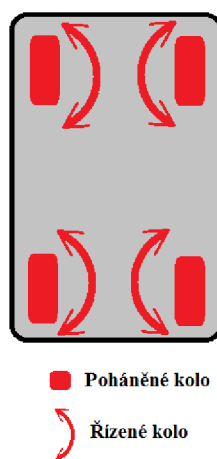
Obr. 9 Automatický VZV MAXAGV FX20 [10]



Možností jejich automatické navigace v prostoru je mnoho. Například *navigace podle reflexní pásky*. Tato čára nakreslená nebo nalepená na zemi udává trajektorii, kterou vozidlo při svojí cestě následuje. Podobného principu využívá *řízení pomocí drátu*, ten je umístěný několik centimetrů pod podlahou, vysílá rádiový signál a tím naviguje vozík k cíli. Dalším způsobem řízení je *laserová navigace*, která je v kombinaci se znalostí prostředí schopna robota přesně navigovat. Díky laseru je vozík schopný detekovat nečekané překážky, úspěšně se jim vyhnout a pokračovat dále v jízdě. To u řízení pomocí pásky a drátu není možné. [11]

## 2.7 Konfigurace pohonu AGV

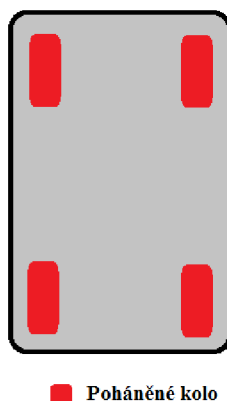
### 2.7.1 Nezávislé řízení (4WS)



Obr. 10 Schéma pohonu s nezávisle řízenými koly

Toto řešení využívá pro svůj pohyb čtyři hnaná kola, která mají navzájem nezávislý pohon i možnosti natáčení. Umožňuje prakticky neomezené možnosti pohybu podvozku. Od otáčení na místě, přes jízdu šikmo, až po technicky nemožné pohyby, kdy se například podvozek snaží roztrhnout nebo zatočení kol takovým způsobem, že není možný další pohyb. Zamezení těmto krizovým situacím si tedy vyžaduje náročnější programování pohybu. Dále pak je třeba využít rozsáhlejšího řídicího systému, který zvládne ovládání pohonu a řízení každého kola zvlášť.

## 2.7.2 Všesměrová kola



Obr. 11 Schéma pohonu s pevnými koly

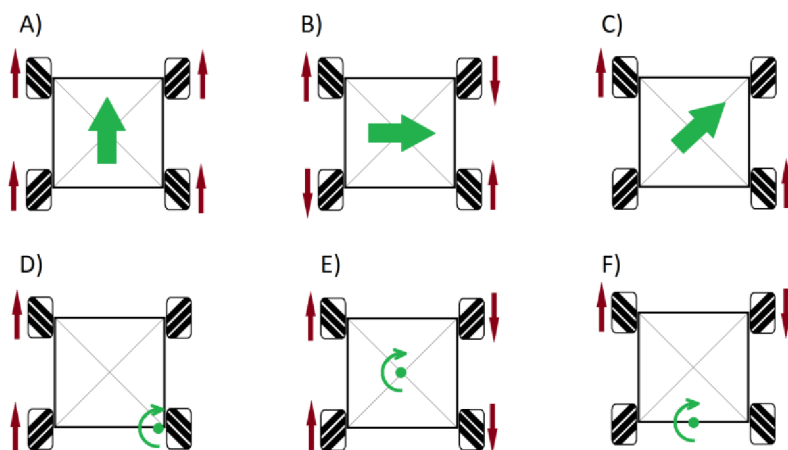
Tato koncepce využívá pohon s hnanými neřiditelnými koly v každém rohu vozíku. Při použití klasických kol toto řešení umožňuje pohyb vpřed, vzad a zatáčení pouze v případě smýkání některých kol (skid-steer). Toto smýkání zkracuje životnost použitých kol a manévrovatelnost takového vozidla je poté značně omezená. Proto se pro pohon AGV nejčastěji vyskytuje s použitím všesměrových kol (Obr. 12).



Obr. 12 Všesměrové kolo (Mecanum wheel) [12]

Všesměrové (omnidirekcionální) kolo (také Mecanum wheel) se skládá ze série vypuklých válců šikmo připevněných po celém jeho obvodu. Tyto válce jsou nejčastěji umístěny mimoběžně pod úhlem  $45^\circ$  vůči ose otáčení a normálové rovině kola. Každé kolo má vlastní obousměrný pohon nezávislý na ostatních kolech a má pevnou osu rotace bez možnosti natáčení. Při rotaci kola se vytváří hnací síla kolmá k ose válce, který je v kontaktu s podložkou. Tato síla je potom šikmá k ose rotace celého kola.





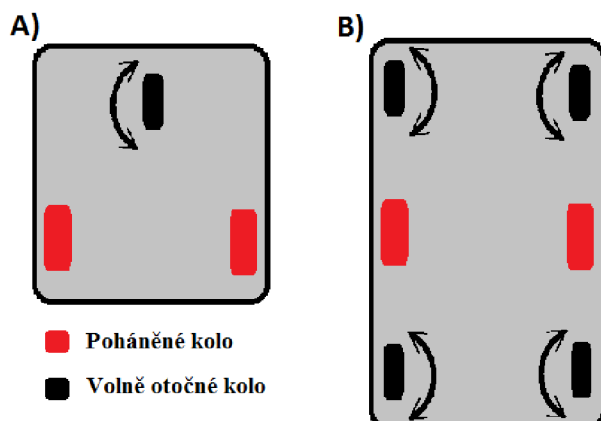
Obr. 13 Pohyby podvozku s všesměrovými koly (vzor: [13])

A) Pohyb vpřed B) pohyb do boku C) Pohyb šikmo D) rotace kolem zadního kola

E) Rotace kolem středové osy F) rotace kolem středu zadní strany

Na obrázku (Obr. 13) můžeme vidět ukázkové využití všesměrového kola se čtyřmi hnacími koly v každém rohu čtvercového podvozku. Na každé ose jsou dvě kola umístěna zrcadlově vůči sobě. Válce ve spodní části kol, která jsou v kontaktu s podložkou jsou k úhlopříčce kolmá. Díky tomu každé kolo vytváří sílu, která je zhruba rovnoběžná s pomyslnou úhlopříčkou, a která se tedy skládá ze dvou složek, podélné a příčné. Změnou směrů a rychlostí otáčení jednotlivých kol poté dochází ke sčítání nebo odčítání složek těchto sil. Výsledné hnací síly mají pak na vozidlo jak lineární, tak i rotační účinky. Kombinací těchto pohybů lze dosáhnout téměř jakékoliv trajektorie anebo rotace podle libovolné osy. Díky tomu může vozidlo manévrovat na velmi malém prostoru. [14]

### 2.7.3 Diferenciální pohon



Obr. 14 Diferenciální pohon  
A) Hnaná osa na jedné straně B) Hnaná osa ve středu

Diferenciální druh pohonu využívá dvou hnaných kol s pevnou osou otáčení. Tato kola jsou na sobě nezávislá a vozidlo lze tedy řídit změnou rychlosti a směru otáčení jednotlivých kol. Dynamiku otáčení lze také měnit umístěním hnaných kol. Nejjednodušším řešením je umístit hnaná kola na přední nebo zadní stranu vozidla (Obr. 14 - A). Zatačení potom probíhá kolem libovolného bodu osy otáčení hnaných kol. Pro zajištění stability tohoto řešení stačí pouze jedno nebo dvě otočná kolečka.

Další konfigurací je umístění hnaných kol uprostřed každé strany vozidla (Obr. 14 - B). Takové vozidlo je schopné otáčení kolem středové osy a zatačení probíhá kolem libovolného bodu příčné střednice vozidla. Při zatačení podvozku s takovou koncepcí dochází k vybočování přední i zadní strany. Toto vybočení by při manévrování ve stísněných prostorech mohlo způsobit kolizi, a proto si vyžaduje dodatečné senzory. Díky vybočování je tato konfigurace rovněž nevhodná pro tahání přívěsů. Při couvání by totiž i sebemenší korekcí mohlo dojít k zalomení přívěsu a znemožnění dalšího pohybu. [11] Pro zajištění stability je zde třeba využít dvou nebo čtyř podpůrných koleček, která jsou nehnaná a volně otočná.

Z podstaty pohonu zde nedochází ke smýkání kol a díky tomu je možné využít kola klasická. Manévrovatelnost tohoto řešení je poměrně vysoká, lze zatačet na velmi malém prostoru a také rotovat podvozkem kolem středu osy otáčení hnaných kol. Naopak omezeny jsou pohyby ve směru šikmo a do boku, to v některých případech vyžaduje dodatečné manévrování.

## 3 Praktická část

### 3.1 Výběr konfigurace pohonu podvozku

#### Nezávisle řízená kola

Hlavním problémem využití této konfigurace v omezeném prostoru je stabilita. Ke snížení stability dochází umístěním kol blíže k těžišti vozíku kvůli prostoru nutnému k jejich natáčení. Umožňovala by téměř neomezenou pohyblivost. Pro využití našeho vozíku bychom si ale vystačili i s méně širokými možnostmi pohybu. Tato konfigurace by si pro její provoz vyžadovala nejrozsáhlejší řídicí elektroniku a nebyla proto akceptována z důvodů složitosti.

#### Všesměrová kola

Protože všesměrová kola není třeba řídit a otáčí se podle pevné osy, mohla by být umístěna blíže ke kraji vozíku. Tím by se zvýšila jeho stabilita. Dále oproti prvnímu řešení se řízenými všemi koly, by se zjednodušilo celkové ovládání podvozku. V tomto případě by bylo třeba ovládat pouze rychlost a směr otáčení každého kola při zachování obdobné pohyblivosti. Nicméně všesměrová kola mají poměrně složitou konstrukci s ložisky v každém válci a jsou tím pádem více náchylná na čistotu prostředí než klasická kola.

#### Diferenciální pohon

Využití diferenciálního pohonu by oproti předchozím řešením znamenalo opět další zjednodušení ovládací elektroniky vozidla. Pohon v tomto případě zajišťují pouze dva neotočně upevněné motory, a tak stačí pro řízení vozíku ovládat pouze jejich rychlost a směr otáčení. Dynamika a pohyblivost se tedy oproti předchozím případům sice sníží, ale stále zůstanou na uspokojivé úrovni.

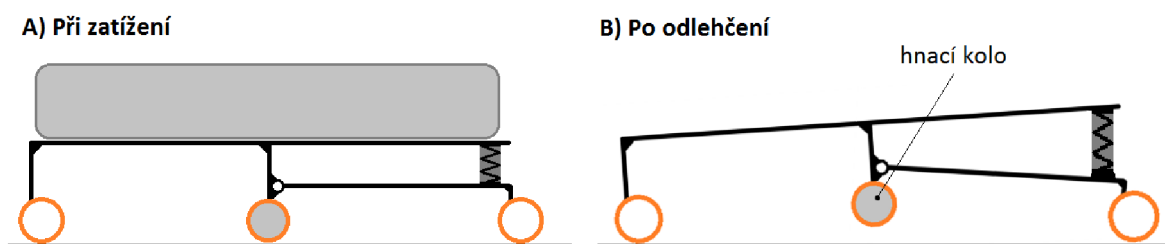
Kvůli potřebě otáčení kolem středové osy byla zvolena koncepce s hnacími koly uprostřed. Pro zajištění potřebné stability budou využity 4 otočná kolečka, každé v jednom rohu vozíku. Manévrovatelnost i stabilita této konfigurace je tedy pro naše využití dostatečná a **pohon navrhovaného vozíku bude řešen tímto způsobem.**

## 3.2 Návrh vyrovnávání

Protože základová deska domu, po které by měl náš vozík jezdit nemusí být úplně rovná, je třeba vyřešit vyrovnávání nerovností. Tyto nerovnosti mohou být jak výrazné (úloemek stavebního materiálu, kámen), tak i plynulého rázu (prohlubeň, vrchol, atd.). Rozsah vyrovnávání budeme volit 15mm. Vyrovnávání by u některých koncepcí pohonu nebylo potřebné (např. při využití 3 kol). Námí zvolená koncepce pohonu avšak využívá kol 6, z nichž 2 jsou hnací a umístěná ve středu konstrukce a 4 otočná umístěná v rozích. Díky tomuto rozvržení by při tuhém rámu došlo při najetí na nerovnost ke zvednutí některých z kol, a tím i ke ztrátě jejich trakce. Cílem vyrovnávání je tedy zajištění trakce obou hnacích kol a stability celé soupravy. Jelikož mohou být nerovnosti pouze v jednom bodě, je třeba zajistit nezávislost obou stran vyrovnávací konstrukce.

### 3.2.1 Vyrovnávání pružinami

Prvním návrhem vyrovnávání byl způsob využívající 4 pevná kola a dvě pohyblivá, odpružená pružinami. Tento způsob by tedy podstatně závisel na správné tuhosti pružin, protože při nedostatečné tuhosti by celá souprava mohla ztratit stabilitu. Při vyšší tuhosti by naopak mohlo dojít k vyždvižení a ztrátě trakce hnaného kola i na dokonale rovném povrchu.



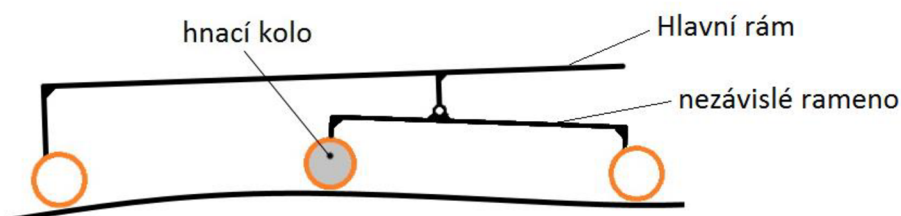
Obr. 15 Schéma vyrovnávání pružinami

Zásadní nevýhodou je pro tento návrh to, že je schopný správně pracovat pouze při plném zatížení. Vozík se ale bude přemísťovat i sám, takže pružiny navržené pro plné zatížení by nyní byly stlačovány pouze tíhou vozíku. Tuhost pružin ale zůstane stejná, z tohoto důvodu by pružiny vytlačily vyrovnávací ramena do krajní pozice a tím by znemožnily kontakt hnacích kol s podložkou.(Obr. 15 -B) Tento způsob vyrovnávání je tedy pro náš návrh nevhodný.

### 3.2.2 Vyrovnávání pomocí ramen

Inspirací pro finální návrh se stalo řešení přepravního robota KMP 1500-S diffDrive od společnosti KUKA Deutschland GmbH. [15]

Tento robotický vozík využívá vyrovnávání nezávislými rameny. Dvě otočná kolečka jsou pevně přichycena k hlavnímu rámu vozíku. Na tomto vrchním rámu je umístěno zatížení, které se přes čep přenáší také na dvě na sobě nezávislá ramena. Každé z ramen má na jedné straně upevněno otočné kolo a na straně druhé kolo hnací. Mezi nimi je umístěn otočný čep, kterým je rameno otočně přichyceno k hlavnímu rámu. Umístěním otočného čepu blíže k pohonu bude mít za následek větší zatížení hnacího kola, a tím pádem i vyšší trakci.



Obr. 16 Schéma vyrovnávání rameny

Tento způsob byl zvolen díky jeho jednoduchému a efektnímu řešení. Jeho podstatnou výhodou je nezávislost ramen, která zajistí kontakt všech kol s podložkou při přejíždění bodových i plynulých nerovností. Dále pak tento způsob není závislý na velikosti zatížení a je tak schopen fungovat i při jízdě samotného vozíku.

### 3.3 Výběr pohonu

Požadavky na potřebný druh pohonu vyplývají ze zvolené konfigurace podvozku. Pro diferenciální pohon je třeba vybrat systém pro upevnění přímo k rámu bez možnosti zatačení. Tento pohon musí mít kompaktní rozměry kvůli omezenému prostoru pod tiskárnou. Dále pak musí zvládat celkovou hmotnost vozidla i s tiskárnou. Kvůli pohonu na baterie je třeba, aby byl jeho motor stejnosměrný a ideálně na 12 nebo 24V. Dalším předpokladem je odolnost proti prachu a stékající vodě. Výkon musí být dostatečný pro pohyb celé soustavy.

### Výpočet nosnosti hnacího kola:

Pro výpočet využijeme okrajové situace, kdy celá váha soustavy spočívá na obou hnacích kolech.

Hmotnost podvozku (přibližná) –  $m_{vp} = 100kg$

Počet Hnacích kol –  $n_h = 2$

$$Nosnost = \frac{m_t + m_{vp}}{n_h} = \frac{900 + 100}{2} = 500kg \quad (1)$$



Obr. 17 Pohonná jednotka Wheelmax [16]



Obr. 18 Pohonná jednotka Maxon MW 500 [17]

Podle těchto požadavků byl vybrán pohon od firmy Maxon motor ag (dále jen Maxon). Konkrétně se jedná o jejich systém pohonu s označením MW 500 (Obr. 18). Tento pohon splňuje všechny požadavky a navíc oproti pohonům konkurenčních firem, které jsou konstruovány pro zatížení 1000 lbs (cca 453,6 kg) [18], je vhodný pro zatížení do 500 kg. Dalším důvodem pro výběr právě tohoto pohonu jsou jeho kompaktní rozměry. Největší průměr (průměr kola) je 160 mm a celková šířka je  $142 \pm 0,75$  mm. Z tohoto důvodu nebude obtížné ho začlenit do konstrukce podvozku. Výhodou je rovněž jeho upevnění. To se provádí na plochu kolmou k ose jeho otáčení pomocí 7 šroubů velikosti M8. Oproti pohonným jednotkám s uchycením na plochu nad kolem (Obr. 17) toto upevnění znamená snížení těžiště celé sestavy. Výrobce uvádí stupeň krytí IP 54, což znamená částečnou ochranu před prachem a ochranu proti stříkající vodě z každého směru [19]. [17]

Technické specifikace Maxon MW 500		
	jednotka	hodnota
Max. radiální zatížení	kg	500
Jmenovité otáčky při daném napětí	1/min	20 - 290
Jmenovité napětí	V (DC)	12 - 60
Jmenovitý proud (max. proud)	A	12,1 - 3,28
Jmenovitý krouticí moment kola (max. průběžný moment)	Nm	8,5 - 27
Maximální krouticí moment (< 5s)	Nm	70
Stupeň krytí	IP	54 (65/67)
Provozní teplota	°C	0 ... +50
Hmotnost	kg	6
Životnost	h	10000
Průměr kola	mm	160
Šířka běhounu kola	mm	50
Brzdící moment při 24V	Nm	až 110
Sběrnice	bus	CANopen a etherCAT

Obr. 19 Technické údaje pohonné jednotky Maxon MW 500 [17]

### 3.4 Výběr otočných koleček

Technické specifikace BS Rollen S100.C10.100		
Průměr kola	mm	100
Šířka běhounu kola	mm	2x38
Nosnost	kg	590
Stavební výška	mm	145
Velikost desky	mm	138x110
Rozteč otvorů	mm	105x75/80
Průměr otvorů	mm	11
Vystředění	mm	35

Obr. 20 Technické údaje otočného kolečka S100.C10.100[21]



Obr. 21 otočné kolečko S100.C10.100 [20]

Výběr otočných koleček probíhal v katalogu firmy BS Rollen GmbH [21]. Hlavním požadavkem pro výběr otočných koleček byla kromě *nosnosti* také jejich stavební výška, která by neměla z konstrukčních důvodů přesáhnout průměr pohonného kola. Tato výška ale roste úměrně s nosností.



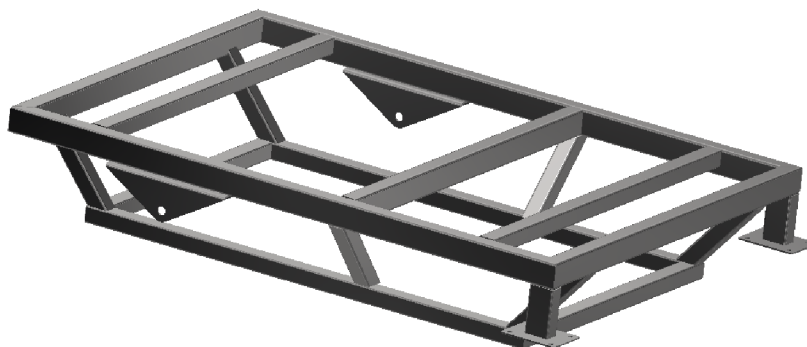
Při použití otočného kolečka s jedním kolem (typ: RR100.B90.150) by to při nosnosti 550 kg znamenalo stavební výšku 195 mm, což převyšuje průměr hnaného kola (160 mm [17]). Z tohoto důvodu bylo zvoleno otočné kolečko s dvojitým kolem, které při nosnosti 590kg má stavební výšku pouze 145 mm. Materiál kola samotného je litina s běhounem z litého polyuretanu o tvrdosti  $95 \pm 3$  Shore A. Otáčení kolečka zajišťují dvě valivá ložiska, hlavní axiální kuličkové ložisko a spodní kuželíkové. [21]

## 3.5 Rám

### 3.5.1 Hlavní rám

Podle zvolené konfigurace, prostorových a konstrukčních požadavků byl vytvořen rám vozíku. Vůli vozíku vůči nohám tiskárny budeme volit 25mm na každé straně. Tato vůle bude nutná pro snadné vjíždění podvozku do přepravní pozice.

Rám bude vytvořen z plechových dílů, čtvercových a obdélníkových trubek. Pro jednoduchost byly pro celou konstrukci zvoleny pouze dva rozměry profilů 40x40x2,5 a 60x40x3. Velikost a pozice profilů byly určeny testováním rámu metodou konečných prvků. Po několika iteracích byl vytvořen následující rám.



Obr. 22 Základní rám



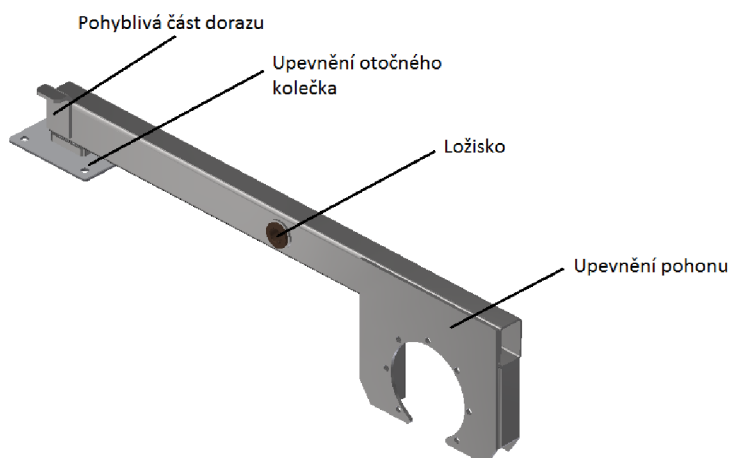
Obr. 23 Základní rám - boční pohled



Hlavní rám se dá rozdělit do třech částí. Horní část se skládá z vnějšího obdélníku, příčné vzpěry a prutů pro upevnění otočných koleček. Tyto díly jsou vyrobeny z profilů 60x40x3. Druhou částí jsou díly z profilů 40x40x2,5, konkrétně spodní rám pro upevnění řídicí elektroniky, výztuže pod dosedací plechy a spojovací výztuže. Poslední jsou plechové díly, tedy pevné části závěsů a plechy pro uchycení koleček. K plechovým dílům se také řadí dosedací plechy, držáky laserových radarů a pevné části dorazů.

### 3.5.2 Ramena

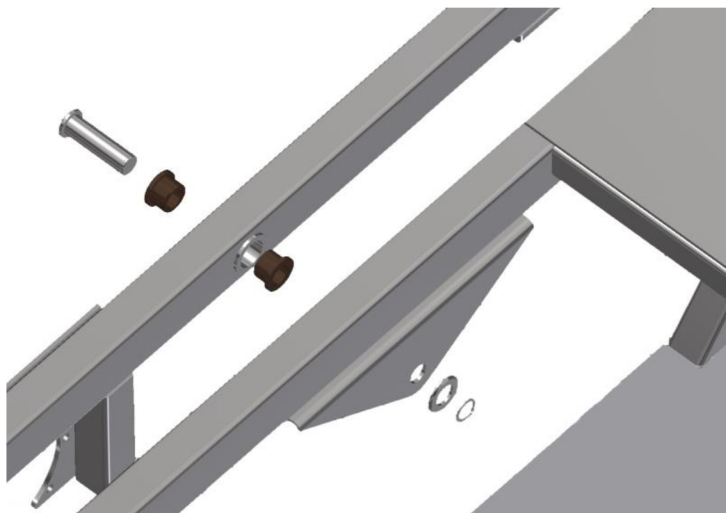
Ramena byla vytvořena ze stejných profilů, jako hlavní rám. Tvar ramene byl určen uchycením pohonu a umístěním otočného kolečka. Mezi nimi budou blíže k pohonu umístěna ložiska otočného čepu. Základem ramene je profil 60x40x3. Na něj bude přivařeno upevnění pohonu s výztuhami z profilů 40x40x2,5. Druhá strana bude opatřena upevněním otočného kolečka a také pohyblivou částí dorazu. Ve vzdálenosti 3/5 délky celého profilu od otočného kolečka bude vevařeno pouzdro pro dvě kluzná ložiska.



Obr. 24 Části pravého ramene

### 3.5.3 Otočný mechanismus

Hlavní rám a jednotlivá ramena otočně spojuje čep o průměru 20 mm. Proti vysunutí je zajištěn pojistným kroužkem. Otáčení každého z ramen je zajištěno dvěma odpovídajícími kluznými ložisky SKF - PBMF 202820 M1G1 [22].



Obr. 25 Explodovaný pohled otočného mechanismu

### 3.5.4 Doraz

Kvůli omezení rozsahu pohybu ramene bude na konci ramene nad otočným kolečkem umístěn doraz. Tento doraz bude mít nastavitelný rozsah šrouby M8.



Obr. 26 Detail nastavitelného dorazu

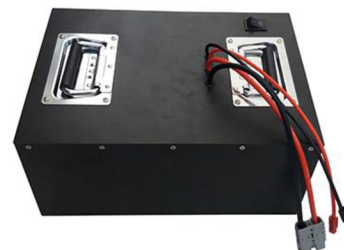
### 3.5.5 Rozmístění řídicí elektroniky

#### Baterie

Výrobce: Shenzhen Polinovel Technology Co., Ltd.

Typ: AGV2460 [23]

Pro zvýšení dojezdu vozíku budou použity dvě tyto baterie. Společná kapacita těchto dvou baterií bude 120 Ah při napětí 24V.



Obr. 27 Baterie AGV2460 [23]

#### PLC

Výrobce: B&R Industrial Automation GmbH

Typ: 5PC910.SX01-00 [24]



Obr. 28 PLC 5PC910.SX01-00 [24]

#### Laserový radar (LIDAR)

Výrobce: SICK AG

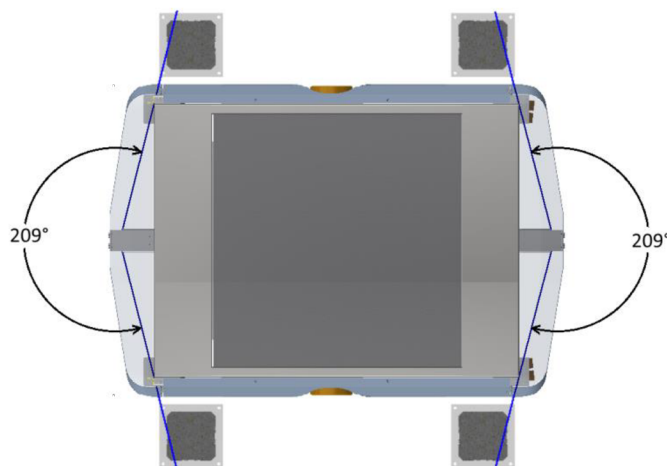
Typ: TIM781-2174101 [25]



Obr. 29 Upevnění LIDARu

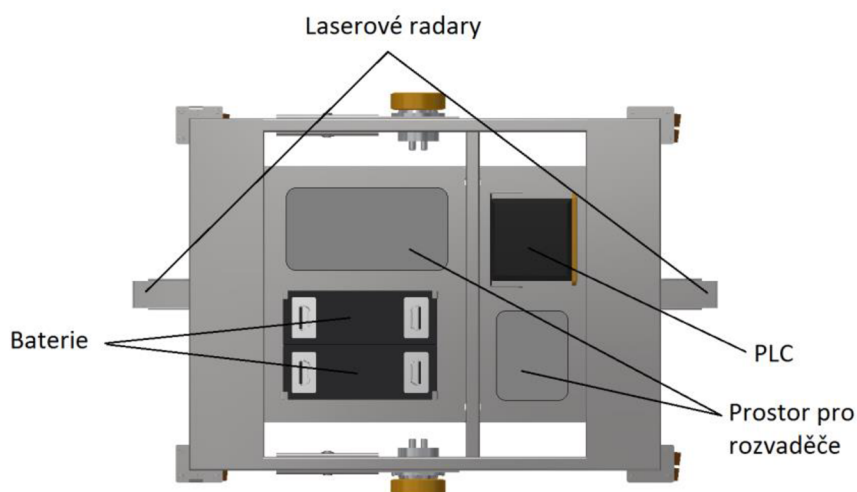
Pro řízení vozíku budou kvůli vybočování při zatačení využity dva Lidary umístěné na obou jeho stranách. Upevnění je vyřešeno ohýbaným plechovým držákem, přivařeným k hlavnímu rámu. Ten bude sloužit pro upevnění jak laserového radaru, tak i čelních krytů vozíku. Pracovní rozsah udávaný výrobcem je 270° [25]. Tato hodnota se ale omezila jeho umístěním v sestavě.

Výsledný pracovní rozsah (Obr. 30) byl volen tak, aby v převozní pozici mohl vozík vidět na nohy tiskového robota a přesněji se podle nich zorientovat. Tento rozsah se dá jemně doladit použitím oválných upevňovacích otvorů v držáku.



Obr. 30 Pracovní rozsah LIDARů

Předběžné rozmístění hlavních elektronických komponent je znázorněno na Obr. 31. Jejich pozice byly zvoleny s ohledem na vyvážení celé sestavy. Provoz vozíku bude ale vyžadovat ještě další elektronické komponenty, pro jejichž umístění je zde vytvořen dostatečný prostor. Při finálním zapojení rovněž může dojít ke změně pozicí elektronických komponent. Proto se jedná pouze o návrh, který může být snadno pozměněn. Pro každou z komponent bylo také vytvořeno vhodné upevnění z ohýbaných plechů. Základní plocha pro elektroniku musí být z důvodů instalace vyrobena ze dvou kusů, a tak je na jedné z nich vytvořen lem, kde se jednotlivé díly spojí.



Obr. 31 Rozvržení řídicí elektroniky uvnitř vozíku

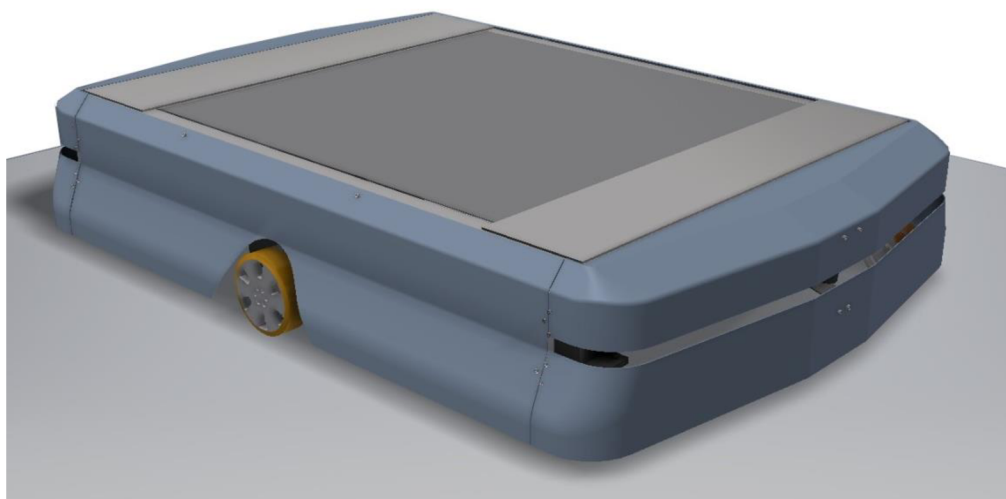
### 3.6 Výsledná konstrukce vozíku



Obr. 32 Finální sestava vozíku

#### Kryt

Pro esteticky příjemnější dojem z vozíku a ochranu elektronických součástí před vnějšími zásahy a vlivy byl celý vozík opatřen zakrytováním. Jeho čelní část je rozdělena na dva díly mezerou 25mm určenou pro výhled laserového radaru. Kvůli ochraně před kolizemi s podložkou byl od ní kryt odsazen o 30mm. Celý tento kryt je navrhnut tak, aby byl přišroubován pouze k pevné části rámu. Proto nebylo nutné řešit jeho pohyblivost současně s rameny vozíku a následné omezování výhledu Lidaru při přejíždění nerovností.



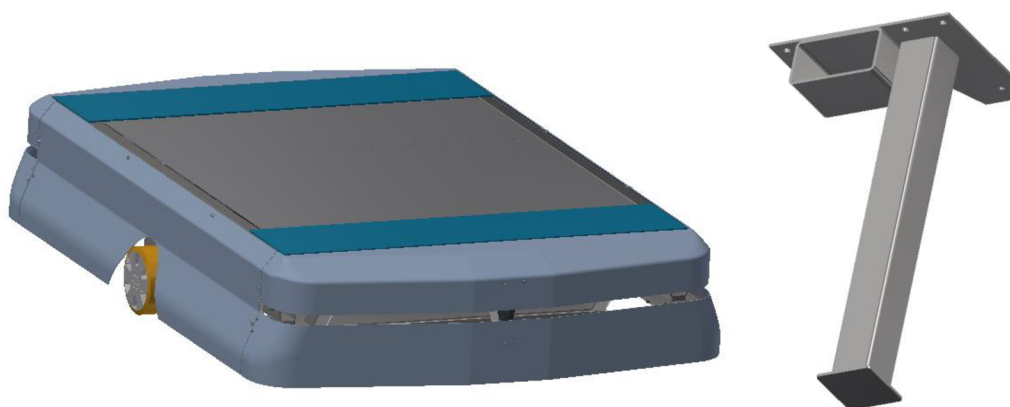
Obr. 33 Zakrytovaný vozík

### 3.7 Kontaktní systém

Protože zrychlení vozíku se zatížením nebude veliké, lze předpokládat, že už samotné *tření zabrání tiskárně v posouvání*. To bude výhodné i z hlediska dosednutí, kdy nebude třeba navádět kontaktní prvky vůči sobě s vysokou přesností.

#### Vozík

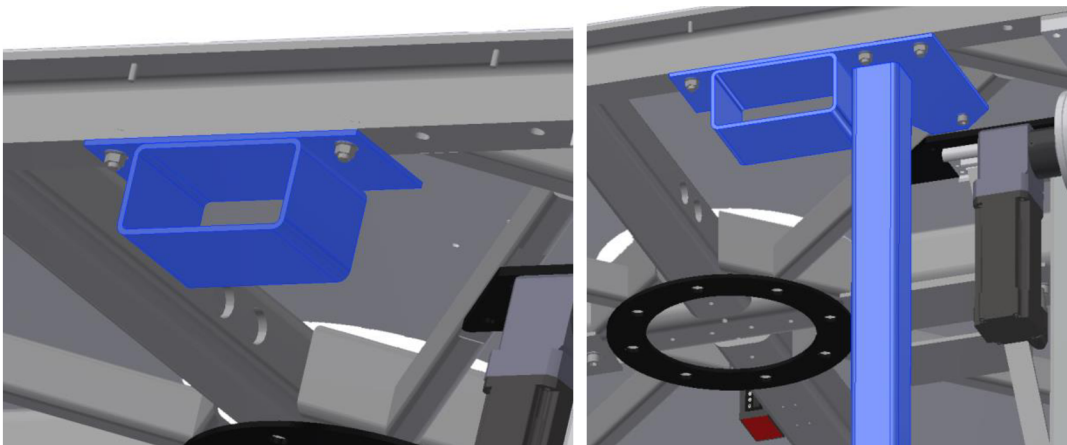
Kontaktní systém vozíku budou tvořit dvě vyztužené plochy (Obr. 34). Na ty dosedne tiskárna přepravními nohami připevněnými k jejímu základnímu rámu.



Obr. 34 Dosedací plochy vozíku (zvýrazněny modře) a pravá přepravní noha tiskárny

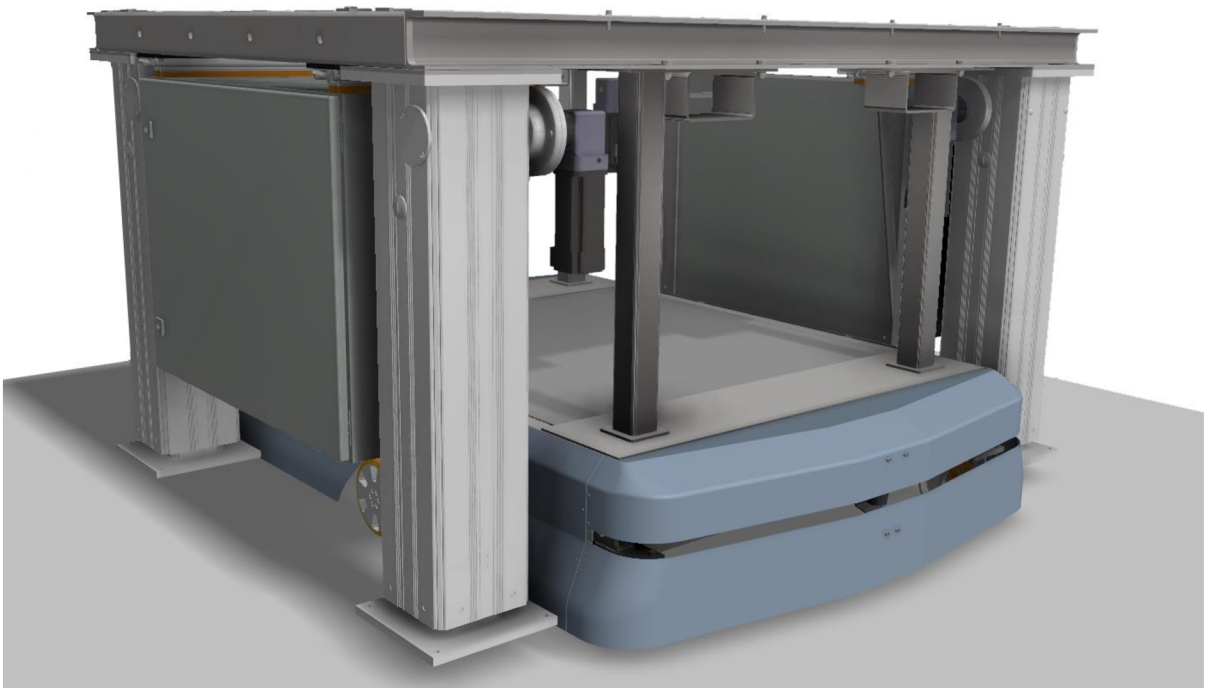
#### Tiskárna

Pro upevnění přepravních nohou tiskárny budou upraveny krajové kapsy pro převoz pomocí VZV. Ty byly vybrány z důvodu jejich vhodného umístění v každém rohu a prostoru kolem nich. Navíc jsou k rámu přišroubovány, takže nohy bude snadné v případě potřeby odmontovat nebo vyměnit. Původní kapsy jsou uchycené dvěma šrouby M10 na jedné straně, což vyhovuje pro zvedání pomocí VZV, přepravní nohy by ale při akceleraci vytvářely kroutící moment na základní plotnu nohy. Ta bude tedy pro zvýšení torzní tuhosti prodloužena až na příčnou vzpěru rámu tiskárny. Upevnění každé z nohou bude provedeno skrz již vytvořené díry pro šrouby M10 a navíc jedním šroubem M8 v zadní části. Jedinou úpravou stávajícího rámu tiskárny tedy bude vytvoření 4 závitových děr příčných vzpěr právě pro tyto šrouby M8. Profil prutu nohy bude 70x70x3 s čtvercovou dosedací plochou o straně 100 mm, která bude sloužit pro rovnoměrnější rozložení zatížení.



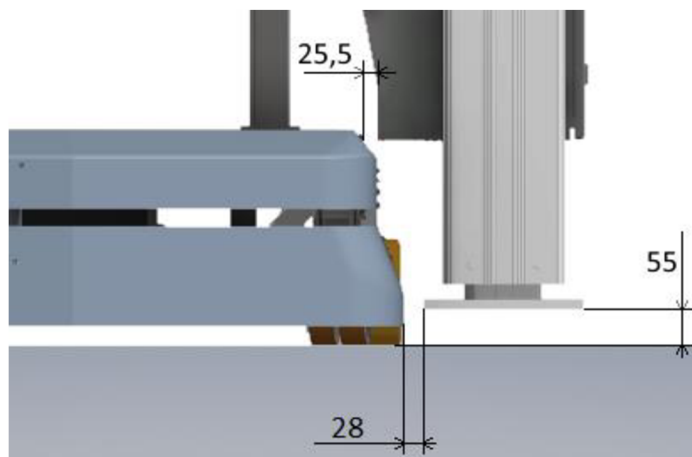
Obr. 35 Detail původních (Autor: Tomáš Petr) a upravených kapes pro VZV

### Pohled na vozík s rámem tiskárny v převozní pozici



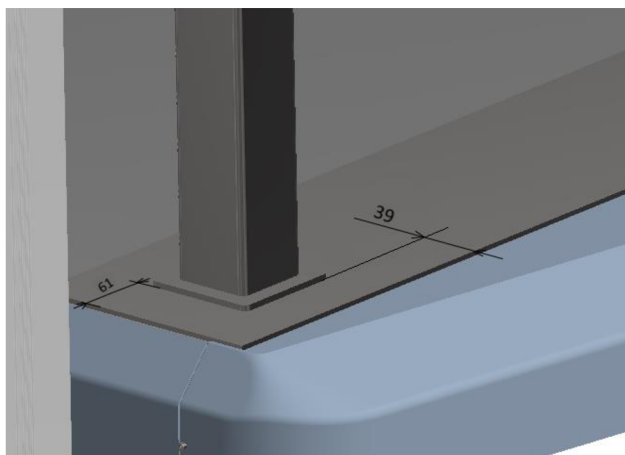
Obr. 36 Tiskárna s vozíkem

## Převozní vůle



Obr. 37 Čelní vůle vozíku a tiskového robota

Tyto rozměry jsou samozřejmě oboustranné, a tak je celková vůle dvojnásobná než na uvedených obrázcích. Čelní vůle se zároveň zvětší, pokud tiskový robot stojí na vlastních nohách v předtransportní poloze. Elektrické rozvaděče, které tento prostor částečně omezují, poté budou z dosahu a vozík se tak bude při najíždění na pozici muset vyhnout pouze nohám robota. Tyto rozvaděče jsou zároveň upevněny na kolejnicích a lze s nimi v případě nutnosti volně posouvat, nicméně konstrukce vozíku byla navržena pro jejich krajní pozici.



Obr. 38 Vůle nohy vůči krajům desky

Podélná vůle desky není ničím omezená, a tak byl její rozměr oproti čelní vůli zvětšen. Toto zvětšení poskytne dostatečný podpůrný prostor i při případném šikmém dosednutí tiskárny na převozní plochu.

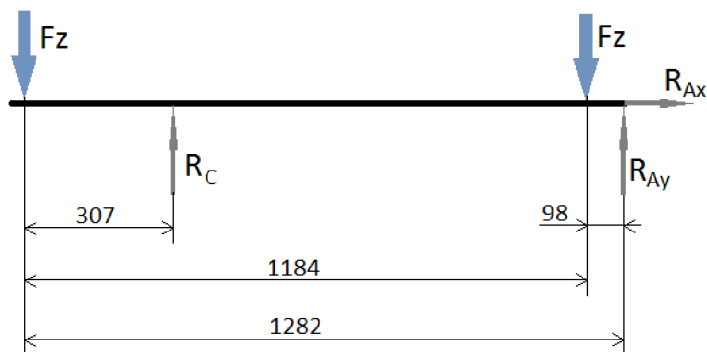


## 4 Pevnostní kontrola

Určení reakčních sil:

Počet kontaktních bodů –  $n_K = 4$

Gravitační zrychlení –  $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$



Obr. 39 Schéma rovnováhy sil

$F_Z$  - Zatěžující síla,  $R_C$  - Reakce v čepu,  $R_{Ax}$ ,  $R_{Ay}$  - Reakce v otočném kole A

$$F_Z = \frac{(m_t + m_{vp}) \cdot g \cdot k}{n_K} = \frac{(900 + 150) \cdot 9,81 \cdot 2}{4} = 4905 \text{ N} \quad (2)$$

$$R_{Ax} = 0 \quad (3)$$

$$R_C = \frac{F_Z \cdot (0,098 + 1,282)}{0,975} = \frac{4905 \cdot (0,098 + 1,282)}{0,975} = 6942,5 \text{ N} \quad (4)$$

$$R_{Ay} = 2 \cdot F_Z - R_C = 2 \cdot 4905 - 6942,5 = 2867,5 \text{ N} \quad (5)$$

### Kontrola na otláčení otočného spojení

Dovolený tlak v ložisku –  $K_0 = 45 \text{ MPa}$  [22]

Šířka ložiska –  $B_l = 20 \text{ mm}$  [22]

Průměr čepu –  $d = 20 \text{ mm}$

Počet ložisek ramene –  $n_l = 2$

Tloušťka plechu –  $t_p = 4 \text{ mm}$

Dovolený tlak v plechu –  $p_{Dov} = 30 - 110 \text{ MPa}$  [28]

$$p_l = \frac{R_C}{d \cdot B_l \cdot n_l} = \frac{6942,5}{20 \cdot 20 \cdot 2} = 8,68 \text{ MPa} < K_0 \quad \text{Vyhovuje} \quad (6)$$

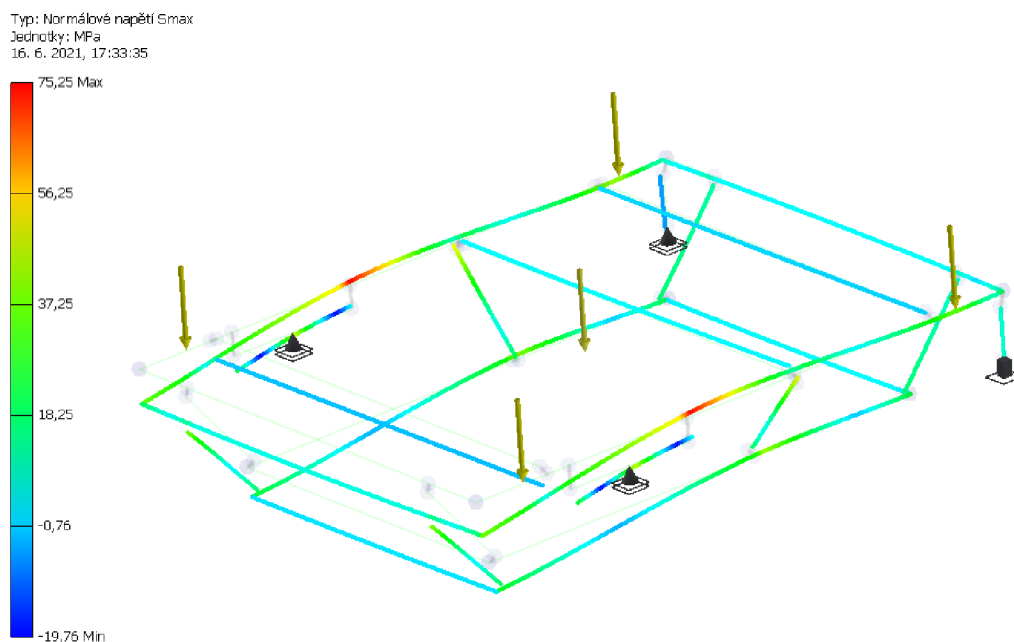
$$p_p = \frac{R_c}{d * t_p * 2} = \frac{6942,5}{20 * 4 * 2} = 43,39 \text{ MPa} < p_{DOV} \quad \text{Vyhovuje} \quad (7)$$

## 4.1 Simulace zatížení vybraných dílů

Pevnostní kontrola byla provedena metodou konečných prvků v programu Autodesk Inventor Professional 2019. Kvůli optimalizaci většiny navrhovaných dílů byla tato kontrola provedena již při jejich tvorbě. Materiál použitých profilů a plechů je podle dodavatele S235JR [26]. Tento materiál má zaručenou svařitelnost a minimální mez kluzu  $R_{eH} = 235 \text{ MPa}$ . [27]

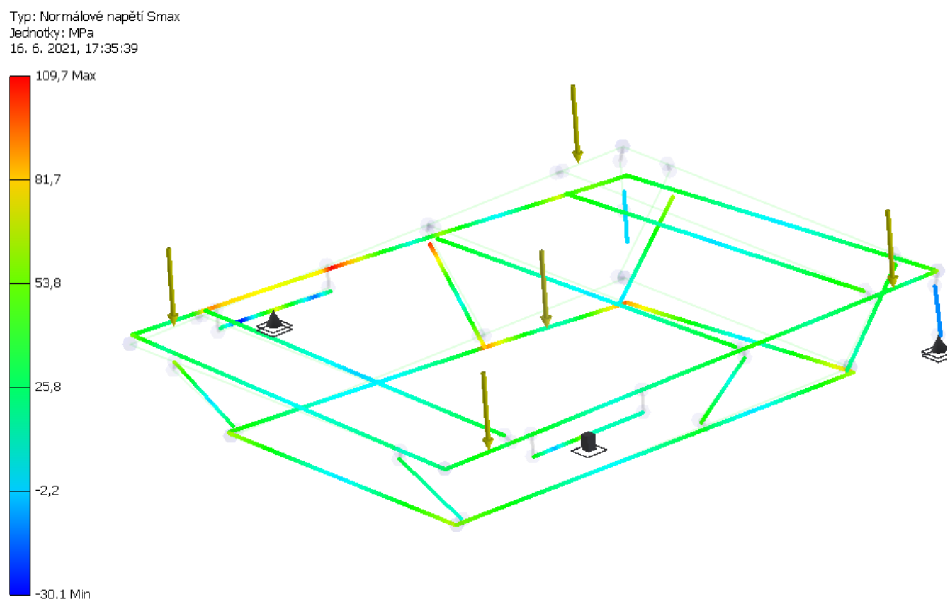
### 4.1.1 Zatížení Hlavního rámu

Hlavní rám byl zatížen vlastní tíhou a silami  $F_z$  v místech, kde budou při převozu umístěny nohy tiskárny. Kontrola byla nejdříve provedena pro dokonale rovnou desku a poté pro dvě možné okrajové situace o třech opěrných bodech.



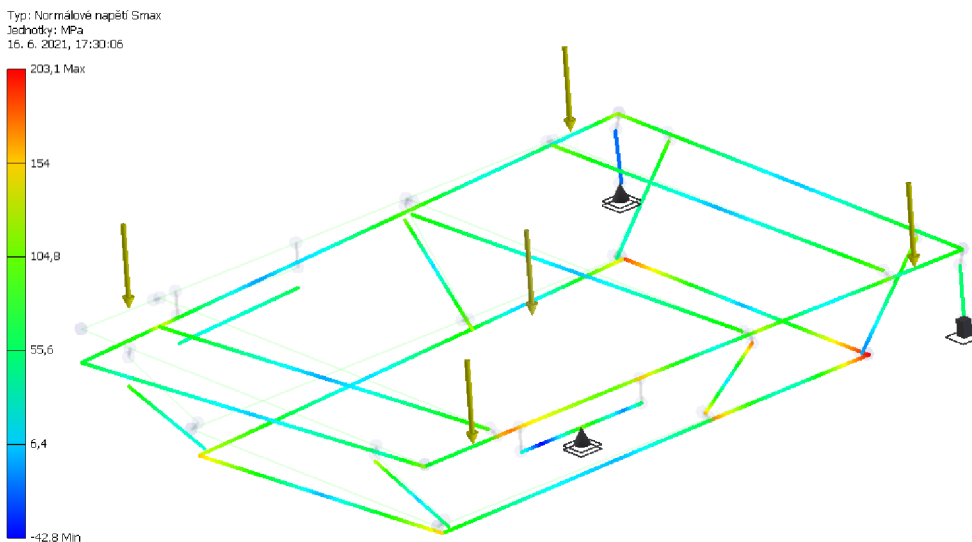
Obr. 40 Simulace hlavního rámu - 4 opěrné body (zobrazeny černě)

Simulace pro dokonale rovnou podložku byla provedena uchycením rámu v místech všech podpor. Čepy byly nahrazeny otočnými podporami, což nejpřesněji odpovídá skutečnému uchycení.



**Obr. 41 Okrajová situace 1 - chybějící opěrný bod otočného kola**

V tomto případě došlo k odebrání podpory prutu otočného kola. Při zachování pevné podpory v druhém prutu otočného kola by došlo k jeho namáhání ohybem, což neodpovídá skutečnému zatížení. Pevná podpora byla tedy přesunuta do místa čepu a bylo tak dosaženo přesnějšího výsledku simulace.

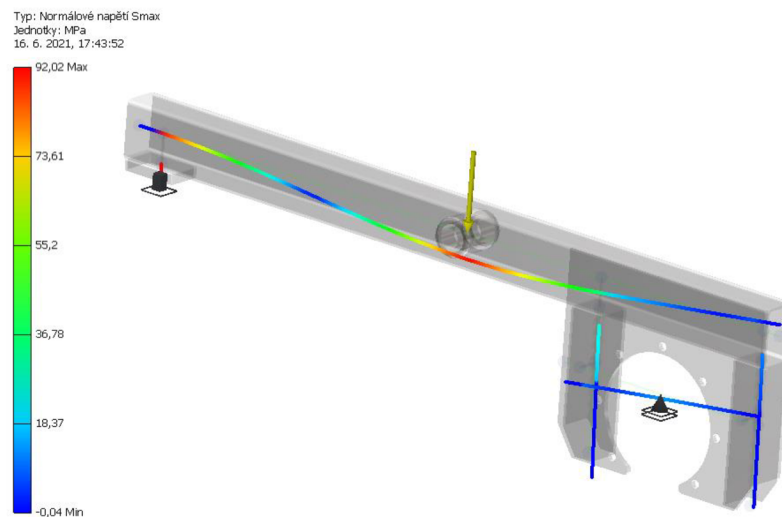


**Obr. 42 Okrajová situace 2 - chybějící opěrný bod čepu**

Nejvyšší napětí materiálu rámu bude v případě, že otočný čep a tím pádem i jedno z ramen úplně ztratí kontakt s podložkou. K této situaci by mohlo dojít pouze ojediněle, avšak je nyní zřejmé, že ani tehdy nedojde k překročení meze kluzu.

### 4.1.2 Zatížení ramene

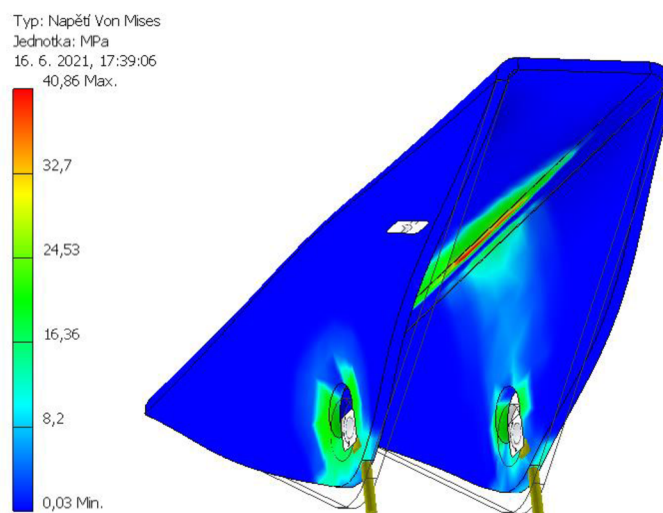
Rameno bylo zatíženo silou  $R_C$  v místě čepu s opěrnými body ve středu pohonu a v místě upevnění otočného kolečka. Maximální napětí v rameni je podle simulace zřetelně nižší než mez kluzu materiálu. Rameno tedy vyhovuje.



Obr. 43 Simulace zatížení ramene

### 4.1.3 Zatížení závěsu

Pevná část závěsu byla pro simulaci upevněna jako při umístění v sestavě. Pevná vazba na čelní ploše, díra pro čep byla zajištěna proti axiálnímu posunutí a bylo na ní aplikováno zatížení  $R_C$ .



Obr. 44 Simulace zatížení závěsu

## 5 Závěr

Cílem této práce bylo navržení konceptu manipulačního podvozku pro převoz modelu tiskového robota.

Práce se nejprve v teoretické části zabývala různými druhy 3D tiskáren používaných ve stavebnictví a rozdílů v jejich použití. Po seznámení s projektem 3D-STAR a se samotným principem manipulačního podvozku byly definovány požadavky pro jeho funkci. Následně se tato práce zaměřila na různé druhy AGV, včetně jejich funkcí a konfigurací pohonu.

Z výčtu možných konfigurací byl po zvážení všech pro a proti vybrán diferenciální pohon. Tento pohon si i přes jeho relativně jednoduchý způsob řízení vyžadoval jistá konstrukční opatření plynoucí hlavně z nutnosti vyrovnávání nerovností. Tohoto vyrovnávání bylo dosaženo konstrukcí s dvěma otočně upevněnými nezávislými rameny. Po zvážení všech rozměrových omezení plynoucí z principu funkce vozíku byl navrhnout rám z plechových dílů a normovaných ocelových profilů čtvercového a obdélníkového průřezu. Omezenému prostoru se podařilo vyhovět s potřebnými manévrovacími vůlemi i při použití krytu vozíku. Ve všech kritériích konstrukce byla upřednostněna jednoduchost. Jak z hlediska řízení, tak i z hlediska vyrobitelnosti jednotlivých dílů.

Jako kontaktní systém byly zvoleny nohy přišroubované k hlavnímu rámu tiskového robota. Tyto nohy budou sjednoceny s kapsami pro VZV a úpravy rámu tak budou spočívat pouze ve vytvoření čtyř nových závitových děr.

V pevnostní kontrole bylo metodou konečných prvků vyzkoušeno napětí jednotlivých dílů vozíku. Ze simulací vyplynulo, že všechny zkoušené díly vyhověly a mez kluzu nebyla překročena ani v okrajových situacích.

Součástí této práce jsou rovněž vybrané výkresy dílů a sestav manipulačního podvozku.

Kompletní realizace tohoto návrhu probíhala v programu Autodesk Inventor Professional 2019.

## Použitá literatura

- [1] 3D printing in construction. *Designing Buildings Wiki* [online]. [cit. 8.6.2021]. Dostupné z: [https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/3D\\_printing\\_in\\_construction](https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/3D_printing_in_construction)
- [2] CRUMP, S. Scott. *Apparatus and method for creating three-dimensional objects*. USA. US5121329A. 30.10.1989.
- [3] COBOD International A/S: *KampC Finished building* [online]. [cit. 8.6.2021]. Dostupné z: <https://cobod.com/wp-content/uploads/2020/10/Finished-building-2048x1152.jpg>
- [4] OFROOM. *BauMinator®* [online]. [cit. 8.6.2021]. Dostupné z: [https://www.bauhandwerk.de/artikel/bhw\\_3D-Druck\\_mit\\_Beton\\_3060818.html](https://www.bauhandwerk.de/artikel/bhw_3D-Druck_mit_Beton_3060818.html)
- [5] 3D STAR: *kostel Neratovice* [online]. [cit. 8.6.2021]. Dostupné z: <http://3dstar.tul.cz/aktuality/id:4435/studie-postupneho-tisku->
- [6] COBOD International A/S. *Gantry versus robotic arm based 3D construction printers* [online]. [cit. 8.6.2021]. Dostupné z: <https://cobod.com/gantry-versus-robotic-arm-systems/>
- [7] SUCHOMEL, Jiří a BUREŠ, Vladislav. *Postupný tisk stavebních konstrukcí na staveništi* [online]. [cit. 8.6.2021]. Dostupné z: [http://3dstar.tul.cz/getFile/id:4325/Postupný\\_tisk\\_fin+obr.pdf](http://3dstar.tul.cz/getFile/id:4325/Postupný_tisk_fin+obr.pdf)
- [8] SEDLÁČEK, Karel. Robot Con4DBot bude tisknout domy. *Technický týdeník* [online]. 2020 [cit. 8.6.2021]. Dostupné z: [https://www.technickytydenik.cz/rubriky/denni-zpravodajstvi/robot-con4dbot-bude-tisknout-domy\\_51258.html](https://www.technickytydenik.cz/rubriky/denni-zpravodajstvi/robot-con4dbot-bude-tisknout-domy_51258.html)
- [9] HOMAG Group AG. *TRANSBOT* [online]. [cit. 8.6.2021]. Dostupné z: <https://www.homag.com/en/product-detail/automated-guided-vehicle-system-transbot>
- [10] MAXAGV. *FX20: compact counterbalance* [online]. [cit. 8.6.2021]. Dostupné z: <https://maxagv.com/project-item/fx20-compact-counterbalance/>
- [11] Automated guided vehicle. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 8.6.2021]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Automated\\_guided\\_vehicle](https://en.wikipedia.org/wiki/Automated_guided_vehicle)
- [12] Imetron GmbH. *Close up of a Mecanum-Wheel* [online]. [cit. 8.6.2021]. Dostupné z: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a2/Mecanum-Rad.png>
- [13] Mrmw. *Mecanum wheel control principle* [online]. [cit. 8.6.2021]. Dostupné z: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mecanum\\_wheel\\_control\\_principle.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mecanum_wheel_control_principle.svg)

- [14] Mecanum wheel. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 8.6.2021]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Mecanum\\_wheel](https://en.wikipedia.org/wiki/Mecanum_wheel)
- [15] KUKA Deutschland GmbH. *KMP 1500* [online]. [cit. 8.6.2021]. Dostupné z: <https://www.kuka.com/en-us/products/mobility/mobile-platforms/kmp-1500>
- [16] ALLIED MOTION TECHNOLOGIES, Inc. *Vehical electric traction* [online]. [cit. 8.6.2021]. Dostupné z: <https://www.alliedmotion.com/wp-content/uploads/products/traction.png>
- [17] MAXON group ag: *Flyer maxon wheel drive MW500 EN* [online]. [cit. 8.6.2021]. Dostupné z: [https://www.maxongroup.com/medias/sys\\_master/root/8880995303454/Flyer-maxon-wheel-drive-MW500-EN-December-2020.pdf](https://www.maxongroup.com/medias/sys_master/root/8880995303454/Flyer-maxon-wheel-drive-MW500-EN-December-2020.pdf)
- [18] ALLIED MOTION TECHNOLOGIES Inc. *WheelMax™* [online]. [cit. 8.6.2021]. Dostupné z: <https://www.alliedmotion.com/vehicle-steering-traction/traction/wheelmax-integrated-wheel-assemblies/>
- [19] Stupeň krytí. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 8.6.2021]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Stupe%C5%88\\_kryt%C3%AD](https://cs.wikipedia.org/wiki/Stupe%C5%88_kryt%C3%AD)
- [20] BS Rollen GmbH: *Heavy duty dual castor S100\_C10* [online]. [cit. 8.6.2021]. Dostupné z: [https://www.bs-rollen.de/uploads/tx\\_visbsrollenproducts/products/kap7/S100\\_C10.jpg](https://www.bs-rollen.de/uploads/tx_visbsrollenproducts/products/kap7/S100_C10.jpg)
- [21] BS Rollen GmbH: *Heavy-duty transport castors* [online]. [cit. 8.6.2021]. Dostupné z: <https://www.bs-rollen.de/en/castors/heavy-duty-castors/>
- [22] AB SKF. *Bushings: PBMF 202820 MIG1* [online]. [cit. 10.6.2021]. Dostupné z: <https://www.skf.com/group/products/plain-bearings/bushings-thrust-washers-strips/bushings/productid-PBMF%20202820%20MIG1>
- [23] Shenzhen Polinovel Technology Co., Ltd. *24V 60Ah Lithium AGV Battery* [online]. [cit. 10.6.2021]. Dostupné z: <https://polinovel.com/product-item/lithium-battery-agv2460/>
- [24] B&R Industrial Automation GmbH. *Průmyslové počítače: Automation PC 910* [online]. [cit. 10.6.2021]. Dostupné z: <https://www.br-automation.com/cs/products/industrial-pcs/automation-pc-910/system-units/5pc910sx01-00/>
- [25] SICK AG. *2D LiDAR sensors TiM7xx* [online]. [cit. 10.6.2021]. Dostupné z: <https://www.sick.com/ag/en/detection-and-ranging-solutions/2d-lidar-sensors/tim7xx/tim781-2174101/p/p594148>
- [26] *Ferona, a.s.* [online]. [cit. 10.6.2021]. Dostupné z: <https://online.ferona.cz/>

[27] BOHDAN BOLZANO, s.r.o. *Přehled vlastností oceli S235JR* [online]. [cit. 10.6.2021]. Dostupné z: <https://bbolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/tycove-oceli-uhlikove-konstrukcni-a-legovane/nelegovane-konstrukcni-oceli-podle-en-10025/prehled-vlastnosti-oceli-s235jrdrive-s235jrg2>

[28] E-KONSTRUKTÉR. *Hodnoty mezi pevností, kluzu, únavy a dovolených napětí pro ocel* [online]. [cit. 10.6.2021]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/hodnoty-mezi-pevnosti-kluzu-unavy-a-dovolenych-napeti-pro-ocel>



## **Seznam příloh**

Výkres sestavy vozíku	- KVM-BP-313-01-00
Výkres hlavního rámu	- KVM-BP-313-02-00
Výkres pravého ramene	- KVM-BP-313-03-00
Výkres uchycení pohonu	- KVM-BP-313-03-01