



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav konstruování a částí strojů

**Návrh míchacího zařízení pro finální úpravu
stavební hmoty**

**Design of Concrete Mixer for Final
Treatment of Constructional Material**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2019

Jan WERDAN

Studijní program: N2301 STROJNÍ INŽENÝRSTVÍ
Studijní obor: 2301T047 Dopravní letadlová a transportní technika
Vedoucí práce: Ing. František Starý
Odborný konzultant: Ing. Marek Štádler

MÍSTO TÉTO STRÁNKY BUDE ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Prohlášení:

Prohlašuji, že svou diplomovou práci „Návrh míchacího zařízení pro finální úpravu stavební hmoty“ jsem zpracoval samostatně, pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních pramenů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne

Jan Werdan

Poděkování:

Rád bych zde poděkoval Ing. Františku Starému za vedení diplomové práce a za odborné rady a cenné připomínky při jejím vypracování. Dále bych rád poděkoval rodičům za podporu v celém průběhu mého studia.

Anotační list

Jméno autora:	Jan Werdan
Název DP:	Návrh míchacího zařízení pro finální úpravu stavební hmoty
Anglický název:	Design of Concrete mixer for Final Treatment of Constructional Material
Rok:	2019
Studijní program:	N2301 STROJNÍ INŽENÝRSTVÍ
Obor studia:	2301T047 Dopravní, letadlová a transportní technika
Ústav:	Ústav konstruování a částí strojů
Vedoucí DP:	Ing. František Starý
Konzultant:	Ing. Marek Štádler
Bibliografické údaje:	počet stran: 75 počet obrázků: 62 počet tabulek: 10 počet příloh: 2
Klíčová slova:	3D tisk budov, prototyp, objem, rychlost tisku, míchání, doprava, beton, konstrukce
Keywords:	3D printing of buildings, prototype, volume, printing speed, mixing, transportation, concrete, construction
Anotace:	Obsahem této diplomové práce je uvedení čtenáře do problematiky 3D tisku budov, dále pak první návrh prototypu míchacího zařízení pro finální úpravu stavební hmoty při aditivní metodě výstavby domů, včetně analýzy metodou konečných prvků, rozboru dopravní trasy pro toto zařízení a rešerše budoucích dodavatelů potřebných komponent. Objem zásobníku míchacího zařízení je 50 l , rychlost tisku $5\text{-}15\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$, délka dopravní trasy 50 m a maximální výška 12 m , hustota betonu $2350\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.
Abstract:	The topic of this diploma thesis is introduction of the reader to the topic of 3D printed buildings, next part is about the first design prototype of the mixing device for the final treatment of constructional material for additive manufacturing of buildings, including finite element method analysis, transportation system analysis as well as research on possible future suppliers of components. The volume of the device's hopper is 50 l , printing speed $5\text{-}15\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$, transportation route length is 50 m and height 12 m , concrete density $2350\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

OBSAH

1.	Úvod	1
2.	Teoretická část diplomové práce	3
2.1.	3D tisk	3
2.1.1.	Historie 3D tisku	3
2.1.2.	Princip 3D tisku	3
2.1.3.	Vývoj 3D tisku ve stavebnictví	3
2.1.4.	Problematika 3D tisku betonu	8
3.	Praktická část diplomové práce	11
3.1.	Míchací zařízení	11
3.1.1.	Návrh míchacího zařízení	11
3.1.2.	Zásobník na stavební směs	14
3.1.3.	Zamíchávání aktivačního činidla	17
3.1.4.	Pumpa míchacího zařízení.....	21
3.1.5.	Návrh pohonu míchacího zařízení	24
3.1.6.	Návrh zavírání míchacího zařízení.....	27
3.1.7.	Volba o-kroužků na zařízení pro velkou tiskárnu.....	29
3.2.	Ověření míchacího zařízení metodou konečných prvků.....	33
3.2.1.	První výpočet	34
3.2.2.	Druhý výpočet	35
3.2.2.1.	Třetí výpočet	36
3.2.3.	Modální analýza	42
3.3.	Dopravní trasa.....	46
3.3.1.	Hydraulická doprava	46
3.3.1.1.	Výhody a nevýhody hydraulické dopravy	46
3.3.1.2.	Rozdělení hydraulické dopravy dle použití.....	47
3.3.2.	Pneumatická doprava	47
3.3.2.1.	Výhody a nevýhody pneumatické dopravy	47
3.3.3.	Výpočet potrubí	48
3.3.3.1.	Základní vztahy pro výpočet.....	48
3.3.3.2.	Dosazení	49
3.3.4.	Hadice	51
3.3.5.	Čerpadlo.....	52

3.3.6. Míchačka.....	55
4. Závěr	57
Použitá literatura	59
Seznam obrázků	63
Seznam tabulek.....	66
Seznam příloh	66

SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

a	[m]	délka ramene ohybového momentu
A	[m ²]	plocha příčného průřezu tištěné vrstvy
α	[-]	převodní součinitel svarového spoje
b	[m]	šířka pera
c	[m.s ⁻¹]	střední rychlost proudění v potrubí
d	[m]	průměr potrubí
d _h	[m]	průměr hřídele
d _r	[m]	průměr rotoru
D	[m]	průměr trysky
e	[m]	excentricita šnekové pumpy
η	[Pa.s]	dynamická viskozita
g	[m.s ⁻²]	gravitační zrychlení
G	[N]	tíhová síla od gravitačního zrychlení
h	[m]	výška pera
k	[-]	koeficient bezpečnosti
κ	[-]	Coriolisův součinitel/ korekční člen
l	[m]	délka dopravní trasy
l'	[m]	celková výpočtová délka pera
l _a	[m]	finální délka pera
l _a '	[m]	funkční délka pera
l(ČSN)	[m]	normalizovaná délka pera
λ	[-]	součinitel laminárního tření
m	[kg]	hmotnost
M _k	[N.m]	krouťící moment
M _o	[N.m]	ohybový moment
ν	[m ² .s ⁻¹]	kinematická viskozita
p	[Pa]	tlak
p _d	[N.mm ⁻²]	maximální dovolené napětí na bocích per a drážek

p_s	[N.mm ⁻²]	napětí na bocích pera
Δp_z	[Pa]	celková tlaková ztráta
$\Delta p_z \lambda$	[Pa]	tlaková ztráta třením
$\Delta p_z \zeta$	[Pa]	tlaková ztráta lokálními odpory
Q_m	[kg.s ⁻¹]	hmotnostní průtok
Q_{th}	[m ³ .s ⁻¹]	objemový průtok generovaný šnekovou pumpou
Q_v	[m ³ .s ⁻¹]	objemový průtok
R_{eH}	[N.mm ⁻²]	minimální mez kluzu materiálu
ρ	[kg.m ⁻³]	hustota
s	[m]	stoupaní šnekové pumpy
S	[m ²]	plocha průřezu potrubí
σ_d	[N.mm ⁻²]	maximální dovolené napětí
t	[m]	výška tištěné vrstvy
v_1	[m.s ⁻²]	minimální rychlost tisku
v_2	[m.s ⁻²]	maximální rychlost tisku
w	[m]	šířka tištěné vrstvy
ζ	[-]	ztrátový součinitel

1. Úvod

Tématem této diplomové práce je kompletní konstrukční návrh míchacího zařízení pro finální úpravu stavební hmoty pro 3D tiskárnu budov a stroje pro vývoj betonové směsi. Součástí práce je také ověření navržené konstrukce metodou konečných prvků, dále provedení návrhu dopravní trasy včetně rešerše dodavatelů. Součástí návrhu je 3D model míchacího zařízení vytvořený v programu Autodesk Inventor. Metoda konečných prvků pak byla provedena v programu Abaqus.

Návrh míchacího zařízení je součástí projektu, který má za úkol vyvinout první 3D tiskárnu na budovy v Česku, přičemž jde o téma velmi aktuální i ve světovém kontextu. Jde o projekt multioborový, spojující dohromady odborníky z oblastí strojní, stavební a informatiky, kteří pak dále spolupracují se svými protějšky z praxe. Toto úsilí má v očích autora smysl, protože při úspěšném zvládnutí této nové technologie dojde ke zrychlení a zlevnění výstavby budov do takové míry, že bude možné tisknout bezpečné nové domy tam, kde to bude nejvíce žádáno, dokonce i v případě přírodní katastrofy či humanitární krize. Motivací je také vysoká pravděpodobnost využití v budoucnosti, při výstavbě obydlí na Měsíci či Marsu.

Hlavní důvody pro výběr tohoto tématu jsou již uvedeny v odstavci výše, vedle nich však bylo velkou motivací možnost vyzkoušet si své čerstvě nabyté schopnosti na reálném projektu. Práce při své rozsáhlosti a komplexnosti zahrnuje prakticky každý aspekt konstruktérské činnosti, od rešerše současných řešení a možností, shánění dodavatelů, tvorby modelu, základních návrhových výpočtů, spolupráce se zkušenějšími kolegy, jednání s pracovníky jiné fakulty, až po zastání role výpočtáře při ověřování navržené konstrukce pomocí metody konečných prvků. Autorovi bude umožněno své schopnosti nejenom ověřit, ale i rozšířit o cenné zkušenosti a postřehy.

Požadavek na existenci míchacího zařízení vychází ze specifických vlastností betonu pro 3D tisk. Do předmíchané směsi bude nutné, těsně před vytištěním, přidat chemickou látku urychlující tvrdnutí a spojování směsi. Doba aktivace je velmi krátká a tak je nutné aby k zamíchání, tedy aktivaci docházelo až na konci dopravní trasy. Zároveň je nutné, aby bylo činidlo dostatečně promícháno s betonovou směsí. Dalším argumentem pro existenci míchacího zařízení je jeho funkce jako zásobník předmíchaného betonu, kdyby došlo z jakéhokoliv důvodu k výpadku dopravního systému, neboť neplánované odstávky při práci stroje jsou nemyslitelné. Míchací zařízení bude pracovat na dvou různých strojích. Prvním z nich je testovací tiskárna, na které se budou ověřovat vlastnosti betonové směsi, druhým je pak první prototyp reálného stroje.

Diplomová práce je rozdělena do dvou hlavních částí. V teoretické části je čtenář formou rešerše uveden do problematiky 3D tisku budov za účelem snadnějšího porozumění praktické části textu.

V teoretické části bude představen 3D tisk obecně, následně bude detailněji popsán historický vývoj, současný stav a různé metody, které vznikly v průběhu času na poli 3D tisku ve stavebnictví a budou představeny některé významné projekty a firmy, které v tomto odvětví figurují. Na konci teoretické části budou shrnuty některé, na tento projekt aplikovatelné, poznatky z výzkumu na Eindhoven University of Technology.

V praktické části dostal autor možnost zapojit svoje schopnosti a cit pro řešení zadaného problému. Vzhledem k vysoké komplexnosti projektu je praktická část práce rozdělena do podkapitol. První a hlavní je konstrukční návrh prototypu míchacího zařízení. Zde bude detailně popsán postup návrhu a funkce každého konstrukčního prvku stroje. Ve druhé podkapitole praktické části bude provedeno základní ověření navržené konstrukce pomocí metody konečných prvků ve více výpočtech tak, jak bude nutné postupně ověřovat navrženou geometrii v průběhu návrhu. V poslední části bude zanalyzována dopravní trasa, jejíž díly budou nakupovány a tak bude součástí i rešerše a srovnání dodavatelů potřebných komponent.

Grafickým výstupem bude 3D model míchacího zařízení pro oba stroje, na kterých bude zařízení pracovat.

2. Teoretická část diplomové práce

Cílem teoretické části je uvedení čtenáře do problematiky 3D tisku budov. Obsahuje základní shrnutí současného stavu a možného budoucího vývoje na poli 3D tisku staveb, včetně základů problematiky tisknutelných směsí, které mohou pomoci i současně vyvíjenému stroji na ČVUT.

2.1. 3D tisk

2.1.1. Historie 3D tisku

První 3D tiskárna byla vynalezena v roce 1984 a od té doby se stal 3D tisk jednou z nejrychleji a nejdynamičtěji se rozvíjejících technologií. Překážkou v masovém rozšíření byla velmi vysoká cena vstupních materiálů a vysoká komplexnost, takže byl vývoj a aplikace 3D tisku omezen na odvětví s velkými finančními zdroji a kusovou produkcí (letectví, automobilový průmysl a biomedicína). V průběhu let se 3D tiskárny postupně dostaly i do ostatních odvětví průmyslu a následně do stavu, kdy je snahou prakticky každé firmy tuto technologii zahrnout do svého výrobního procesu. Nejčastěji to bývá prototypování či výroba optimalizovaných komponent ve vývoji. [1] [2]

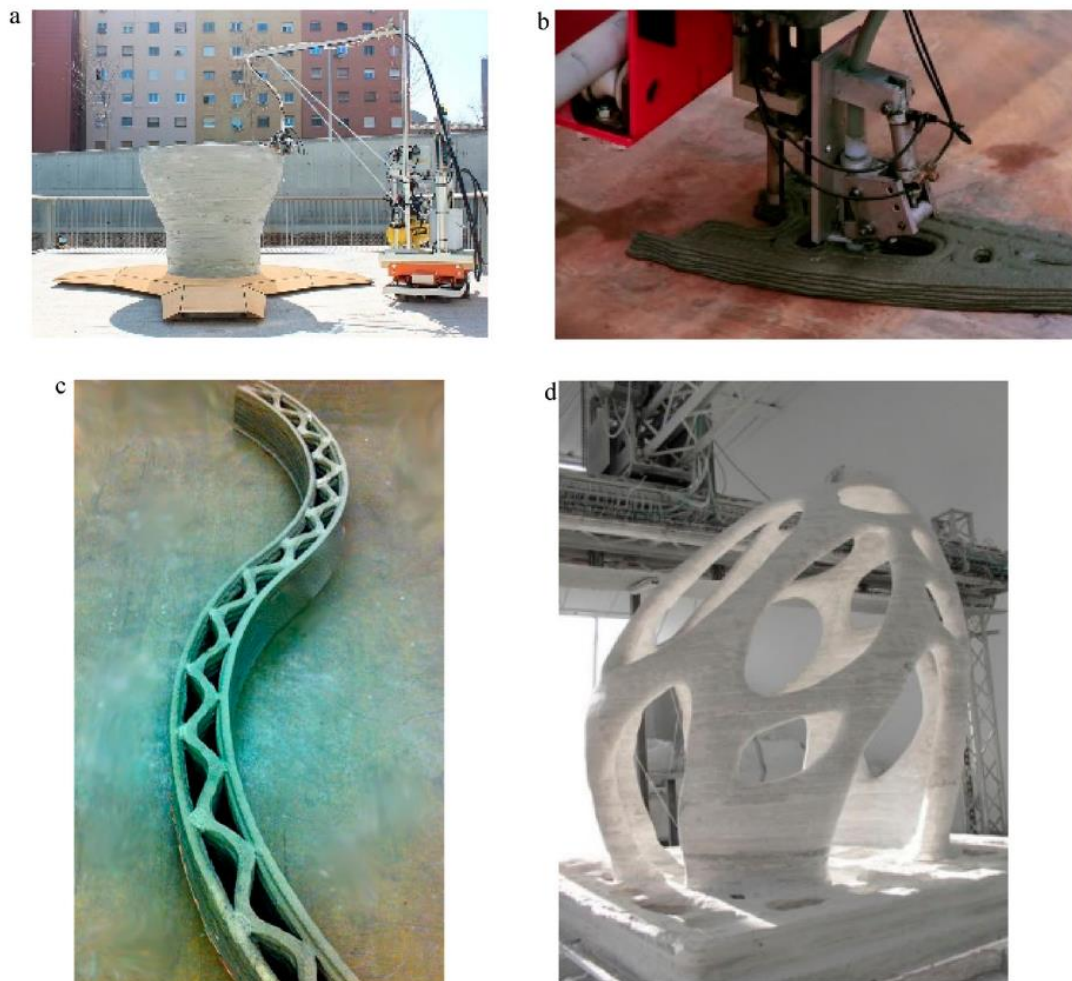
2.1.2. Princip 3D tisku

Existuje mnoho přístupů, jak vyrobit součást aditivní technologií. Historicky první však byl přístup Charlese W. Hulla, který přišel s nápadem postupného vytvrzování vrstev polymeru UV světlem, čímž dal vzniknout stereolitografii (STL). Stereolitografie umožňuje velmi přesný tisk extrémně komplikovaných geometrií, kvůli čemuž se používá hlavně v medicíně. Další podobnou technologií je selektivní laserové sinterování (SLS), jehož principem je spékání kovového prášku laserem. Díly vyrobené touto metodou mají vysokou pevnost a pružnost a jsou používány v letectví a automobilovém průmyslu. Metoda, která je vhodná pro použití ve stavebnictví, je technologie fused deposition modeling (FDM) fungující na principu postupného přidávání vrstev, které se vzájemně propojí a vytvoří tak výsledný produkt. Standardně používaným materiálem pro FDM jsou termoplasty, jmenovitě pak ABS (Akrylonitrilbutadienstyren) nebo ekologicky odbouratelný PLA (Polymléčná kyselina), ve stavebnictví to jsou pak speciální jemnozrné betonové směsi. [1]

2.1.3. Vývoj 3D tisku ve stavebnictví

Již od poloviny 90. let 20. století byly vyvíjeny technologie s cílem stavět budovy s využitím víceosých robotů. Na rozdíl od současných plastických materiálů, které později tvrdnou, se však používaly pevné bloky s přesnými rozměry. Využití betonové směsi pak v roce 1998 představil Dr. Behrokh Khoshnevis svou

techniku nazvanou Contour Crafting, která spočívá v postupné depozici tenkých vrstev speciální betonové směsi jedné na druhou, tedy metodu FDM, kterou až na výjimky využívá většina firem a univerzit současnosti (viz Obr. 1), zabývajících se 3D tiskem. Další vývoj byl však velmi pomalý a to až do roku 2012, který je pro 3D tisk ve stavebnictví zlomový. V jeho průběhu došlo k prudkému nárůstu projektů zabývajících se právě tímto tématem. Za zmínku stojí výzkum univerzity Loughborough [3], dále práce šanghajske firmy WinSun [4] a v neposlední řadě americké firmy Total Kustom [5], které představily nový přístup k tiskacímu stroji, kdy je namísto víceosého robota použit portálový stroj (viz Obr. 2). Úplně jiný přístup zvolil Enrico Dini, zakladatel a majitel firmy D-Shape [6], jehož proces tisku je nejvíce podobný stereolitografii, kde s pomocí speciálního slané inkoustu a tlaku vytvrzuje jednotlivé vrstvy jemného písku (viz Obr. 3). Patent pro tuto technologii byl vyplněn již v roce 2006. [1] [7]



Obr. 1 Příklady aplikace metody Contour crafting (FDM) při výzkumu na různých světových univerzitách. (a) Institute of Advanced Architecture of Catalonia, (b) University of Loughborough, (c) University of Southern California a (d) firma [6] D-shape. [7]

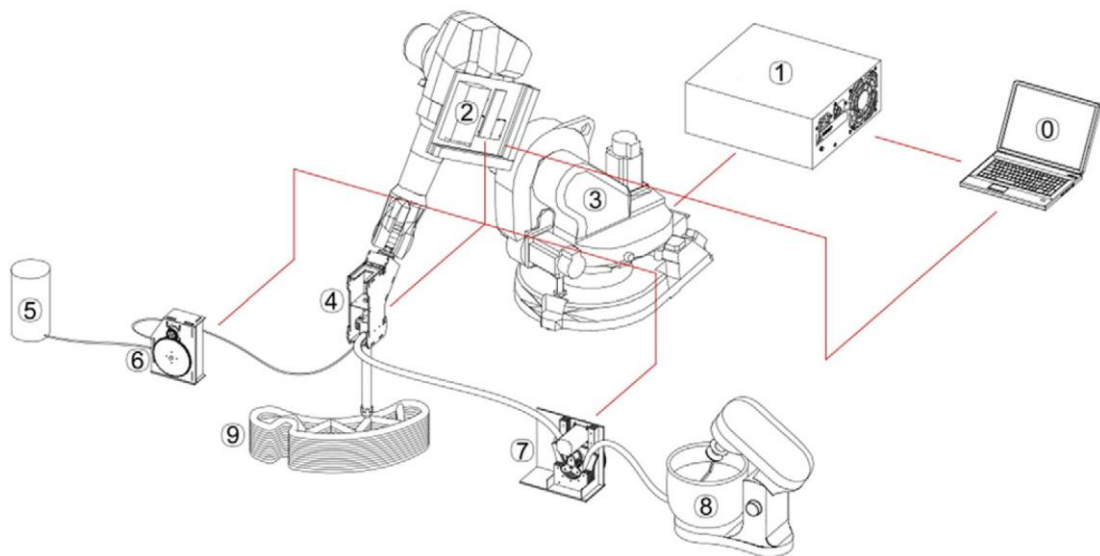


Obr. 2 Portálový stroj pro testování optimálních vlastností betonových směsí pro 3D, výzkum univerzity Loughborough [3]



Obr. 3 Stroj pro 3D tisk metodou stereolitografie, kde je vstupním materiálem písek, firmy D-Shape [6]

Některé výzkumné týmy pak pokračují ve využívání víceosých robotů (Obr. 4) pro výzkum 3D tisku vysokohodnotným betonem [2].



Obr. 4 Schéma sestavy pro 3D tisk s využitím víceosého robota: (1) řídicí jednotka robota, (2) řídicí jednotka tisku, (3) rameno robota, (4) tisková hlava, (5) urychlovací čidlo, (6) peristaltická pumpa urychlovacího čidla, (7) peristaltická pumpa pro předmíchanou směs, (8) míchač směsi, (9) tištěný objekt [2]

Firma WinSun [4] pak v roce 2014 vytiskla první betonový domek a později do dnešní doby nejvyšší 3D vytištěný objekt na světě (viz Obr. 5).



Obr. 5 První 3D vytištěný betonový domek (vlevo), nejvyšší 3D vytištěná budova na světě (vpravo) [4]

Další významné projekty, které stojí za zmínku, ať už od společností již zmíněných či zatím neznámých, lze vidět na Obr. 6.



Obr. 6 Projekty stojící za zmínku: (a) dvoupatrový domek od firmy HuaShang Tengda [8], (b) kancelářská budova v Dubaji od firmy WinSun, (c) již zmíněná pětipatrová budova od firmy WinSun v Suzhou, (d) hotelové apartmá na Filipínách od firmy Total Kustom, (e) vila v Suzhou od WinSun, (f) malý hrad v Minnesotě, USA, od firmy Total Kustom a (g) již zmíněný betonový domek v Suzhou od WinSun [7]

Prvním vytištěným objektem v Evropě byl dům v rámci vývojového projektu 3DPRINTCANALHOUSE [9] v Amsterdamu, zahájený v roce 2014 a dokončený 2017. Autoři tohoto projektu se snažili jít jiným směrem než ostatní a tak zde byl jako materiál pro tisk použit ekologicky rozložitelný termoplast. Budova pak nebyla vytištěna v kuse, ale po menších částech přímo na staveništi. Ty se poté poskládaly do celku ve snaze kompletně eliminovat odpad a náklady na dopravu. Cílem projektu bylo nastudovat tuto technologii a vyvinout lepší materiál pro tisk. Po dokončení zůstal projekt otevřený veřejnosti. [1] [7]

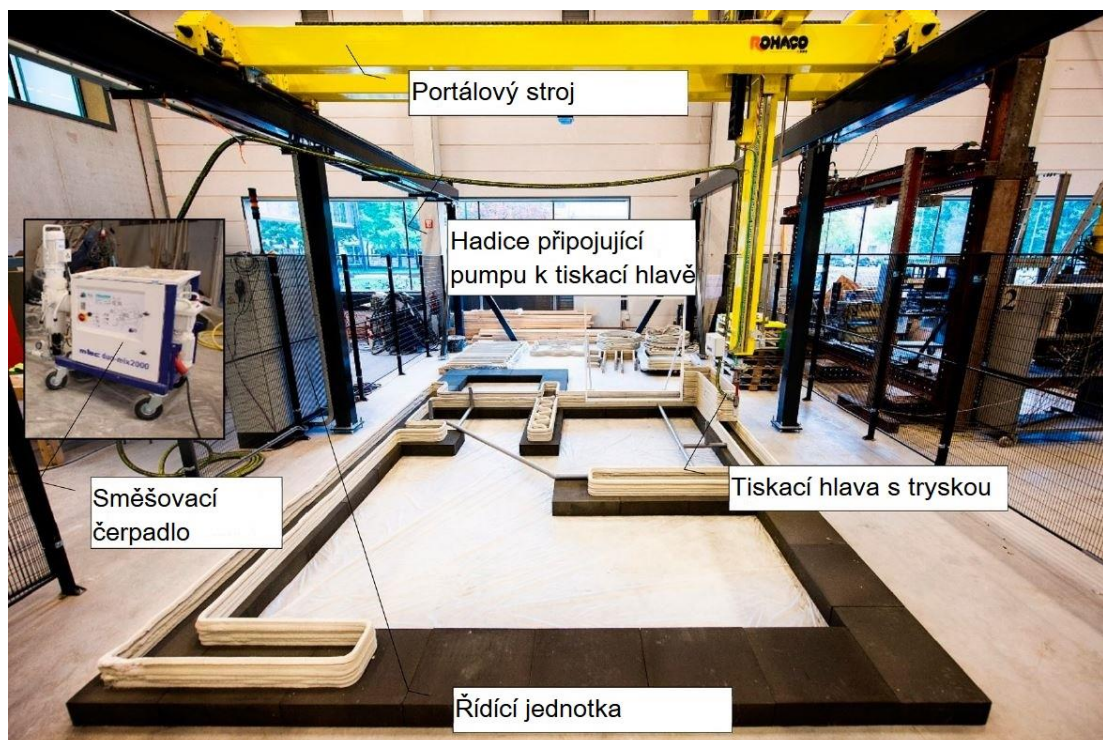


Obr. 7 Rozestavěný domek (v pravé části obrázku)
v rámci projektu 3DPRINTCANALHOUSE od DUS Architects [9]

2.1.4. Problematika 3D tisku betonu

Jak již bylo uvedeno, nejčastěji používanou metodou současnosti je Contour Crafting v kombinaci s portálovým strojem a jako materiál speciální směs betonu. Tento přístup je aplikován i na velkou tiskárnu, pro kterou je v této diplomové práci navrhováno míchací zařízení, přičemž jí principiálně podobný stroj již od roku 2015 funguje na Eindhoven University of Technology (TU/e) [10], která vydala v roce 2016 zprávu [7] popisující problematiku této metody. Díky podobnosti projektů a tedy i předpokládané aplikovatelnosti poznatků na projekt na ČVUT, budou následující řádky shrnutím informací z této zprávy doplněné o užitečné postřehy z dalších zahraničních prací.

Základním materiálem při metodě Contour Crafting je betonová směs, která se promíchá s vodou a následně je pumpována hadicí ze směšovacího čerpadla, které je lokalizované vedle tiskacího prostoru. Tato hadice vede na konec dopravní trasy do tiskové hlavy připevněné na konec vertikální části portálového stroje se čtyřmi stupni volnosti. Pod tlakem z pumpy je beton tlačěn do tiskové hlavy. Tisková hlava sestává z několika částí (viz Obr. 9), důležitý je konec tvořený kovovou tryskou, ze které odchází beton ven přičemž je vrstven do požadovaného tvaru. Celou sestavu lze vidět na Obr. 8. [7]



Obr. 8 Sestava pro tisk na Eindhoven University of Technology [7]



Obr. 9 Sestava tiskové hlavy [7]

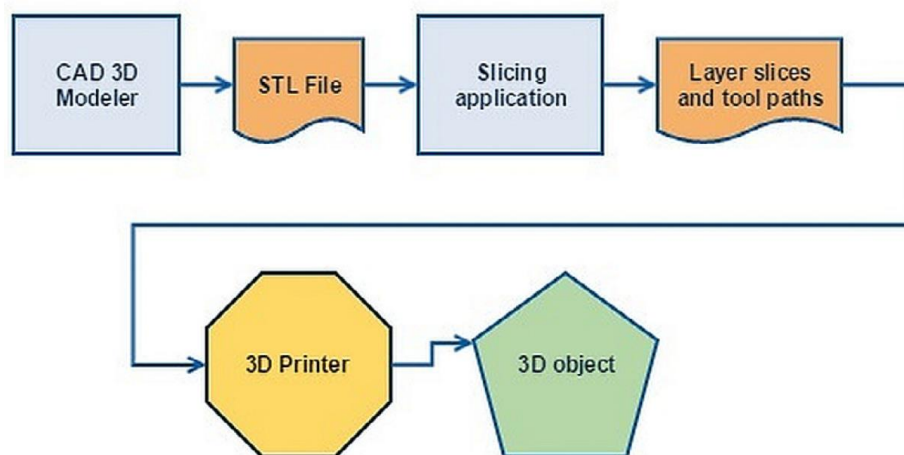
Vzhledem k výsledkům pokusů na TU/e by měl být geometrický tvar a rozměry trysky také předmětem výzkumu. Tyto pokusy totiž ukázaly, že při použití kruhového otvoru trysky s $D=25$ mm (491 mm²) vzniká problém s vrstvením směsi, zatímco při použití čtvercového otvoru s délkou hrany 25 mm (625 mm²) tento problém nenastává, ale objevuje se jiný a tím je kroucení tištěného pruhu betonu (viz Obr. 10), což je ale přirozené chování, které se dá odstranit natáčením trysky tak, aby byla vždy tangentsní ve směru tečny k trajektorii tisku. Následně byla použita tryska o rozměrech 40×10 mm (400 mm²). [7]



Obr. 10 Kroucení betonu při použití trysky nekruhového průřezu [7]

Stejně jako určení správného tvaru a rozměrů trysky je obtížné určit správnou rychlost pohybu tiskové hlavy a frekvenci pumpy (tlak). Tyto parametry úzce souvisí s viskozitou betonu, která zase závisí na přesném poměru složek směsi. Po zkouškách byla nakonec použita rychlost tisku $10 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ a tlak pumpy 30 bar, přičemž při průjezdu rohy či zatáčkou se tyto hodnoty sniží. Dalším faktorem je vzdálenost konce trysky od podkladu, na který se tiskne. Nejvíce předvídatelné je pak nastavení, kdy vzdálenost trysky od poslední tištěné vrstvy je rovna výšce průřezu trysky a šířka trysky pak šířce tištěné vrstvy, jinak řečeno plocha průřezu trysky a tištěné vrstvy je stejná. Při vzdálenosti menší pak může být dosaženo stlačování vrstev, což ovlivní výsledné vlastnosti výtisku. Pokusy ukázaly, že mírné stlačení vrstev má pozitivní efekt na výslednou pevnost výtisku. [7]

Dále je nutné zmínit, alespoň okrajově, problematiku 3D modelů vytvořených CAD programy. Přestože by se zdálo, že 3D tisk betonových směsí bude umožňovat výrobu jakéhokoli tvaru, opak je pravdou. Tvorbou modelu tak musí následovat funkční vazby z procesní stránky (tloušťka vrstvy, rozměry výrobku) a mechanické stránky (pevnost, tepelná vodivost). Tyto vazby musejí být uvažovány na úrovni materiálové, úrovni trasy tisku a úrovni globální. Například materiálová úroveň znamená kontrolu reologie extrudované směsi a mechaniku zrání materiálu, globální pak zahrnuje možnost změny tvaru objektu při použití rychleji tvrdnoucího materiálu. Typický postup tvorby 3D modelu lze vidět na Obr. 11. [1] [2] [7]



Obr. 11 Standardní postup tvorby 3D modelu pro 3D tisk (zleva doprava: CAD modelář, STL soubor, rozřezání modelu na vrstvy, přiřazení tras nástroje pro jednotlivé vrstvy, nahrání do 3D tiskárny, vytištěný 3D objekt) [1]

3. Praktická část diplomové práce

V praktické části diplomové práce bude popsán proces návrhu míchacího zařízení, ověření navržené konstrukce metodou MKP a modální analýzou, dále rozbor a výpočet jeho dopravní trasy, včetně rešerše možných dodavatelů, náhradních dílů a příslušenství.

3.1. Míchací zařízení

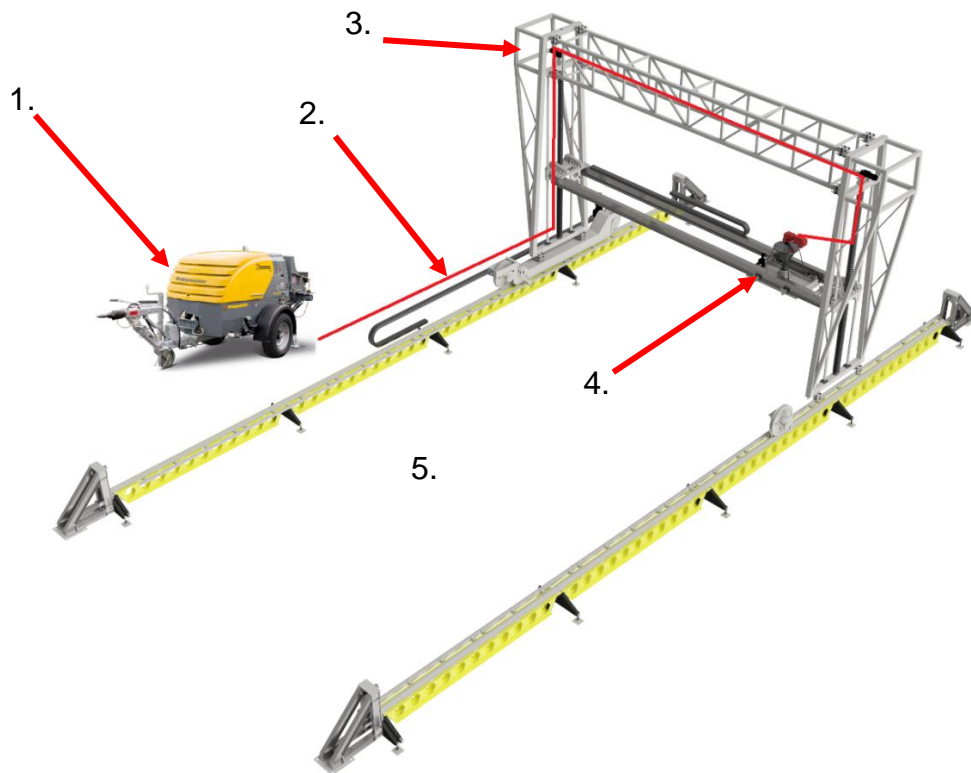
3.1.1. Návrh míchacího zařízení

Geometrický tvar, rozměry a použité součásti jsou dány strojem, na kterém bude míchací zařízení provozováno, vlastnostmi míchané směsi, rychlostí tisku a požadavky na plynulý provoz celého tiskacího zařízení. V době návrhu tohoto zařízení existuje požadavek pro funkci na dvou strojích, konkrétně na zařízení pro testování stavební hmoty (Obr. 12) a pak samotného reálného stroje (Obr. 13, Obr. 14). Pro snazší rozlišení bude pro následující odstavce zaveden pojem malá tiskárna a velká tiskárna. Malou tiskárnou je myšlen zkušební stroj pro testování a vývoj betonu, zatímco velká tiskárna znamená první funkční prototyp reálného stroje.

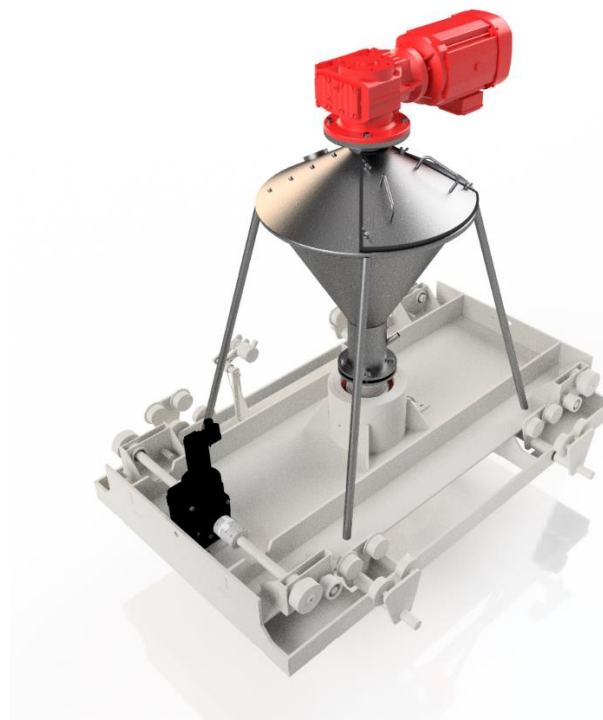
Při použití na malé tiskárně bude zařízení na stacionární rámové konstrukci, v případě velké tiskárny se pak zařízení bude pohybovat spolu s kočkou stroje ve třech osách. V obou případech bude zařízení drženo stojinami, jež budou přivařeny k zakružené trubce, která ponese vanu, prstence příruby, motor a víko.



Obr. 12 Zařízení pro testování betonové směsi (malá tiskárna)



Obr. 13 Reálný stroj (velká tiskárna), (1.) pumpa na beton, (2.) hadice, (3.) portálový stroj, (4.) kočka s navrhovaným míchacím zařízením, (5.) prostor mezi žlutými kolejnicemi je pracovní

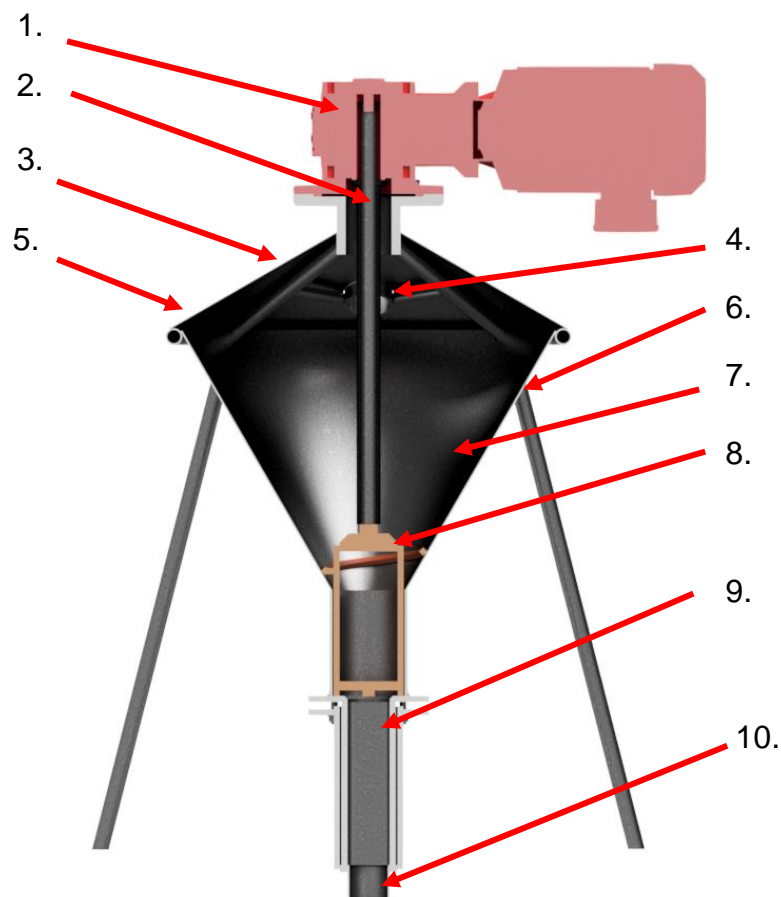


Obr. 14 Detail navrhovaného míchacího zařízení na kočce velkého stroje

První návrh zařízení vznikl s pomocí známých proměnných a již existujícího modelu kočky a rámu pro velkou tiskárnu. Navrhovaný stroj bude plnit celkem tři funkce. Popsáno po směru toku betonové směsi to jsou:

1. Zásobník pro předmíchaný beton dopravený dopravní trasou s požadovaným objemem 50 l, což odpovídá cca 150 kg.
2. Zamíchání aktivačního činidla do betonu, činidlo bude přivedeno bočním vstupem přes clonku ve válcové části stroje.
3. Pumpa, jejíž funkcí je tlačení betonu ze zásobníku skrz hadici až ke trysce.

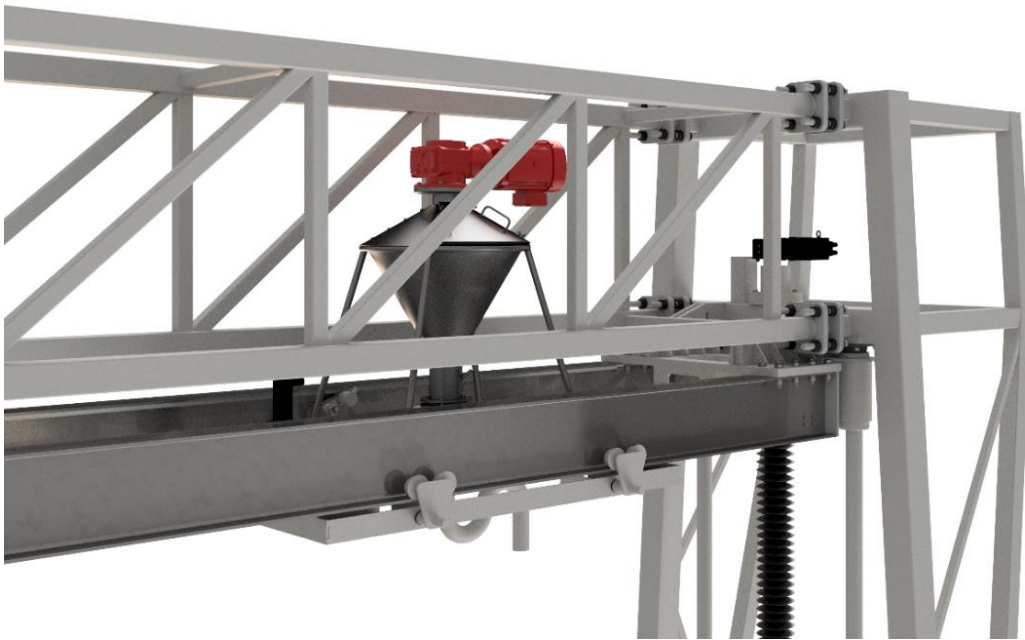
Sestavení zařízení v řezu a jeho skladbu lze vidět na Obr. 15. Sestava je stejná i pro míchací zařízení pro malou tiskárnu.



Obr. 15 Sestava míchacího zařízení pro velkou tiskárnu, (1.) pohon, (2.) hřídel míchače, (3.) víko zásobníku, (4.) přívod betonu do zásobníku, (5.) nosná obruč, (6.) stojina, (7.) zásobník, (8.) nakupovaná část míchače, (9.) šneková pumpa, (10.) výstup z míchacího zařízení

3.1.2. Zásobník na stavební směs

Zásobník bude vyroben z 3 mm silného plechu z konstrukční oceli S235JRG2 s možností jejího opatření otěruvzdorným návarem. Důležitým faktorem pro výsledný tvar nádoby zásobníku jsou zástavbové rozměry. Důležitá je zejména výška zástavbového prostoru, jelikož by při vysunutí kočky nesoucí míchací zařízení do krajní horní polohy nemělo dojít k vyjetí vrchní části míchacího stroje (motoru) ven z příhradové konstrukce, která má cca 1 m na výšku (Obr. 16). Toto omezení existuje jako prevence před možnými kolizemi s dalšími částmi velké tiskárny (zakrytování proti dešti apod.).



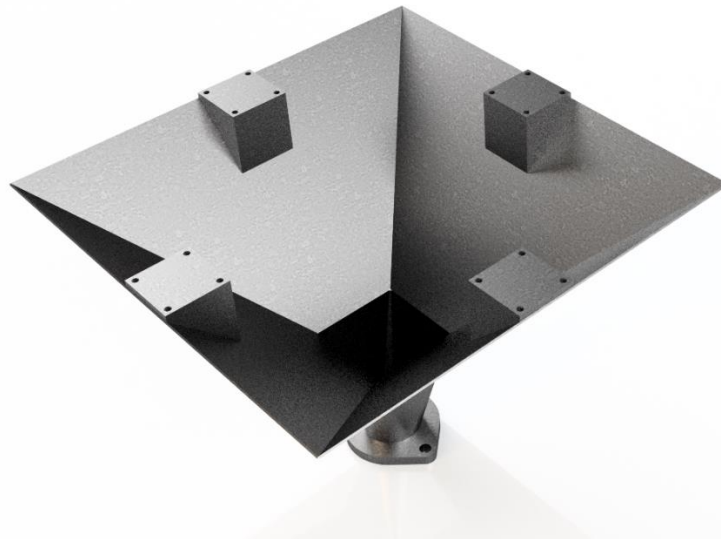
Obr. 16 Kočka velké tiskárny v krajní horní poloze, ze které vychází rozměrové omezení

Beton bude do zásobníku přiveden v předmíchaném stavu pomocí dopravní trasy sestávající z nakoupené míchačky, pumpy a kompatibilních hadic. Konečný tvar a rozměry vstupu do míchače (Obr. 17) budou upraveny, až budou známy konkrétně všechny nakupované prvky trasy.



Obr. 17 Předpřipravený přívod betonu do zásobníku

Z těchto vlastností vychází dva použitelné geometrické tvary nádoby, tvar komolého jehlanu (Obr. 18) anebo tvar komolého kuželu. Vzhledem k lepšímu poměru mezi výškou a objemem byl jako první vybrán tvar komolého jehlanu s výškou 300 mm a vrcholovým úhlem 90° . Tato konfigurace jehlanu má objem zhruba 69 l.



Obr. 18 Zásobník ve tvaru jehlanu, první návrh

Přestože je jehlan geometricky výhodnější než kužel, existují zde také nevýhody. Jednou je způsob výroby, kdy by jehlan vyráběný z plechu bylo nutné buďto naohýbat do požadovaného tvaru, nebo svařit předem vypálené dílce. Obě tyto operace zvyšují čas a cenu výroby. Hlavní nevýhodou je však právě geometrický tvar, konkrétně ostré hrany, jež by mohly způsobit ulpívání a zasychání betonu. Utržený kus betonu by mohl sklouznout do oblasti pumpy a ucpat ji, čímž by způsobil odstávku celého stroje, což je nepřijatelné.

V další iteraci designu bylo tedy přistoupeno ke tvaru komolého kuželu (Obr. 19) vloženého do kruhové obruče, jejíž účel je vyztužení a nesení celé konstrukce. Tento tvar vznikne zakružením a svařením plechu.



Obr. 19 Kuželový tvar zásobníku, druhý návrh

Po konzultaci s kolegou z fakulty stavební ČVUT došlo ke změně vrcholového úhlu zásobníku z 90° na 60° (Obr. 20), aby se beton snadněji sesunoval po stěně směrem do míchače. Dále byla zvětšena výška na 430 mm, což znamená výsledný objem zhruba 52 l. Objem je o něco větší, protože zásobník nikdy nebude naplněn až po okraj.

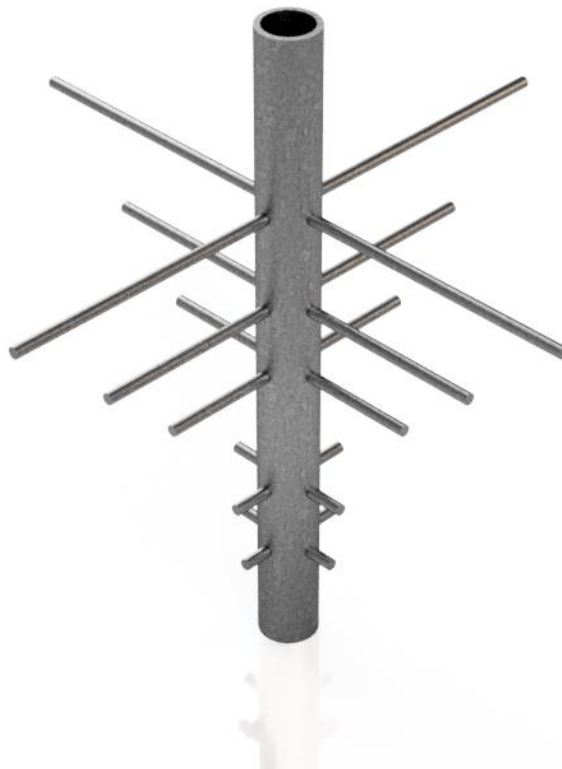


Obr. 20 Výsledný design zásobníku

3.1.3. Zamíchávání aktivačního činidla

Zamíchávání aktivačního činidla je jedním z hlavních důvodů pro vývoj míchacího zařízení. Vzhledem k náročným požadavkům 3D tisku na betonovou směs je nutné, aby tuhla určitou rychlostí a kvalitně se spojovala, přičemž tato rychlost je podstatně vyšší než rychlost tuhnutí klasického betonu, a tak je nutné do suspenze těsně před její aplikací přimíchat aktivační látku. Tato látka začíná působit během 30 sekund, a tak by varianta dopravy suspenze s již přimíchaným činidlem nebyla možná, protože při požadovaném průtoku navrženým potrubím bude trvat cesta směsi od kupované míchačky do zásobníku míchacího stroje cca 3 minuty.

Součástí původního návrhu byla vlastní konstrukce míchače, jenž by se otáčel už v oblasti zásobníku a promíchával tak jeho celý objem. Aktivační činidlo by se pak přidávalo formou sprchy přivedené do horní části pod víko. Míchač by tvořila trubka opatřená vrtanými průchozími dírami, do kterých by se přivařily míchací tyče (Obr. 21). Toto řešení by však značně komplikovalo servis stroje a poškození míchacích tyčí by znamenalo výměnu celé transmise, tedy odstávku stroje což, jak už bylo řečeno, je nepřijatelné.



Obr. 21 První návrh míchače

V dalším návrhu bylo tedy přistoupeno ke šroubovacím míchacím elementům (Obr. 22) z plochého plechu obdélníkového tvaru, které by po zašroubování do hřídele a zajištění kontramatkou zůstaly natočené pod úhlem 45° tak, aby při jejich otáčení docházelo k tlačení směsi směrem ven, což by pomohlo šnekové pumpě stroje. Stejně tak případná výměna míchacích elementů by byla o mnoho snazší.



Obr. 22 Šroubované míchací elementy

V poslední variantě, po provedení rešerše a schůzce s kolegou z fakulty stavební ČVUT, bylo rozhodnuto, že namísto šroubovacích míchacích elementů se použije kombinace nakupovaného míchacího hřídele a hřídele ve formě trubky délkově upravené pro naše potřeby (Obr. 23 a Obr. 24). Zároveň se také posunula poloha míchacího elementu z oblasti zásobníku do válcové míchací části, která vznikla kvůli přívodu aktivačního činidla. Nakupování a jednoduchá úprava hřídele (zkrácení a svaření dílců), místo jeho vyrábění, se jeví jako výhodnější vzhledem k tomu, že míchací hřídel bude jednou z nejvíce opotřebovávaných komponent, která se bude často měnit a pro případ vlastních elementů by je bylo nutné opakovaně vyrábět a vyměňovat, což by bylo příliš časově a ekonomicky náročné. Nakupovanou součást také podporuje fakt, že beton doputuje do zásobníku již předmíchaný, a tak ho není nutné nijak výrazněji promíchávat. Stačí tolik, aby došlo k rovnoměrnému rozptýlení aktivačního činidla v suspenzi, přičemž v praxi se

míchací hřídele právě pro takovéto zamíchávání používají (např. ve stroji PFT G4 dodávaném firmou Knauf PFT [11]).

Možným dodavatelem míchacích hřídelů je firma TONSTAV-SERVICE s.r.o. [12], nebo firma Filamos s.r.o. [13].

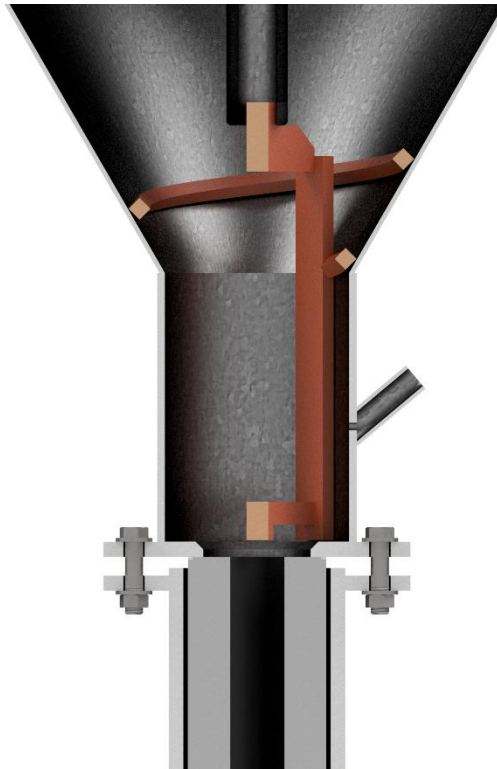


Obr. 23 Nakupovaný míchací hřídel od firmy Knauf PFT [14]

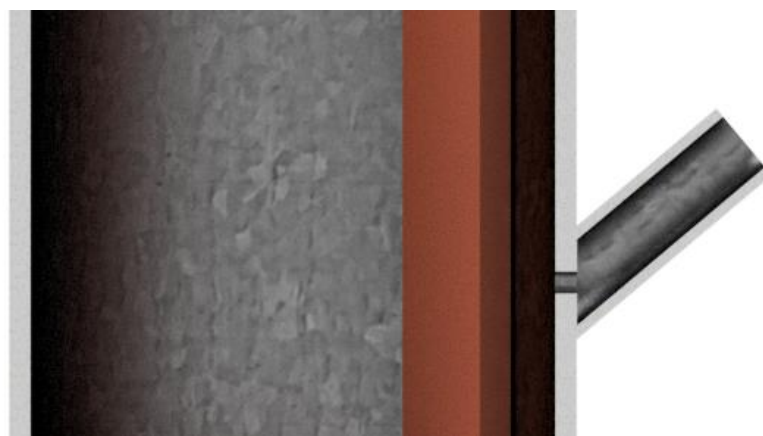


Obr. 24 Model upraveného míchacího hřídele

Další otázkou byl způsob disperze činidla. Jak již bylo řečeno výše, původní idea zahrnovala rozprašování činidla ve formě mlhy do oblasti zásobníku. Po konzultaci s kolegy z fakulty stavební ČVUT a získání nových informací byl tento nápad zavrhnut a nahrazen přívodem chemické látky skrz šikmý boční vstup válcovou částí s clonkou na konci (Obr. 25).



Obr. 25 Vstup aktivního činidla válcovou částí s clonkou



Obr. 26 Detail vstupu činidla válcovou částí s clonkou

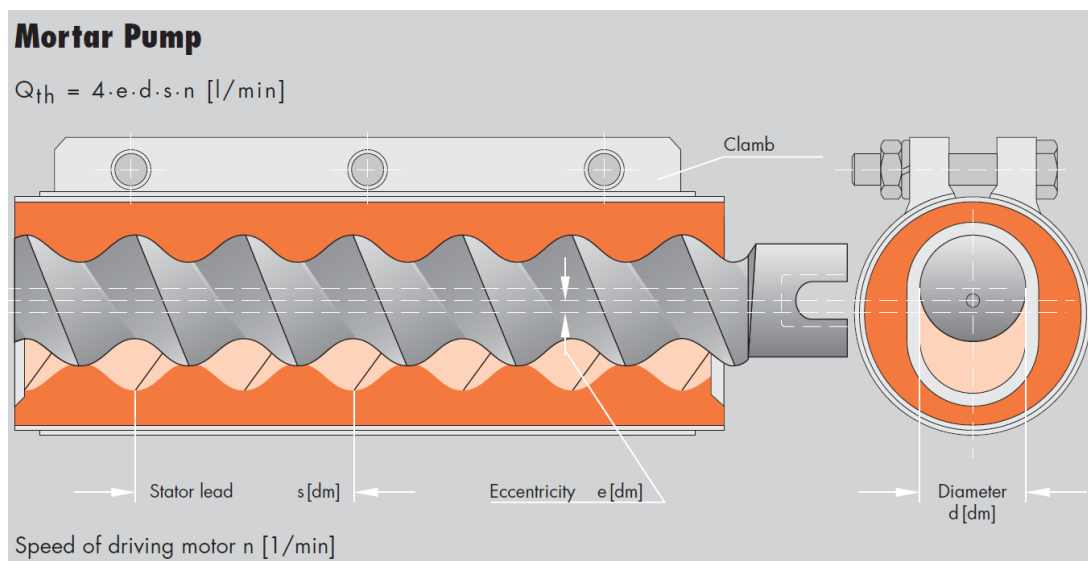
3.1.4. Pumpa míchacího zařízení

Třetí a poslední funkcí navrhovaného zařízení je tlačení betonové směsi skrz potrubí do tiskové hlavy, pro což bude použito šnekové excentrické pumpy.

Šneková excentrická pumpa byla poprvé použita v roce 1963 pro strojovou aplikaci sádry při omítání. Tento typ objemového čerpadla byl vyvinut francouzským profesorem Moineau. V současné době se v hojné míře využívá pro pumpování malty a jí podobných hutných látek. [15]

Principem funkce takové šnekové pumpy je ocelový hřídel se šnekovnicí - rotor, otáčející se v pogumovaném plastovém pouzdře - stator. Excentrický pohyb rotoru vytváří komory mezi vnitřkem statoru a vnějším povrchem rotoru, které se otevírají a zavírají směrem od vstupu k výstupu z pumpy, a to prakticky bez pulzování. [15]

Šneková pumpa má následující geometrické rozměry: průměr rotoru d_r [m], excentricitu e [m] a stoupání statoru s [m] (Obr. 27).



Obr. 27 Základní rozměry šnekové pumpy [15]

Průtočné množství generované pumpou, jež je přímo závislé na rychlosti otáčení n [1/min] se pak vypočte jako:

$$Q_{th} = 4 \times e \times d_r \times s \times n \quad m^3/min \quad (1)$$

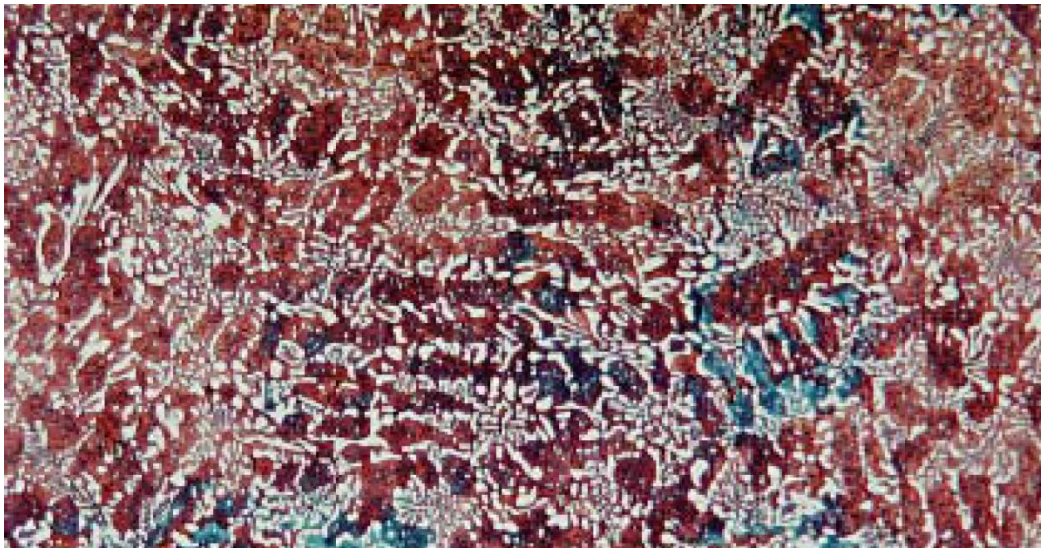
V dnešní době je 70 % všech statorů pružných, v této variantě je vnější obal statoru buďto z kovové trubky s drážkou nebo z tvrdé plastové trubky. Zbylých

30 % statorů má vnější obal ze svařované trubky a jsou označovány jako „bezúdržbové“. [15]

Excentrickou šnekovou pumpu je výhodné použít v kombinaci se synchronním třífázovým motorem, protože v případě ucpání dopravní trasy je možné pustit motor v reverzních otáčkách a zpětným chodem šneku snížit tlak v dopravované směsi. Maximální pracovní tlak excentrické šnekové pumpy je dán těsností dosedacích ploch mezi státorem a přírubami. Tvrdost gumové směsi statoru hraje také roli, a to zejména v síle předpětí pro zatěsnění dosedacích ploch, které je dáno stlačením statoru o cca 2 mm. [15]

Pumpa může sestávat i z více segmentů, vždy záleží na požadovaném výstupním tlaku. Například firma PFT dodává pumpy o velikostech od 1 až do 5 tlakových segmentů, s maximálními dopravními tlaky od 10 – 40 bar. [15]

Rotor, jež je vystaven extrémnímu abrazivnímu namáhání je vytvrzen karbidy chromu v austenitické/martenzitické matici (Obr. 28), díky čemuž je povrchová tvrdost rotoru okolo 65 HRC. [15]



Obr. 28 Snímek mikrostruktury rotoru (bílé oblasti jsou karbidy chromu) [15]

Část potrubní trasy mezi pumpou a tryskou je jak pro malou tak i pro velkou tiskárnu poměrně krátká. Její délka je taková, aby za dobu průtoku směsi touto trasou došlo k plné aktivaci činidla, ideálně tak, aby bylo připravené těsně před výstupem z trysky. Již od počátku navrhování bylo dáno, že tato část stroje bude nakupovaná, protože se jedná o jednu z nejvíce opotřebovávaných částí celého stroje a stejně jako v případě míchače se tato technologie již používá v praxi, tedy je odzkoušená a funguje. Prvním krokem v návrhu tohoto uzlu byla rešerše pro získání rozhledu v této technologii a zároveň vytipování případných budoucích

dodavatelů šneku a pouzdra pro pumpu stroje. Výsledkem rešerše je firma TONSTAV-SERVICE s.r.o. [12], která dodává výrobky od firmy Knauf PFT [14], další možnou dodavatelskou firmou je Filamos s.r.o. [13], přičemž spolupráce s ní se jeví jako výhodná vzhledem k použitému omítacímu čerpadlu pro testovací tiskárnu právě od této firmy.

Návrh šnekové pumpy úzce souvisí s návrhem pohonu, který závisí na požadované rychlosti tisku. Návrh pohonu bude uveden v následující kapitole (viz 3.1.5). Ve finální verzi stroje budou pracovat dvě varianty pumpy a jedna varianta šneku (viz Tab. 1), a to konkrétně rotor D5K (Obr. 29) od firmy Filamos s.r.o. a dvě pouzdra D5K (Obr. 30) a D6-3 Twister (Obr. 31) dodávané firmou Filamos s.r.o.

Tab. 1 Vybrané komponenty šnekové pumpy

Název	Výkon [l/min]	Tlak [bar]	Max zrnitost [mm]	Rozměry [mm]
Rotor D5 kurz	40 (při 400 ot/min)	20	4	270 x 90
Stator D5 kurz	40 (při 400 ot/min)	20	4	270 x 90
Stator D6-3 Twister	30 (při 400 ot/min)	30	3	270 x 90



Obr. 29 Rotor D5 kurz [16]



Obr. 30 Stator D5 kurz [16]



Obr. 31 Rotor D6-3 Twister [16]

3.1.5. Návrh pohonu míchacího zařízení

Jak již bylo řečeno, pohon míchacího zařízení úzce souvisí s použitou šnekovou pumpou. Použitým frekvenčním měničem se totiž bude, v rozsahu od 25 – 70 Hz, regulovat rychlost vytlačování betonové směsi otáčkami motoru. Bylo tedy nutné navrhnout takovou kombinaci motoru, převodovky a šnekové pumpy, aby při řízení daným frekvenčním měničem bylo z pumpy vytlačováno potřebné objemové množství betonu pro vytvoření dostatečně silné vrstvy při její dané šířce a rychlosti pohybu tiskové hlavy. To byl také přístup, který byl zvolen pro první návrh pohonu, kdy je od zadavatele projektu známo, jakou maximální rychlostí se bude tisková hlava pohybovat.

Z důvodu optimálního spojování a tvrdnutí betonu je minimální rychlost stanovena na $5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ a maximální rychlost na $15 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, dále jsou známy rozměry příčného řezu betonové vrstvy, které činí 40 mm na šířku a 20 mm na výšku. Se znalostí těchto požadavků od zadavatele bylo následně možné dopočítat potřebný objemový průtok pro tisk.

Pro nejnižší rychlost v_1 (2).

$$\begin{aligned}
 Q_{v1} &= A \times v = w \times t \times v_1 = 0,04 \times 0,02 \times 0,05 = 0,00004 \text{ m}^3 \times \text{s}^{-1} \\
 &= 2,4 \text{ l/min}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

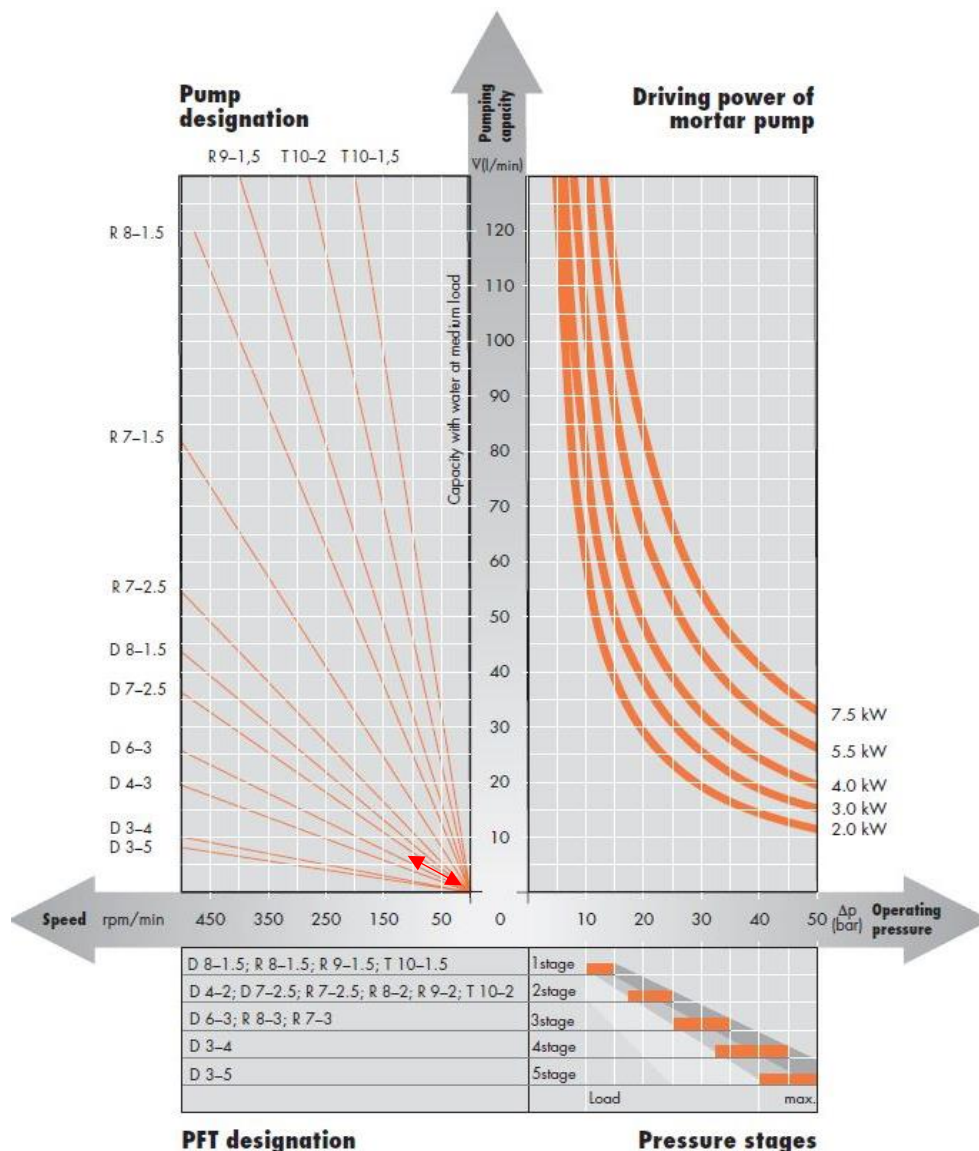
A pro nejvyšší rychlost v_2 (3).

$$\begin{aligned}
 Q_{v2} &= A \times v = w \times t \times v_2 = 0,04 \times 0,02 \times 0,15 = 0,00012 \text{ m}^3 \times \text{s}^{-1} \\
 &= 7,2 \text{ l/min}
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

Vzhledem k rozsahu řídicích frekvencí frekvenčního měniče je zjevné, že dosáhnout rychlostí v_1 a v_2 zároveň není možné, protože zatímco v případě rychlosti

tisku je poměr mezi maximální a minimální rychlostí 3, u frekvenčního měniče je tento poměr pouze 2,8, což znamená maximální rychlost pouze 14,8 cm.s⁻¹. Tento problém pomohl vyřešit požadavek od zadavatele projektu, kdy bylo jasně řečeno, že závazná je minimální rychlost a to především proto, že jde stále o prototypový návrh a než budou vlastnosti betonu naprosto zřejmé, bude nutné tisknout nižšími rychlostmi.

Z grafu (Obr. 32, pro rotor D6-3) a konzultace s dodavatelem šnekových pump vyplynuly možné průtoky, které byly spolu s výše uvedenými informacemi zapracovány do výpočtového souboru v MS Excel. Zde bylo ověřeno, že pro zajištění optimálního průtoku pro minimální rychlost tisku je potřeba, aby výstupní otáčky motoru byly při 25 Hz ne větší než 48 ot/min a při 70 Hz by se měly pohybovat okolo 134 ot/min. Potřebný výkon motoru byl s rezervou odhadnut (dle Obr. 32) na 4 kW.

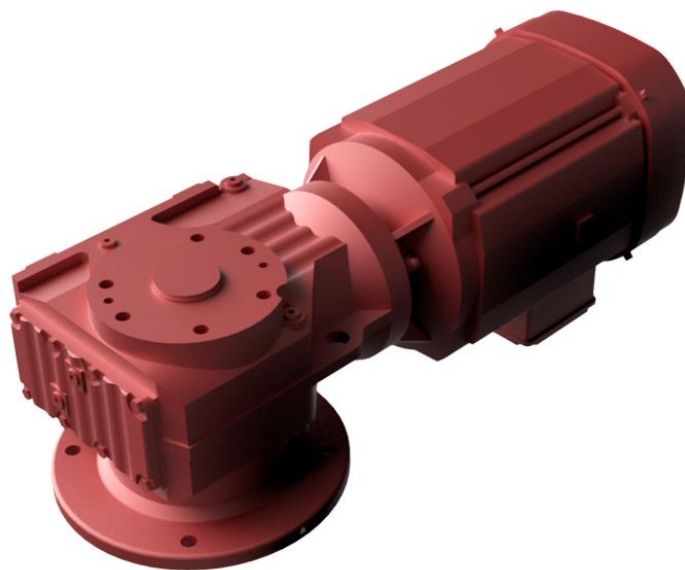


Obr. 32 Diagram závislosti rychlosti otáčení na dopravovaném objemu různých šnekových pump (červeně pracovní oblast míchacího zařízení) [15]

Vzhledem k dobré zkušenosti bylo přistoupeno k výběru motoru od firmy SEW-EURODRIVE [17], která dodává motory, převodovky, převodové motory a frekvenční měniče spolu s další řídicí technikou. Pro snazší návrh pohonu bylo rozhodnuto že se použije převodový motor - tedy od výrobce přímo sestavená a dohromady prodávaná kombinace motoru a převodovky, což zaručuje funkčnost a kompatibilitu těchto výrobků. Po zadání zmíněných minimálních výstupních otáček a potřebného výkonu do vyhledávače na webu SEW-EURODRIVE, vyšel třífázový převodový motor KAF57DRN112M4 (Obr. 33) s kuželovou převodovkou K. Produktová data tohoto stroje jsou v Tab. 2.

Tab. 2 Produktová data zvoleného pohonu

Jmenovité otáčky motoru [1/min]	1464
Výstupní otáčky [1/min]	97
Výstupní krouticí moment [Nm]	395
Převodový poměr celkové [-]	15,22
Dutý hřídel [mm]	40
Napětí motoru [V]	230/400
Frekvence [Hz]	50
Hmotnost [kg]	71
Hmotnost samotného motoru [kg]	44,6



Obr. 33 Převodový motor SEW-EURODRIVE KAF57DRN112M4

Přestože firma SEW-EURODRIVE má v nabídce variantu tohoto motoru v osovém uspořádání (převodovka nad motorem), která by byla vhodnější z hlediska zatížení konstrukce (zanedbatelný ohybový moment), nebylo možné tuto variantu použít z již zmíněných (viz kapitola 3.1.2) zástavbových omezení.

Uspořádání pohonu s přesahem převodovky do boku bylo zdrojem obav, které však byly vyvráceny ověřením metodou konečných prvků v kapitole 3.2.

Přenos kroutícího momentu bude proveden s pomocí pera a drážky v náboji motoru. Protože bude hřídel míchače, jak bylo řečeno v kapitole 3.1.3, částečně kupovaná a částečně vyráběná (viz Obr. 24), bylo také nutné navrhnout pero pro tento spoj. K tomu byly využity známé vzorce:

$$p = \frac{4 \times M_k}{d_H \times h \times l_a} \leq p_d \rightarrow l_a \geq \frac{4 \times M_k}{d_H \times h \times p_d} \quad (4)$$

Kde p_d se volí dle provozního režimu a úpravy povrchu, pro tento případ se $p_d = 80 \text{ N.mm}^{-2}$. Výška a šířka pera je přiřazena normou (ČSN 02 2562) k průměru hřídele, zde $h = 8 \text{ mm}$ a $b = 12 \text{ mm}$.

Následně bylo dosaženo:

$$l_a \geq \frac{4 \times 395000}{40 \times 8 \times 80} = 61,72 \text{ mm} \quad (5)$$

A potom:

$$l' = l_a + b = 61,72 + 12 = 73,72 \text{ mm} \quad (6)$$

Kde l' je celková délka pera, ke které se dohledá nejbližší vyšší hodnota l (ČSN) a následně se přepočte na funkční délku pera:

$$l_a = l_{(\text{ČSN})} - b = 74 - 12 = 62 \text{ mm} \quad (7)$$

[18]

Takto navržený pohon bude použit zejména na stroji pro malou tiskárnu, kde je kladen důraz spíše na vlastnosti směsi než řízení stroje. Je pravděpodobné, že pro práci na velké tiskárně dojde ke změně pohonu, pravděpodobně na synchronní pro přesnější řízení tisku.

3.1.6. Návrh zavírání míchacího zařízení

Požadavky na zavírání (servisní poklop) míchacího zařízení vycházejí z podmínek, ve kterých bude stroj pracovat, a to zejména při provozu na velké tiskárně a pak také z požadavků na údržbu stroje. Velká tiskárna bude pracovat venku, kde v případě deště hrozí, že do zásobníku naprší, čímž by došlo k nechtěnému rozředění předpřipravené směsi a dále, při velkém větru, by mohlo

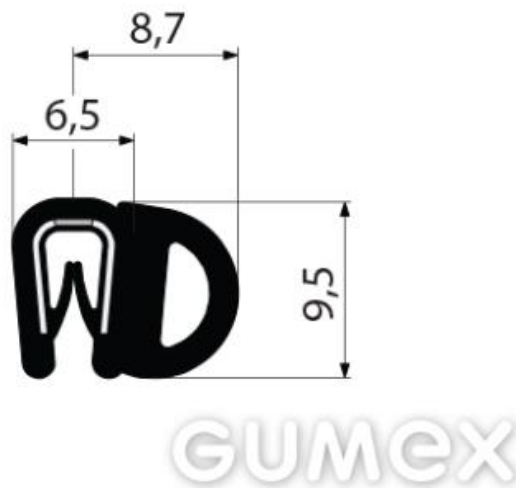
dojít k zanesení nečistot do směsi, což by mohlo mít za následek nesprávné propojení vrstev a tedy ohrožení stability tištěné stěny.

Z tohoto důvodu bylo nutné zásobník zakrytovat. Kvůli požadavku na čištění proplachem vodou a případné odstranění zaschlých nárůstků po skončení každého pracovního dne bylo nutné zřídit servisní poklop, který umožní rychlé otevření a zavření prostoru, aniž by muselo dojít k demontáži celého krycího plechu. To je sice v případě nutnosti možné, nicméně jde o operaci, jež je časově náročná a časové prodlevy při provozu stroje, jak již bylo řečeno, jsou nepřijatelné.

Řešení bylo nalezeno v podobě víka ve tvaru krytu opatřeného madly, zajištěného nerezovými šrouby s křídlatou hlavou a zatěsněno gumovým profilem s kovovou výztuhou od firmy GUMEX, spol. s.r.o. (Obr. 34). Konkrétně jde o pryžový profil Pireli s bočním těsněním (Obr. 35). Toto řešení umožní zatěsnění víka a zároveň také snadné a rychlé otevření.



Obr. 34 Víko míchacího zařízení



Obr. 35 Pryžový profil Pireli s bočním těsněním - těsnění s výztuhou [19]

Protože bude víko uchyceno na nosné konstrukci tvořené trubkami (viz Obr. 20), bylo nutné pro vytvoření závitu s dostatečnou životností pro časté otevírání a zavírání víka použít čepů zavařených do trubek.

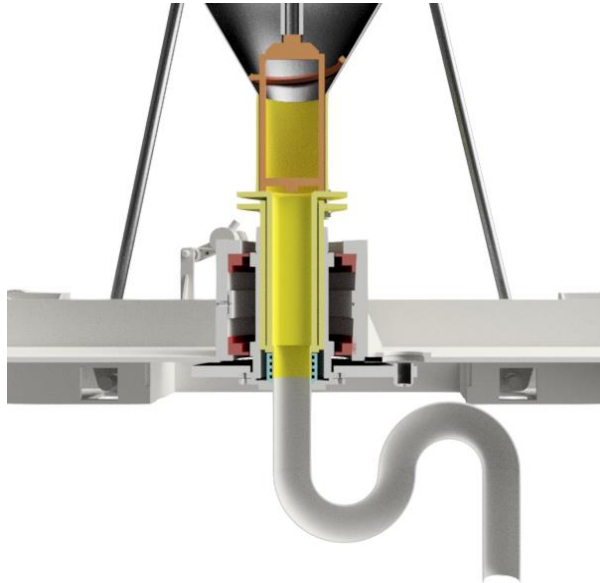


Obr. 36 Šroub s křídlovou hlavou zašroubovaný do čepu zavařeného do trubky

3.1.7. Volba o-kroužků na zařízení pro velkou tiskárnu

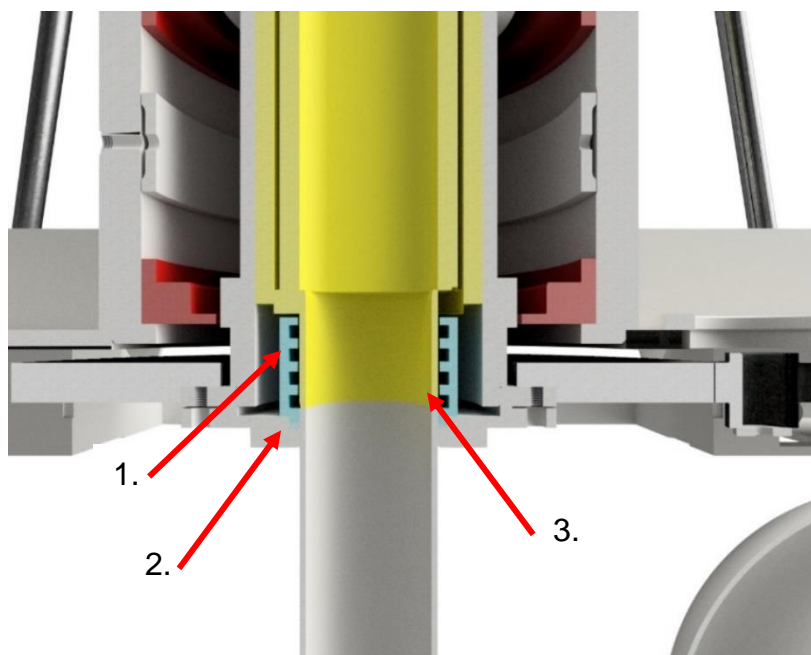
Tato kapitola se týká pouze stroje pro velkou tiskárnu, kde byla řešena otázka propojení míchacího zařízení s kočkou tiskárny tak, aby byl spoj dostatečně těsný a zároveň se mohl otáčet kolem osy.

Zvoleným řešením je zatěsnění s pomocí o-kroužků uložených v domku (Obr. 37, Obr. 38), jež je součástí kočky, do kterého se vsune výstup z míchacího zařízení se sraženou hranou. Na Obr. 37 lze také vidět sifon výstupního potrubí, které bude rotovat podél osy míchače.



Obr. 37 Pohled v řezu na zatěsnění pomocí o-kroužků uložených v domku

Toto řešení umožní poměrně snadnou montáž a demontáž míchacího stroje pro servisování a rovněž také přepravu. O-kroužky mohou být dodány např. firmou Rubena [20] a budou použity v počtu čtyř.



Obr. 38 Detail domku na o-kroužky (1. - modrá), jež je součástí kočky (2. - šedá), zatěsněno zasunutím výstupu z míchacího zařízení (3. - žlutá).

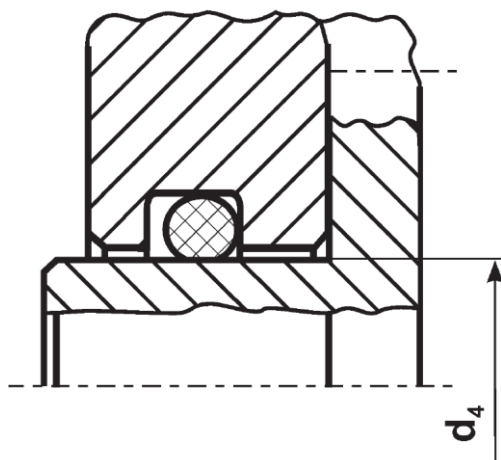
Toto těsnění bylo navrženo s pomocí katalogu „Těsnící prvky“ [21] od firmy Rubena. Hlavním faktorem pro danou volbu je kromě tlaku a rozsahu působících teplot také druh těsněného materiálu, dále pak také to, zda jde o utěsnění statické nebo dynamické.

V projektu míchacího zařízení pro velkou tiskárnu jde o zatěsnění dynamické (rotační pohyb výstupního potrubí), těsnit se bude suspenze - smíchaná betonová směs, nicméně by se nemělo stát, že by přes dosedací plochy prošla celá směs, pokud dojde k průsaku, tak prosákne pouze voda ze směsi. Tiskárna bude pracovat v teplotách odpovídajících jarním, letním a podzimním teplotám (cca +5 °C - +40 °C), v zimních měsících se kvůli zamrznání vody a dalším problémům (např. zrání betonu) tisknout nebude.

Na základě těchto informací byl navrhnout materiál s označením NBR70 (nitril-butadien-kaučuk), který pracuje v rozsahu teplot od -40 °C až +100°C, do tlaku 10 MPa, řízený normou DIN 3770, s vyšší tvrdostí pro lepší odolnost případnému abrazivnímu působení betonu při nepravděpodobné variantě průsaku kompletní směsi.

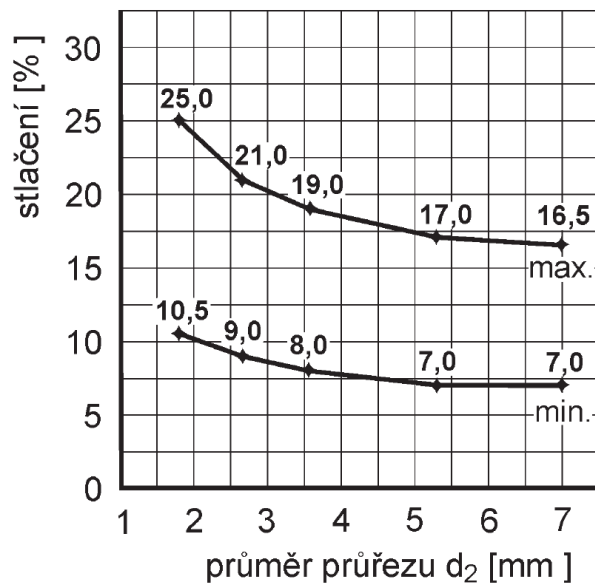
Pro volbu rozměrů je nutné zjistit potřebné stlačení o-kroužku. To se liší dle zatěsnění, pro tento případ jde o pohyblivé utěsnění. Pro pohyblivé utěsnění platí, že „střední stlačení o-kroužku se pohybuje mezi 14 -21 % (viz Obr. 40). Nejmenší stlačení nesmí klesnout pod 9 % u utěsnění pístu a pod 7 % u utěsnění pístnice“ [21]. Dále jde o radiální instalaci s těsněním vnitřním průměrem, jinak také utěsnění pístnice. Pro tuto instalaci je pak doporučeno kroužek obvodově stlačit od 2 až 3 %.

Těsnění vnitřním průměrem



Obr. 39 Schéma radiální instalace s těsněním vnitřním průměrem [21]

Hydraulický systém v pohybu



Obr. 40 Požadované stlačení o-kroužku pro hydraulický systém v pohybu

Vnější průměr trubky jež vystupuje z míchacího zařízení je 70 mm. Ze zkušenosti a z požadavku na dostatečnou tuhost byl zvolen o-kroužek s průměrem průřezu 6 mm označený jako „O-kroužek 70x 6 NBR70“ [20]. Potřebný vnitřní průměr drážky v domku pro tento kroužek pak je 82 mm, minimální stlačení průměru průřezu 7 % a maximální pak 16,8% (dle Obr. 40), doporučené obvodové stlačení zůstává 2 až 3 %. Požadovaných stlačení lze dosáhnout předepsáním tolerance na zmíněných průměrech a to tak, že vnitřní průměr drážky domku bude vyroben na rozměru $\varnothing 81_{-0,64}^{-1,64}$ a trubka na rozměru $\varnothing 72_0^{+0,52}$.

3.2. Ověření míchacího zařízení metodou konečných prvků

Téma této diplomové práce je hlavně konstrukčního charakteru se zaměřením na problematiku 3D tisku. Vzhledem silně vývojové povaze projektu, kdy na jednoho pracovníka připadá více rolí, však bylo také nutné provést analýzu navržené geometrie metodou konečných prvků (jinak také MKP) a případně z toho vyvodit příslušné konstrukční úpravy stroje. Na konec byla provedena modální analýza navržených konstrukcí.

Po návrhu pohonu (viz kapitola 3.1.5) a geometrie pro jeho ukotvení bylo nutné tuto geometrii ověřit a případně pozměnit dle výsledku analýzy. Prvním krokem tedy byla modelová zkouška chování prstence a příruby nesoucí hmotnost motoru a jeho kroutící moment. Zatížení se skládá z osového zatížení od hmotnosti převodové části motoru, ohybového zatížení od motoru ležícího mimo osu a od maximálního výstupního kroutícího momentu, zatím bez nádoby a zatížení od betonu. Všechny výpočty byly provedeny v programu ABAQUS.

Zatížení budou pro všechny následující výpočty stejná, proto jsou vypsána pro větší přehlednost v následující tabulce (Tab. 3).

Tab. 3 Druhy, velikosti a směry zatížení použitých pro MKP výpočet

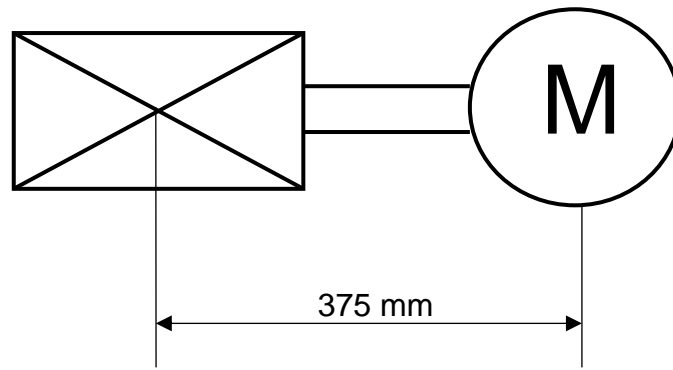
Druh zatížení	Velikost	Směr
Osová síla od převodovky	264 N	Osa Y
Ohybový moment od motoru	167,25 Nm	Otáčení mezi osami X a Z
Maximální výstupní moment převodového motoru	395 Nm	Otáčení kolem Y
Zatížení nádoby od betonu	1500 N	Osa Y

Osová síla od převodovky vznikla jako rozdíl hmotnosti motoru a převodovky, ohybový moment pak z hmotnosti motoru a vzdálenosti jeho těžiště od osy Y, maximální výstupní moment je odečten z dokumentace od výrobce a zatížení nádoby od betonu je dáno z požadavků zadavatele projektu.

Ohybový moment bylo nutné dopočítat ze vzdálenosti mezi osou Y a polohou těžiště motorové části pohonu (viz (8), (9) a Obr. 41). Další překážkou při zadávání ohybového momentu byla orientace 3D modelu v souřadnicovém systému programu, kvůli které bylo nutné rozložit ohybový moment od motoru do osy X a Z (viz (10), (11) a Obr. 42), případně X a Y dle orientace importovaného modelu.

$$G = m \times g = 44,6 \times 10 = 446 \text{ N} \quad (8)$$

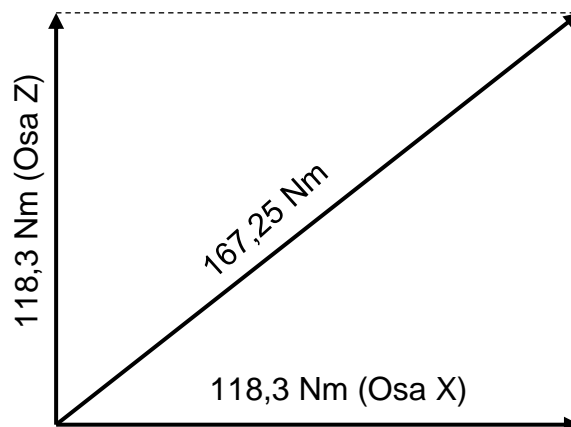
$$M_o = G \times a = 446 \times 0,375 = 167,25 \text{ Nm} \quad (9)$$



Obr. 41 Schéma pro dopočítání ohybového momentu od motoru

$$M_{\text{orozložený}} = \sqrt{M_{ox}^2 \times M_{oz}^2} \quad (10)$$

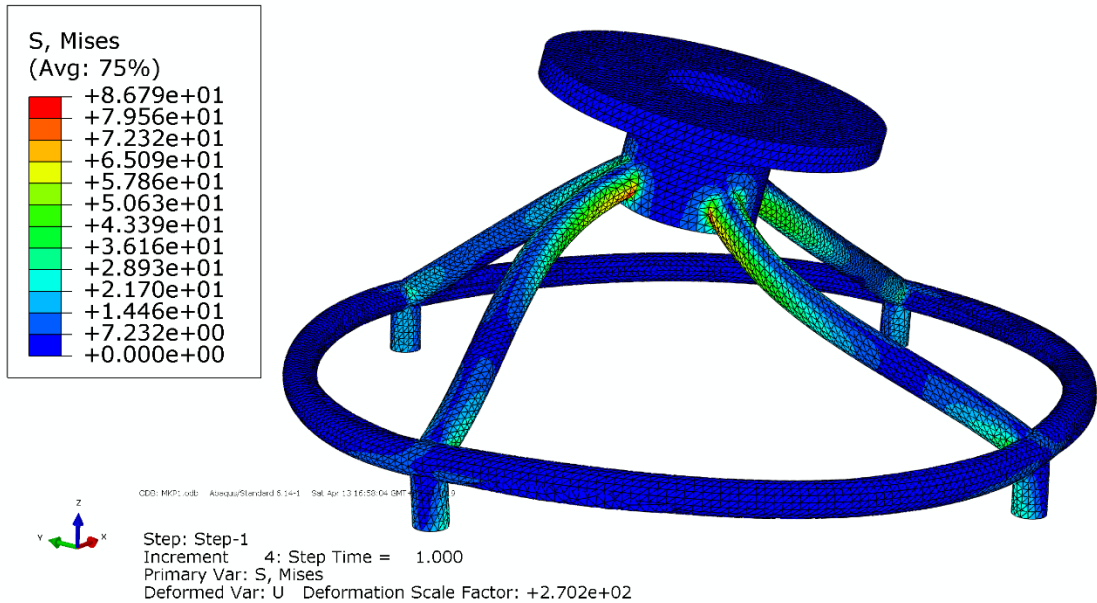
$$M_{ox} = M_{oz} = M_{\text{orozložený}} \times \frac{\sqrt{2}}{2} = 167,25 \times \frac{\sqrt{2}}{2} = 118,3 \text{ Nm} \quad (11)$$



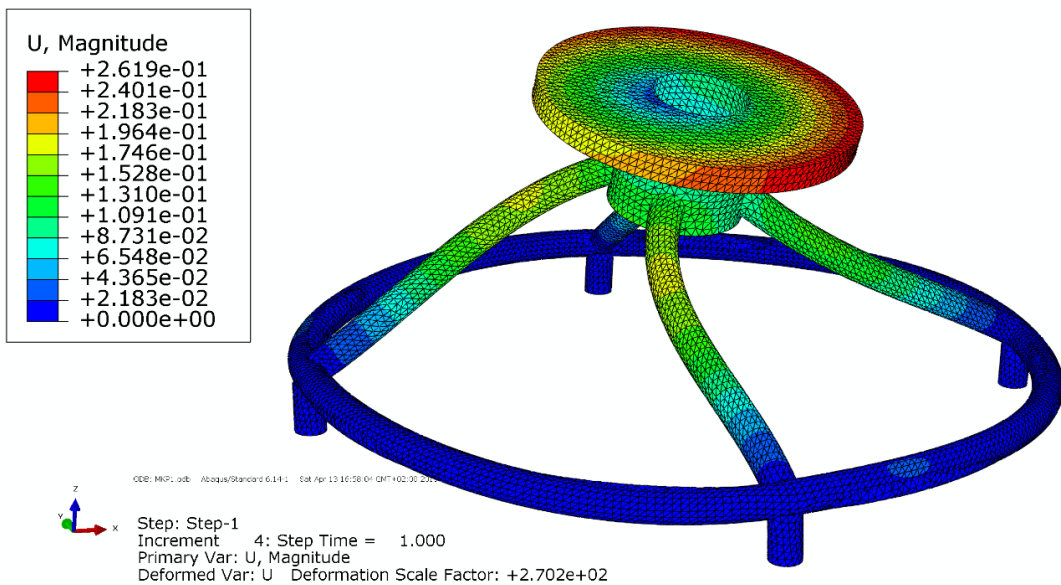
Obr. 42 Rozložení ohybového momentu od motoru pro zadání do programu ABAQUS

3.2.1. První výpočet

Pro první výpočet byla použita hrubší síť, neboť šlo pouze o ověření předpokládané deformace a zatížení této části konstrukce. Dle očekávání se konstrukce zkroutila zejména od momentu s nejvyšší hodnotou, tedy od maximálního výstupního momentu od motoru a také podle ohybového momentu (Obr. 43). Vzhledem k hodnotě nejvyššího napětí a posuvů lze říct, že takto navržená konstrukce vyhovuje (blíže bude vysvětleno v dalších odstavcích).



Obr. 43 Výsledek prvního výpočtu (jednotky napětí jsou v $N.mm^{-2}$)

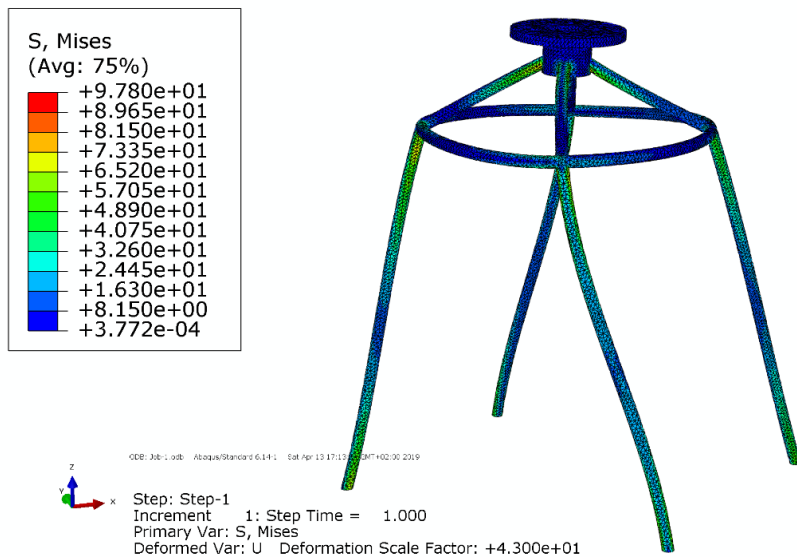


Obr. 44 Výsledek prvního výpočtu (jednotky posuvů jsou v mm)

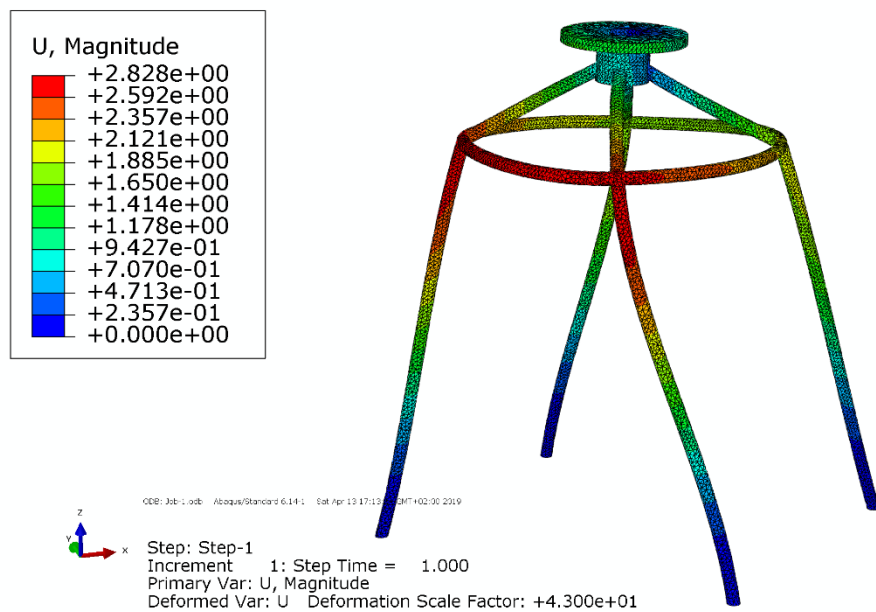
3.2.2. Druhý výpočet

Myšlenka druhého výpočtu byla totožná s prvním, opět bylo předmětem zájmu spíše ověření chování než zjištění konkrétních hodnot napětí a posuvů, tedy znovu byla použita hrubší síť a čtyřstěnné elementy. Rozdíl je však v přidání stojin stroje velké tiskárny. Největší faktor opět, podle očekávání, hraje výstupní moment z motoru, který se snaží zkroutit celou konstrukci kolem osy jeho rotace a ohybový moment od motoru naklánějící přírubu k jedné straně. Druhý výpočet názorně ukázal, jak bude docházet k roznesení deformace přes paprsky příruby do podpěr stroje. Nejvyšší posuv o velikosti 2,8 mm lze vzhledem k rozměrům celé konstrukce

považovat za bezproblémový. Rozhodující bude výsledek třetí části numerické analýzy míchacího zařízení provedené zvlášť pro malou a pro velkou tiskárnu.



Obr. 45 Výsledek druhého výpočtu (jednotky napětí jsou v $N.mm^{-2}$)



Obr. 46 Výsledek druhého výpočtu (jednotky posuvů jsou v mm)

3.2.2.1. Třetí výpočet

Geometrický model pro třetí a poslední simulaci byl pro zjednodušení, zlepšení jemnosti sítě a prevenci případných selhání výpočtu vymodelován jako plošný (Obr. 47, Obr. 48). Těmto plochám byla, po importu modelu ve formátu .step do programu ABAQUS, přiřazena tloušťka a vlastnosti materiálu.



Obr. 47 Plošný model pro numerickou analýzu míchacího zařízení velké tiskárny

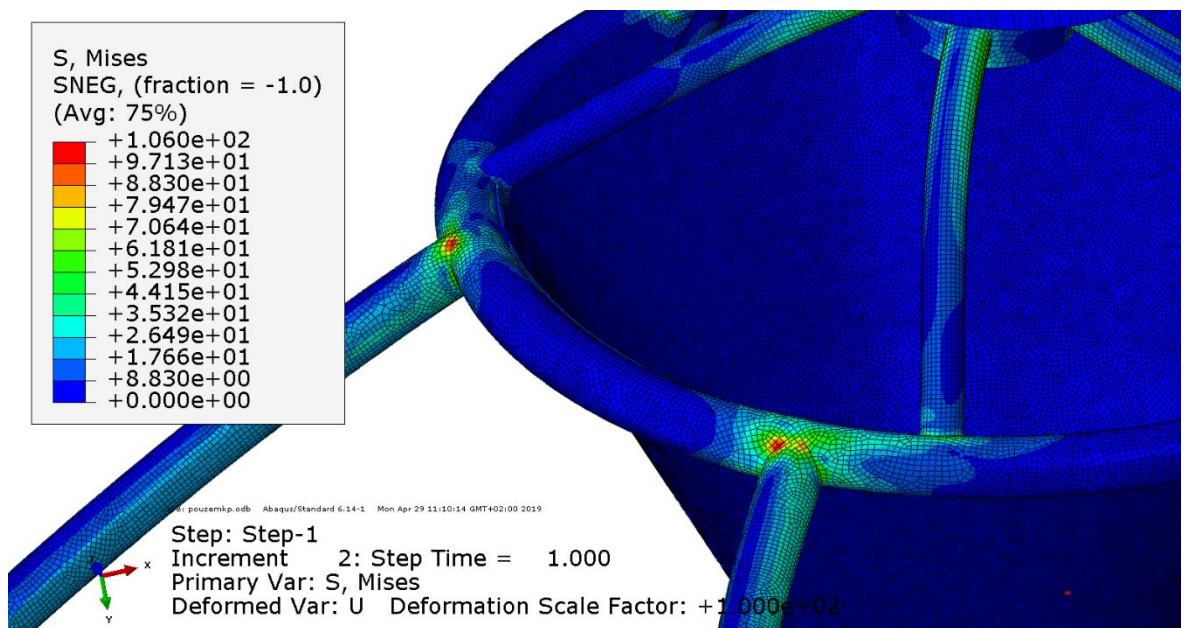


Obr. 48 Plošný model pro numerickou analýzu zařízení malé tiskárny

Vzhledem k tomu, že v žádné z těchto simulací nebylo cílem analyzovat konkrétní oblast, ale chování nosné konstrukce, byl vysítován celý model čtyřstěny v počtu kolem 248000 elementů, což by mělo zaručit dostatečnou přesnost a spolehlivost výpočtu. Zadané zatížení odpovídá zatížením popsáním v úvodu této kapitoly (viz Tab. 3). Rozdíl oproti předchozím dvěma výpočtům je v zahrnutí

nádoby na beton, a tedy uvažování hmotnosti betonu, čímž se tento výpočet přiblížil realitě nejvíce ze všech. Výsledky výpočtů budou popsány odděleně pro každou variantu tiskárny v odstavcích níže.

Výsledek numerické simulace míchacího zařízení pro malou tiskárnu ukázal, že zde existují místa, která by bylo vhodné upravit. Jde zejména o místa špičkových napětí v místě připojení stojiny k obruči stroje (viz Obr. 49), kde se vyskytuje napětí okolo 106 N.mm^{-2} . Přestože se takové napětí nemusí na první pohled zdát jako problematické, je třeba si uvědomit, že se nachází v místě, kde bude stojina přivařená k obruči (zakružené trubce) stroje.



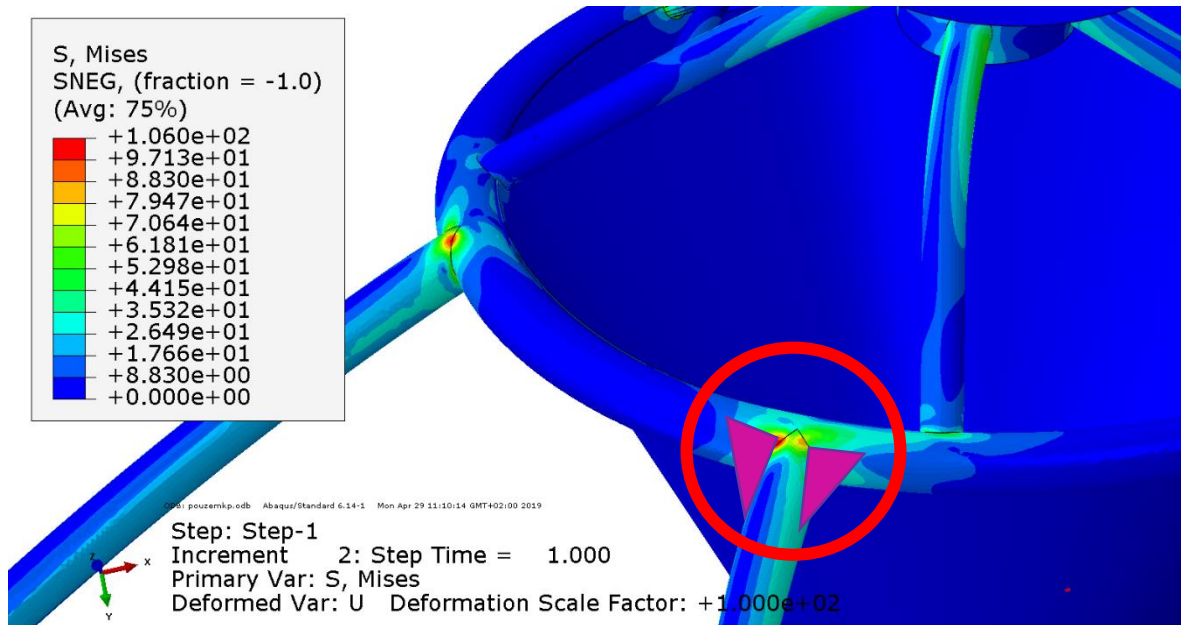
Obr. 49 Výsledek numerického výpočtu míchacího zařízení pro malou tiskárnu (jednotky jsou v N.mm^{-2})

Svařované místo bude tepelně ovlivněno a stojiny stroje, stejně jako obruč, jsou bezešvé přesné kruhové trubky D40x3 dodávané firmou Ferona a.s. [22]. Materiál těchto trubek je ocel 11375 s minimální mezí kluzu pro daný průměr trubky $R_{eH} = 225 \text{ N.mm}^{-2}$ (dle [23]). Vezmeme-li v potaz převodní součinitel svarového spoje $\alpha = 0,8$ (dle [24]) a není-li stanoveno jinak, koeficient bezpečnosti $k = 1,5$, dostaneme (12) maximální dovolené napětí.

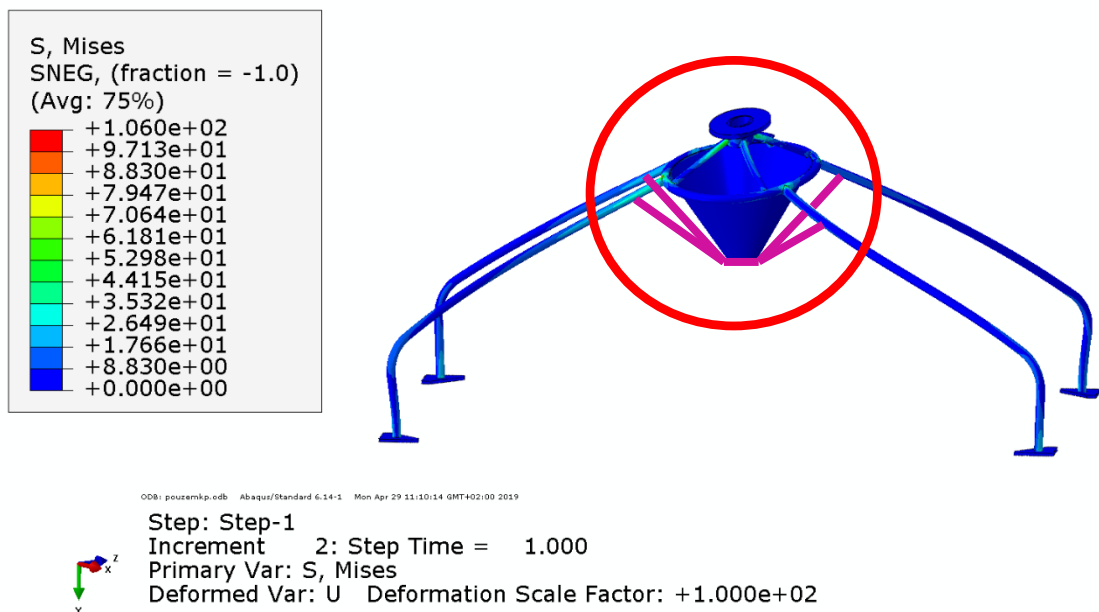
$$\sigma_d = \frac{R_{eH} \times \alpha}{k} = \frac{225 \times 0,8}{1,5} = 120 \text{ N.mm}^{-2} \quad (12)$$

Hodnota 120 N.mm^{-2} sice vyhovuje, nicméně koeficient bezpečnosti 1,5 se uvažuje pro statické zatížení, kdežto v reálném prostředí bude míchací zařízení zatěžováno i dynamicky (součinitel bezpečnosti $k = 2$ změní výsledek σ_d na hodnotu

90 N.mm⁻², kde už by daná konstrukce nevyhověla). Místo svaru bude tedy nutné upravit, přičemž možnosti vyztužení jsou naznačeny na Obr. 50, Obr. 51.

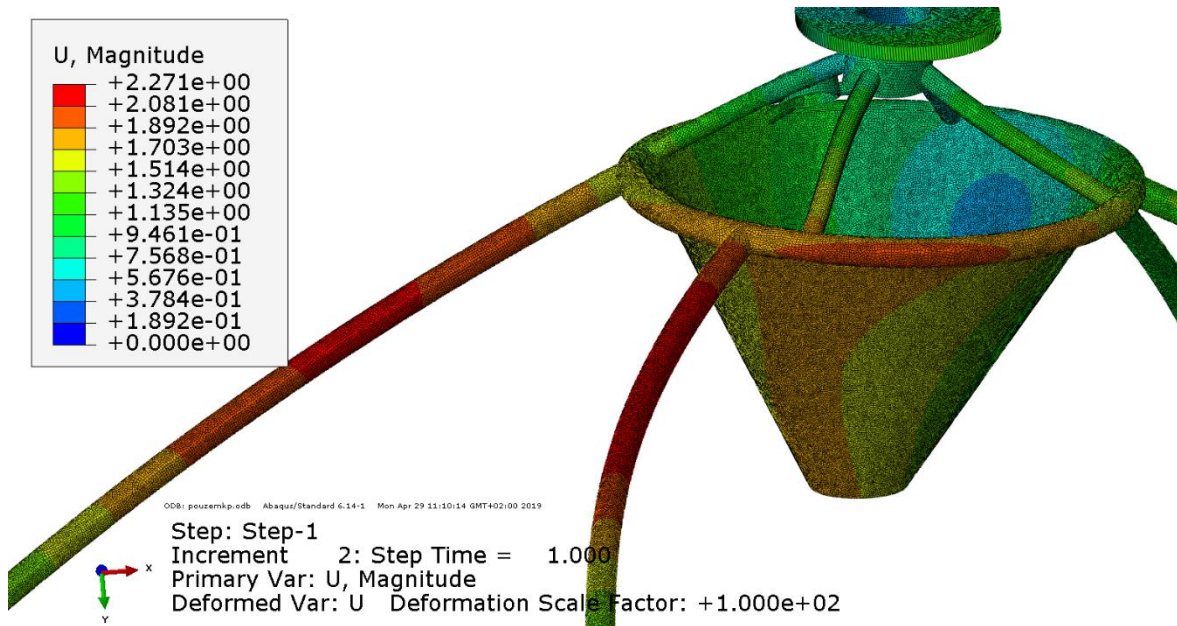


Obr. 50 Naznačení úpravy stroje pro malou tiskárnu - rozšíření trubky v místě spoje



Obr. 51 Naznačení úpravy stroje pro malou tiskárnu - podepření stojin žebry

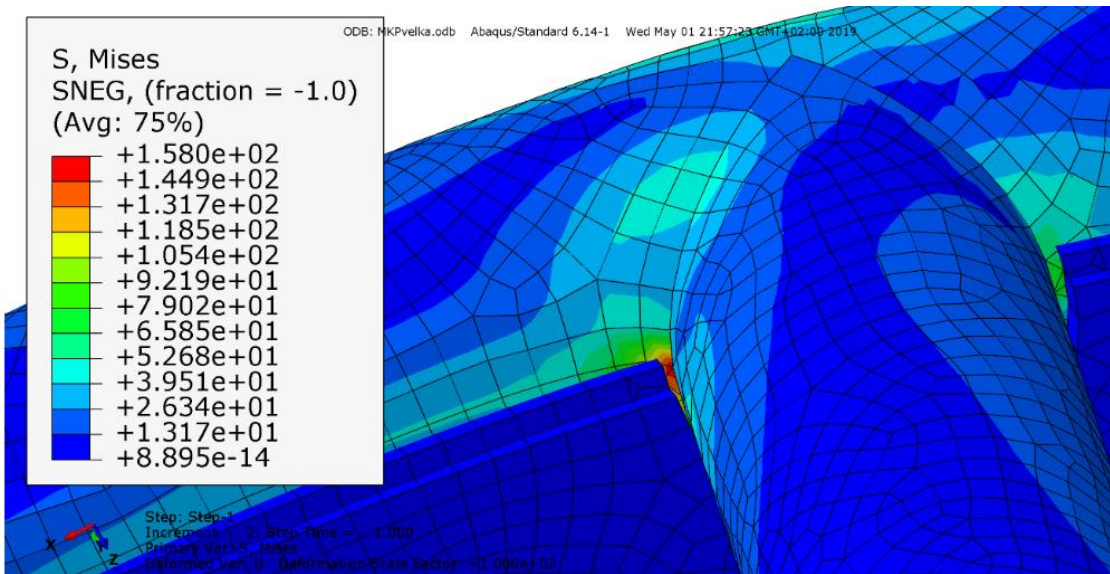
Maximální posuv této konstrukce (viz Obr. 52) pak činí 2,27 mm a vyskytuje se v oblasti levých bočních stojin (opačná strana, než kam přesahuje motor), což opět naplnilo předpoklady chování konstrukce. Vzhledem k délce stojin (1800 mm) a faktu, že jde o trubkový rám se značnými vřely a zejména proto, že konstrukční požadavek na přesnost je zde malý, lze tento posuv považovat za přijatelný.



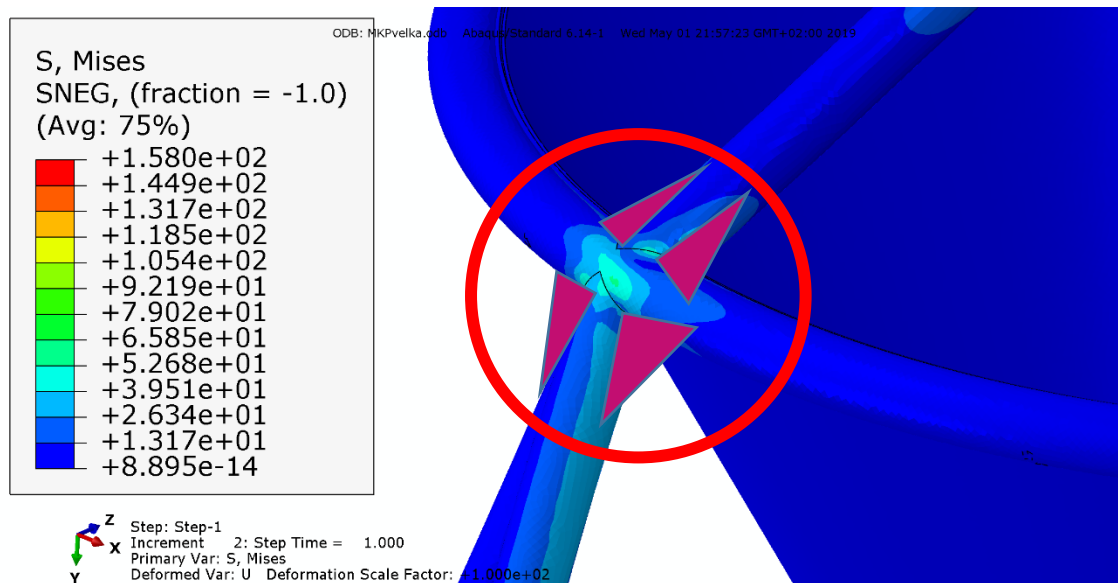
Obr. 52 Výsledek numerického výpočtu míchacího zařízení pro malou tiskárnu (jednotky jsou v mm)

Vzhledem ke značné geometrické podobnosti mezi geometrií míchacího zařízení pro použití na testovacím zařízení a na reálném stroji, vyšla MKP analýza druhého stroje, dle předpokladů, podobně stroji prvnímu. Místo s výskytem velkého špičkového napětí je tentokrát na vnitřní straně obruče (viz Obr. 53), kde bude přivařena stojina stroje a zároveň také vzpěra držící přírubu motoru. Tento uzel, kde se potkává stojina se vzpěrou, je z pohledu svařování obzvlášť problematický, protože obruč stroje pro velkou tiskárnu má průměr pouze D28x3, tedy je zde méně materiálu a navíc se bude k přírubě přivařovat z obou stran, tepelné ovlivnění oblasti tak bude značné. Argumentem pro toto konstrukční řešení byl fakt, že se zatížení od hmotnosti motoru přenesou přes tento bod rovnou do stojiny a obruč tak nebude zatěžována dalším ohybovým momentem. Maximální napětí činí $158 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$, a protože je trubka D28x3, dodávaná firmou Feron a.s., také z materiálu 11375, platí pro ni výpočet maximálního dovoleného napětí (12). Zde je nutné výsledek numerické analýzy blíže prozkoumat, protože i když na první pohled nevyhověl, což platí nejen pro statický výpočet s uvažovaným koeficientem bezpečnosti $k = 1,5$, ale zejména také z pohledu dynamiky, kdy se obvykle požaduje bezpečnost 2 a výše, tak je třeba si uvědomit, že jde pouze o jedno konkrétní místo na celém stroji (jinak se napětí pohybuje kolem $20 - 50 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$) a tato špička může být způsobena tvarem sítě (v místě je špička, viz Obr. 53). Dále bude v tomto místě housenka svaru, která sníží vliv koutu na koncentraci napětí, na druhou stranu bude mít materiál svaru horší vlastnosti a bude, jak již bylo řečeno, tepelně ovlivněn. Z těchto důvodů by bylo jistější konstrukci vyztužit (viz Obr. 54, Obr. 55.) a to zejména proto, že tento stroj je určený pro práci na velké tiskárně, kde bude jezdit v průběhu tisku spolu s kočkou ve směru všech os a je jasné, že účinek dynamického namáhání bude

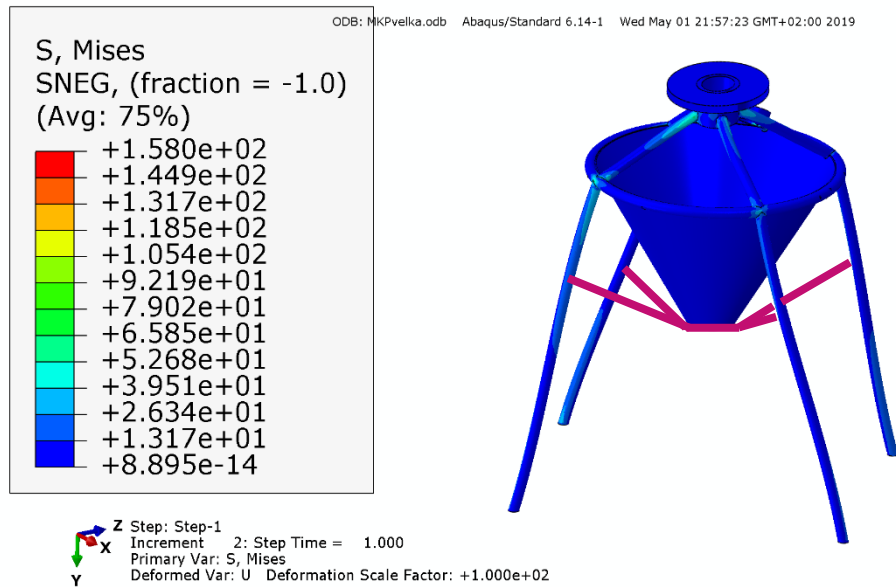
řádově větší než u stroje pro malou tiskárnu, kde k žádnému pohybu samotného míchacího zařízení nedochází.



Obr. 53 Výsledek numerického výpočtu míchacího zařízení pro velkou tiskárnu (jednotky jsou v $N.mm^{-2}$)

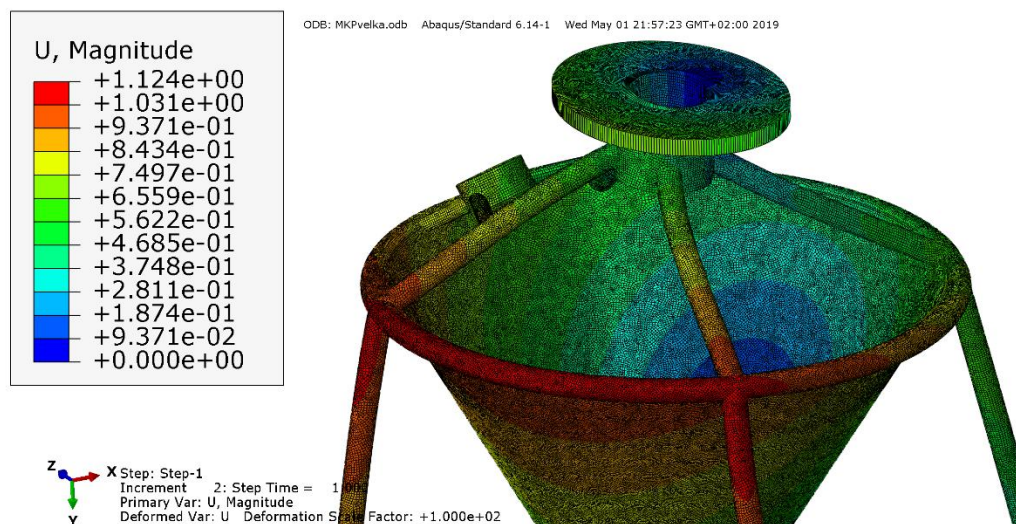


Obr. 54 Naznačení úpravy stroje pro velkou tiskárnu - rozšíření trubky v místě spoje



Obr. 55 Naznačení úpravy stroje pro velkou tiskárnu - podepření stojin žebry

S podobným výsledkem vyšly i posuvy. Maximální posuv činí 1,124 mm, opět v oblasti levých bočních stojin (opačná strana, než kam přesahuje motor), což je vzhledem k rozměrům konstrukce a nízkému konstrukčnímu požadavku na přesnost, zanedbatelné.



Obr. 56 Výsledek numerického výpočtu míchacího zařízení pro velkou tiskárnu (jednotky jsou v mm)

3.2.3. Modální analýza

Kromě pevnostní analýzy byla také provedena modální analýza. Míchací zařízení totiž bude při práci na obou variantách tiskárny vystaveno zejména vibracím od vlastního pohonu s převodovkou. Při výpočtu vlastních frekvencí byla uvažována hmotnost betonu a hmotnost motoru, stejně jako v předchozích

kapitolách. Vliv míchacího členu nebyl uvažován, protože na něm nejsou lopatky a neměl by tedy generovat frekvence (k periodickému kontaktu s tvrdšími částmi materiálu sice bude docházet, ale díky tvaru míchacího členu je jeho plocha zanedbatelná). Asynchronní motor bude řízen frekvenčním měničem v rozsahu 25 – 70 Hz, přičemž při 50 Hz pracuje s 1464 ot/min a výkon prochází dále převodovkou, jejíž výstupní otáčky při 50 Hz jsou 97 ot/min.

Předpokládané chování stroje ve vlastních tvarech bylo kývání se dopředu a dozadu, pohyb nahoru a dolů, kývání příruby a různé tvary pohybu stojin. Tyto předpoklady se naplnily a jeden z tvarů pohybu stojin na stroji pro malou tiskárnu se ukázal jako problematický.

Výsledek analýzy byl přenesen z programu ABAQUS do souboru v MS Excel, kde byly porovnány frekvence generované motorem a převodovkou s vlastními frekvencemi stroje pro malou a stroje pro velkou tiskárnu, což lze vidět v Tab. 4, Tab. 5 a Tab. 6.

Tab. 4 Frekvence generované motorem a převodovkou

Frekvenční měnič	Motor	Převodovka	Frekvenční měnič	Motor	Převodovka
Frekvence [Hz]	Otáčky [Hz]	Otáčky [Hz]	Frekvence [Hz]	Otáčky [Hz]	Otáčky [Hz]
25	12,2	0,808333333	48	23,424	1,552
26	12,688	0,840666667	49	23,912	1,584333333
27	13,176	0,873	50	24,4	1,616666667
28	13,664	0,905333333	51	24,888	1,649
29	14,152	0,937666667	52	25,376	1,681333333
30	14,64	0,97	53	25,864	1,713666667
31	15,128	1,002333333	54	26,352	1,746
32	15,616	1,034666667	55	26,84	1,778333333
33	16,104	1,067	56	27,328	1,810666667
34	16,592	1,099333333	57	27,816	1,843
35	17,08	1,131666667	58	28,304	1,875333333
36	17,568	1,164	59	28,792	1,907666667
37	18,056	1,196333333	60	29,28	1,94
38	18,544	1,228666667	61	29,768	1,972333333
39	19,032	1,261	62	30,256	2,004666667
40	19,52	1,293333333	63	30,744	2,037
41	20,008	1,325666667	64	31,232	2,069333333
42	20,496	1,358	65	31,72	2,101666667
43	20,984	1,390333333	66	32,208	2,134
44	21,472	1,422666667	67	32,696	2,166333333
45	21,96	1,455	68	33,184	2,198666667
46	22,448	1,487333333	69	33,672	2,231
47	22,936	1,519666667	70	34,16	2,263333333

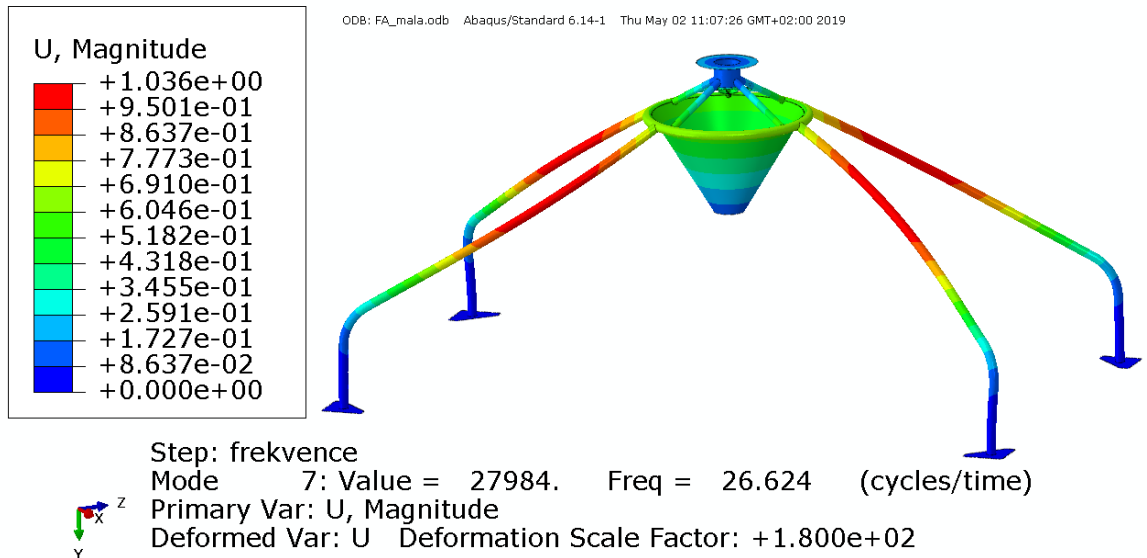
Tab. 5 Výsledek modální analýzy pro malou tiskárnu

Analýza stroje pro MALOU tiskárnu	
Tvar	Frekvence [Hz]
1	0,00781908
2	0,0100834
3	0,0144438
4	0,0229393
5	0,0362958
6	0,27128
7	26,624
8	59,048
9	59,055
10	59,057
11	74,878
12	74,943
13	76,067
14	76,148
15	80,479
16	149,17

Tab. 6 Výsledek modální analýzy pro velkou tiskárnu

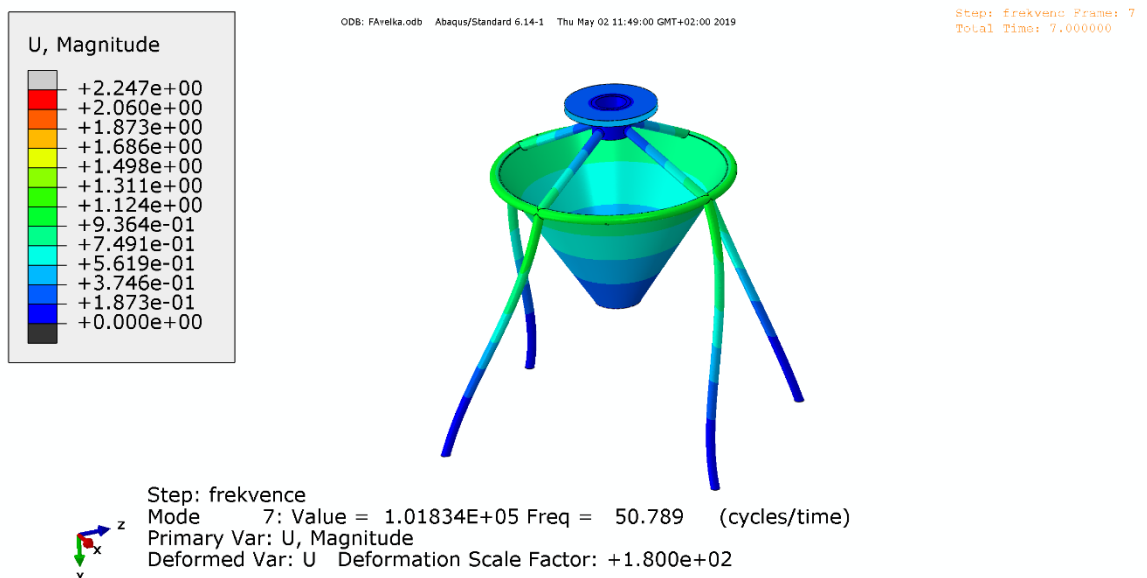
Analýza stroj pro VELKOU tiskárnu	
Tvar	Frekvence [Hz]
1	0,00671396
2	0,00771032
3	0,11879
4	0,11966
5	0,13823
6	0,28519
7	50,789
8	180,65
9	180,68
10	181,01

Z porovnání lze usoudit, že při současné konstrukci stroje pro malou tiskárnu existuje pouze jeden problematický vlastní tvar v přibližné hodnotě 26 Hz (Obr. 57), potkává se s frekvencí od motoru při nastavení frekvenčního měniče v oblasti kolem 54 a 55 Hz. Práci při tomto nastavení frekvenčního měniče je tedy nutné se vyhnout, při řízení ji lze rychle překonat a dál pracovat normálně. Vzhledem k tomu, že problematický je pouze jeden tvar, nejsou nutné konstrukční úpravy.



Obr. 57 Tvar problematické frekvence pro stroj na malou tiskárnu

Z analýzy stroje pro velkou tiskárnu vyplynulo, že není nutné z pohledu vlastních frekvencí provádět konstrukční změny, jelikož v celém rozsahu řízení frekvenčního měniče se nepotkaly vlastní frekvence konstrukce (Obr. 58) s frekvencemi od motoru a převodovky.



Obr. 58 Ukázka jednoho z vlastních tvarů stroje pro velkou tiskárnu

3.3. Dopravní trasa

Cílem této části práce je analyzovat dopravní trasu velké tiskárny pro míchací zařízení. Trasa malé tiskárny není v této části řešena, protože bude řešena podle aktuální potřeby uživatele. Co je známo, je omítací čerpadlo FILAMOS C20 COM-V [25], které bude použito pro dopravu a namíchání směsi pro malou tiskárnu.

Dopravní trasa velké tiskárny zahrnuje zařízení pro předmíchání betonu, pumpu a hadice (viz Obr. 13), přičemž všechna tato zařízení budou nakupována a je tedy nutné udělat rešerši existujících způsobů dopravy včetně dodavatelů těchto produktů. Z úvodních jednání je dáno, že maximální dopravní výška bude 12 m a celková předpokládaná délka potrubí maximálně 50 m, požadovaný průtok 30 l/min a maximální zrnitost směsi 4 mm.

Důležitým rozhodnutím, které bylo na začátku nutné učinit je, zda dopravovat předmíchanou betonovou směs mokrou nebo suchou. Pro usnadnění rozhodování bylo tedy nutno nastudovat problematiku mokrého čerpání betonu a dopravy pneumatické. Přestože hydraulická doprava je od mokrého čerpání betonu odlišná, zejména tím, že na konci dopravní trasy dochází k odloučení dopravní kapaliny, zatímco u mokrého čerpání betonu je kapalina součástí směsi, tak ale mnohá úskalí (opotřebením abrazí), stejně jako výhody (absence prašnosti) tohoto způsobu dopravy jsou podobné, proto bylo přistoupeno k rešerši problematiky hydraulické dopravy se zaměřením na aplikaci poznatků pro mokré čerpání betonu.

3.3.1. Hydraulická doprava

Hydraulická doprava je celosvětově rozšířený způsob dopravy pevných částic. Obecně je považována za cenově efektivní, bezpečnou a ekologickou. V některých případech (např. při odstraňování sedimentu ze dna nádrže) nemá reálně použitelnou alternativu. Hydraulická doprava je založena na principu proudění kapalné fáze, která unáší fázi pevnou. Při proudění kapaliny dochází k víření, jež nadnáší pevné částice ve směru proudění kapaliny. Platí, že čím větší je rychlost proudění, tím více částic proud unese. Využití hydraulické dopravy je ovlivněno jejími vlastnostmi. [26] [27]

3.3.1.1. Výhody a nevýhody hydraulické dopravy

Mezi kladné vlastnosti patří velký dopravní výkon a jednoduchost technologického zařízení, díky ekologičnosti je možné vést potrubí i v zastavěných aglomeracích a v neposlední řadě je zde snadná automatizace procesu. [26] [27]

Negativní vlastností je problematika použití této technologie při nízkých teplotách. [26] [27]

3.3.1.2. Rozdělení hydraulické dopravy dle použití

Dělení lze provést dle provozního tlaku, použitého technologického zařízení, délky dopravy nebo oběhu provozní doby a dalších hledisek. Dle provozního tlaku dělíme hydraulickou dopravu na samospádovou a tlakovou. Samospádová je poháněna gravitací žlaby, koryty či potrubím s volnou hladinou. Tlaková doprava se uskutečňuje výhradně v dopravním potrubí a dále se dělí na dopravu nízkotlakou (podtlakovou) a vysokotlakou. Nízkotlakové dopravní linky se používají na dopravu na krátké vzdálenosti (1-3 km). Součástí potrubí je bagrovací čerpadlo, ejektor nebo jejich kombinace. Hydraulická vysokotlaková doprava je schopna dopravit materiál do vzdálenosti desítek kilometrů a do dopravních výšek v řádu stovek metrů při pracovním tlaku až 15 MPa. [26] [27]

3.3.2. Pneumatická doprava

Pneumatická doprava je rovněž velmi rozšířená a je jí využíváno prakticky ve všech průmyslových odvětvích. Je velmi vhodná pro dopravu suchých, nelepivých, nespékavých, práškovitých nebo zrnitých (ideálně stejnozrnitých) materiálů. Dopravní vzdálenosti se pohybují od desítek metrů až po stovky metrů. Z fyzikálního pohledu je pneumatická doprava podobná dopravě hydraulické. Jde totiž o dopravu soustavy pevná fáze-vzduch. Základní vztahy jsou tedy podobné nicméně na rozdíl od hydraulické dopravy, kde je nosným médiem tekutina, je u pneumatické dopravy nosné médium plyn, což způsobuje komplikace v návrhu a výpočtech tohoto typu dopravníku. [26] [27]

3.3.2.1. Výhody a nevýhody pneumatické dopravy

Mezi výhody pneumatické dopravy patří široký rozsah dopravních výkonů (od několika desítek až po desítky tun za hodinu), vhodnost použití pro přepravu materiálů značně práškových, zdraví škodlivých či jinak zdravotně závadných, a to z důvodu samotné podstaty pneumatické dopravy jež zajišťuje prachotěsnost. [26] [27] [28]

Jak již bylo řečeno, pneumatická a hydraulická doprava jsou z fyzikálního pohledu velmi podobné, nicméně kvůli plynnému dopravnímu médiu pneumatické dopravy přibývá ve výpočtech stavová rovnice, která přináší do výpočtů další proměnné. Vzhledem k tomu, že má vzduch nižší hustotu, je pro vyvolání vztlačových sil nutné zajistit vyšší rychlosti, což nás nutí do výpočtů uvažovat i setrvačné síly. Podle článku „*Do not underestimate danger of explosion; Even dust can destroy equipment and kill*“ [28] je dalším velkým nebezpečím výbušnost při práci se sypkými organickými směsmi (mouka, cukr, uhelný prach a další). K explozi může dojít při mletí, sušení, pneumatické či mechanické dopravě a dokonce i při skladování. [26] [27] [28]

Přestože jsou pneumatické potrubní systémy z principu funkce uzavřené, tedy prachotěsné, problematika prašnosti při aplikaci na 3 D tiskárnu zůstává. Pro získání tisknutelné směsi musí před její aplikací dojít ke smísení se záměsovou vodou, což představuje riziko úniku prachu do ovzduší. Při očekávané venkovní aplikaci tiskárny by tedy při jejím zmoknutí hrozila tvorba betonových nárůstků např. na pojezdech stroje, což by představovalo velké riziko pro bezproblémovou funkčnost celého stroje. Posledním zmíněným nedostatkem pneumatické dopravy je potřeba odlučovačů na konci dopravní trasy. Konec dopravní trasy je kočka stroje, kde není dostatek místa pro odlučovač, míchačku, pohony kočky a další zařízení nutné pro správnou funkci systému.

Vzhledem k těmto nedostatkům se jako lepší způsob dopravy jeví mokré čerpání betonu. Dále bude tedy v tomto textu pracováno právě s touto variantou.

3.3.3. Výpočet potrubí

Protože proudění probíhá v hadicích a změny rychlosti proudění budou pomalé, lze považovat proudění v hadicích za stacionární jednorozměrné proudění nestlačitelné vazké tekutiny. [29]

3.3.3.1. Základní vztahy pro výpočet

Tlakový spád, jinak tlaková ztráta, je spolu s dopravní rychlostí jedním z technicky nejdůležitějších údajů hydraulické dopravy. Tlaková ztráta závisí téměř na všech hydrodynamických i fyzikálních parametrech suspenze. Jmenujme některé nejdůležitější: dopravní rychlost, drsnost, průměr potrubí, koncentrace a velikost částic. Pro drsnost potrubí, vliv spojů, oblouků a vestavěných armatur platí stejné zásady jako pro proudění čisté vody, tedy zahrneme-li tyto ztráty do výpočtu jako pro čistou vodu, bude jejich vliv dostatečně zdůrazněn i pro tlakovou ztrátu suspenze. [26] [27]

Tlaková ztráta je složena ze ztráty třením podél obtékaného povrchu $\Delta p_z \lambda$ a ztrát lokálními odpory $\Delta p_z \zeta$. [30]

Další důležité vztahy jsou:

Rovnice kontinuity (13) vyjadřující zákon zachování hmoty.

$$Q_v = \frac{Q_m}{\rho} = S \times c \quad (13)$$

Bernoulliho rovnice (14) jako zákon zachování energie,

$$\begin{aligned}
 h_1 \times \rho \times g + p_1 + \frac{1}{2} \times \rho \times c_1^2 \times \kappa_1 & \quad (14) \\
 = h_2 \times \rho \times g + p_2 + \frac{1}{2} \times \rho \times c_2^2 \times \kappa_2 &
 \end{aligned}$$

kteřou je potřeba doplnit o vzorec pro součet tlakové ztráty třením (15).

$$\Delta p_z \lambda = \lambda \times \frac{l}{d} \times \frac{c^2}{2} \times \rho \quad (15)$$

a tlakové ztráty lokálními odpory (16).

$$\Delta p_z \zeta = \zeta \times \frac{c^2}{2} \times \rho \quad (16)$$

Kde λ (17) je součinitel laminárního tření.

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (17)$$

Vztah pro určení Reynoldsova čísla (18).

$$Re = \frac{d \times c}{\nu} \quad (18)$$

Vztah mezi kinematickou a dynamickou viskozitou (19).

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (19)$$

[29] [30]

3.3.3.2. Dosazení

Vstupní hodnoty (Tab. 7) byly zadány do výpočtového Excelu, tedy dosazeny do výše uvedených vzorců, jak je vidět níže.

Tab. 7. Vstupní hodnoty pro výpočet potrubí.

Požadovaný objemový průtok Q_v [l/min]	30
Délka potrubí [m]	50
Max. pracovní výška [m]	12
Zvolený průměr potrubí d [mm]	51
Hustota betonu ρ [kg/m ³]	2350
Zrnitost betonu [mm]	4

Dynamická viskozita betonu η [Pa.s]	20
Požadovaný tlak na trysce p_2 [Pa]	0
Gravitační zrychlení g [m/s ²]	9,81
Součinitel místních ztrát ζ [-]	15,31

Součinitel místních ztrát ζ lze získat zadáním počtů ztrátových míst jako jsou kolena, oblouky, vtoky a výtoky z potrubí do webového rozhraní [31]. Jeho vliv na výsledný tlak je však zanedbatelný.

Dále je nutné zjistit hodnotu Reynoldsova čísla, pro jehož určení byly rovnice (13), (18) a (19) upraveny do tvaru umožňujícího jeho určení rovnou z požadovaného hmotnostního průtoku.

$$Re = \frac{4 \times Q_v \times \rho}{\pi \times d \times \eta} = \frac{4 \times 0,0005 \times 2350}{3,14 \times 0,051 \times 20} = 1,467 \quad (20)$$

Z tohoto výpočtu je patrné že platí $Re < 2300$ a proudění je tedy laminární.

Poté je potřebné znát rychlost proudění v potrubí kruhového průřezu, pro jejíž výpočet byla použita rovnice kontinuity (13). Plocha průřezu potrubí se určí následovně:

$$S = \frac{\pi \times d^2}{4} = \frac{3,14 \times 0,051^2}{4} = 0,002 \text{ m}^2 \quad (21)$$

Rychlost proudění je pak:

$$c = \frac{Q_v}{S} = \frac{0,0005}{0,002} = 0,245 \text{ m/s} \quad (22)$$

Před dosazením do Bernoulliho rovnice je nutné spočítat tlakovou ztrátu třením z Weissbachova vztahu (15). Vhodné je nejprve určit součinitel laminárního tření λ .

$$\lambda = \frac{64}{Re} = \frac{64}{1,467} = 43,63 \quad (23)$$

Tlaková ztráta třením je pak:

$$\begin{aligned} \Delta p_z \lambda &= \lambda \times \frac{l}{d} \times \frac{c^2}{2} \times \rho = 43,63 \times \frac{50}{0,051} \times \frac{0,245^2}{2} \times 2350 \\ &= 3011267,916 \text{ Pa} \end{aligned} \quad (24)$$

Tlaková ztráta lokálními odpory:

$$\Delta p_z \zeta = \zeta \times \frac{c^2}{2} \times \rho = 15,31 \times \frac{0,245^2}{2} \times 2400 = 1077,687 \text{ Pa} \quad (25)$$

Nyní již lze určit celkovou tlakovou ztrátu:

$$\Delta p_z = \Delta p_{z\lambda} + \Delta p_z \zeta = 3011267,916 + 1077,687 = 3012345,6 \text{ Pa} \quad (26)$$

Další potřebný údaj je celkový potřebný tlak p_1 , z Bernoulliho rovnice (14), kterou upravíme na podmínky, ve kterých bude tiskárna fungovat. Pro rychlosti c_1 a c_2 platí $c_1 = c_2$. Coriolisův součinitel κ se bere pro laminární proudění roven dvěma. Hladina $h_1 = 0$ a hustota ρ zůstane stejná. Tlak p_2 si můžeme zvolit dle potřeby tlaku na trysce. Po úpravě nakonec dostaneme rovnici (27).

$$p_1 = \rho \times g \times h_2 + p_2 + \Delta p_z = 2350 \times 9,81 \times 12 + 0 + 3012345,6 = 3288987,6 \text{ Pa} \quad (27)$$

Tlak p_1 je tlak s jehož znalostí může být navržena hadice a spodní míchačka pro dopravu směsi k horní míchačce a trysce. [29] [30]

3.3.4. Hadice

Hadice na dopravu abrazivních hmot prodává více dodavatelských firem. Mezi známé patří GMS velkoobchod s.r.o. [32], GUMEX, spol. s.r.o. [19], Hadice Průcha [33], FoMi Hadice [34] a TUBES International s.r.o. [35].

Tyto hadice jsou určeny pro dopravu betonu, sádry nebo cementu. Kromě TUBES International s.r.o. a GUMEX, spol. s.r.o. dodávají všichni výrobci hadice Bautec a jsou cenově srovnatelní.

Hadice Bautec 125 plně vyhoví potřebám tohoto projektu a její koncovky jsou navíc rovnou kompatibilní s uvažovanými čerpadly značky Schwing anebo Putzmeister. Dále tedy budeme pracovat s touto variantou hadice. Případnou alternativou by mohla být hadice SM40 s koncovkami Kamlok, dodávaná firmou GUMEX, spol. s.r.o. Zde by však bylo potřeba dále analyzovat, zda jsou její koncovky kompatibilní s čerpadly a zda je max. pracovní tlak 40 bar dostačující. Firma GUMEX, spol. s.r.o. se zabývá i osazováním koncovek, takže je možné, že by se koncovky Kamlok daly případně nahradit jinými.

Jako nejvhodnější se jeví dodavatel GMS velkoobchod s.r.o. Je schopen dodat hadice včetně příslušenství jako jsou čistící koule a válce, spojky a jejich těsnění.

Srovnání těchto dvou variant je v tabulce (Tab. 8).

Tab. 8. Srovnání hadic.

Značka	Bautec	GUMEX, spol. s.r.o.
Model (zároveň odkaz)	125	SM40
Dopravní tlak [bar]	85	40
Vnitřní průměr [mm]	51	50
Vnější průměr [mm]	75	68
Poloměr ohybu [mm]	350	250
Pracovní teplota [°C]	-40 až + 70	-35 až +80
Typ koncovky	Victaulic	Kamlok
Kompatibilita	Putzmeister, Schwing	Na vyžádání
Dopravovaná směs	Abrazivní materiály	Beton, cement, sádra
Cena (přibližně) [Kč/m]	1300 (při min. délce 10 m)	700 (při min. délce 10 m)

3.3.5. Čerpadlo

Vzhledem k poměrně specifickým vlastnostem betonu pro 3 D tisk, nároku tiskárny na objemový průtok a délce potrubní trasy, je správný výběr pumpy poměrně obtížný. Při tvorbě rešerše pump se vycházelo z předpokladu, že používaná směs se vlastnostmi bude blížit řidšímu betonu s menší zrnitostí. Z tohoto pohledu pak připadají v úvahu omítačky, šneková čerpadla a pístová čerpadla. V tomto pořadí, od nejslabšího k nejvýkonnějšímu, jsou rovněž stroje i z hlediska dopravního množství, tlaku, maximální zrnitosti, ale i ceny a vhodnosti použití.

Na českém trhu je velkým dodavatelem firma TONSTAV-SERVICE s.r.o. [12]. Tato firma dodává pístová čerpadla, šneková čerpadla a omítačky. Zaměřuje se zejména na značky Putzmeister [36] a její dceřinou značku Birkmann [37]. Produkty od firmy Putzmeister jsou kompatibilní s hadicí Bautec 125. Další firmou, která dodává produkty kompatibilní s hadicemi Bautec je firma SCHWING Stetter Ostrava s.r.o. [38]. Stavební pumpy Italské značky mECBO [39] dodává v České republice firma RICHTER DIESEL s.r.o. [40]. Pro rešerši omítacích strojů bylo použito i stránky firmy m-tec CZ, s.r.o. [41]. Nicméně se ukázalo, že omítací stroje obecně

nejsou pro požadovanou aplikaci dostačující. Vzhledem k ceně a parametrům se jako optimální jeví šnekové čerpadlo Putzmeister SP11TMR (Obr. 60).

Srovnání vlastností jednotlivých strojů lze vidět v Tab. 9., potřebné provozní hodnoty pak v Tab. 7.

Tab. 9. Srovnání čerpacích strojů.

Kategorie	Pístová čerpadla	Pístová čerpadlo	Pístová čerpadla	Pístová čerpadla
Značka	Putzmeister	Putzmeister	Schwing	mECBO
Model (zároveň odkaz)	P715TD	P718TD	SP305	Fattorino P2
Dopravní tlak [bar]	68	68	43	70
Dopravní množství (maximální) [m ³ /min]	0,29	0,29	0,38	0,25
Dopravní vzdálenost [m]	300	300	244	Neuvedena
Dopravní výška [m]	100	100	60	Neuvedena
Maximální zrnitost [mm]	16	32	25	Neuvedena
Dopravovaný materiál	Cement, jemný beton, samonivelační beton	Univerzální	Beton	výkonná pumpa kombinovaná s 750 l míchačkou
Hmotnost [kg]	1850	2320	1520	
Typ motoru	Diesel/ Elektromotor	Diesel/ Elektro	Diesel	Diesel/ Elektro
Výkon motoru [kW]	34,5	34,5/ 30	36	55/75
Cena [Kč] (přibližně)	1 800 000	2 000 000	Na vyžádání	Na vyžádání
Kategorie	Šneková čerpadla	Šneková čerpadla	Šneková čerpadla	Šneková čerpadla
Značka	Putzmeister	Brinkmann	Putzmeister	Brinkmann
Model (zároveň odkaz)	SP11TMR	FE400	Mixokret M740D	Estrich Boy DC 450
Dopravní tlak [bar]	35	40	8	7
Dopravní množství (maximální) [m ³ /min]	0,075	0,25	4,35	3,8
Dopravní vzdálenost [m]	70	180	120	120
Dopravní výška [m]	50		60	60
Maximální zrnitost [mm]	6	8	8	8
Dopravovaný materiál	Vápno, vápnocement, samonivelační potěr	Podlahový beton	Potěrový beton	Potěrový beton

Hmotnost [kg]	900	Neuvedena	1542	1600
Typ motoru	Diesel	Neuvedeno	Diesel	Diesel
Výkon motoru [kW]	22,7	Neuvedeno	33,5	31,5
Cena [Kč] (přibližně)	800 000	Na vyžádání	1 000 000	1 000 000
Kategorie	Omítačky	Omítačky	Omítačka + čerpadlo	Omítačky
Značka	Putzmeister	PFT	m-tec	m-tec
Model (zároveň odkaz)	MP25 Mixit	G4	M300+FC300	M300
Dopravní tlak [bar]	40	30	Neuvedeno	30
Dopravní množství (maximální) [m ³ /min]	0,025	0,085	0,23	0,047
Dopravní vzdálenost [m]	40	50	60	50
Dopravní výška [m]	15	Neuvedeno	40	30
Maximální zrnitost [mm]	4	Neuvedeno	4	4
Doprovazovaný materiál	Izolační omítky, vnitřní omítky	Cementové omítky, stěrky, sádrové omítky, spárovací malty	Pouze pumpa doplňující M300	Sádrové omítky, malta ke zdění, samonivelační potěry, tmely
Hmotnost [kg]	240	279		270
Typ motoru	Elektromotor	Elektromotor	Elektromotor	Elektromotor
Výkon motoru [kW]	5,5	7,5	4	2,2
Cena [Kč] (přibližně)	Na vyžádání	180 000	Na vyžádání	Na vyžádání



Obr. 59 Pístové čerpadlo Putzmeister P718TD [36]



Obr. 60 Šnekové čerpadlo Putzmeister SP11TMR [36]



Obr. 61 Směšovací čerpadlo-omítací stroj m-tec M330 [41]

3.3.6. Míchačka

Podle plánu tiskárny bude vedle portálového stroje stát silo s betonovou směsí. Vyhledal jsem tedy firmy vyrábějící anebo dodávající horizontální kontinuální míchačky připojitelné na silo. Mezi tyto firmy patří firma Knauf PFT [14], firma Filamos s.r.o. [13] a firma m-tec CZ, s.r.o. [41].

Z pohledu míchacího výkonu vyhoví našim požadavkům všechny nalezené míchačky. Stejně tak z pohledu maximální zrnitosti. Všechny míchačky jsou schopné míchat směs se zrnitostí 4 mm a míchačka HM5 od firmy Knauf PFT zvládne až 8 mm. Míchačka KM40 od firmy Filamos s.r.o. může být doplněna frekvenčním měničem pro plynulou regulaci výkonu. Rozhodujícím faktorem tedy bude cena, servis a kompatibilita s dalšími prvky dopravního řetězce.

Srovnání nalezených míchaček je v Tab. 10, potřebné provozní hodnoty pak v Tab. 7.

Tab. 10 Srovnání horizontálních kontinuálních míchaček

Značka	PFT	PFT	Filamos	m-tec
Model	HM24	HM5	KM40	D50
Míchací výkon [l/min]	35	45	40	50
Zrnitost [mm]	4	8	4	4
Rozsah použití	Zdicí malta, cementové omítky, směs na litou podlahu	Univerzální	spárovací malty, vyrovnávací hmoty	Malta ke zdění, jemný beton
Pohon	Převodový motor 400 V, 3,5kW	Převodový motor 400 V, 5,5kW	380 V, 5,5	400 V, 4kW
Připojení vody a tlak [bar]	3/4, 2,5	3/4, 2,5	G3/4	G3/4, 2,5
Hmotnost [Kg]	110	174	271	220
Cena [Kč]	Na vyžádání	Na vyžádání	Na vyžádání	Na vyžádání



Obr. 62 Míchačka m-tec D50

4. Závěr

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout míchací zařízení pro finální úpravu stavební hmoty pro 3D tiskárnu budov a vývoj betonové směsi. Model byl vytvořen v programu Autodesk Inventor a numerická analýza provedena v programu Abaqus.

Aby bylo možné dosáhnout vytyčených cílů, byla práce rozdělena do dvou hlavních částí. Praktická část pak byla rozdělena do více podkapitol dle jednotlivých dílčích témat.

V rámci teoretické části byl čtenáři okrajově představen 3D tisk, následně podrobně rozepsána historie 3D tisku ve stavebnictví včetně představení významných projektů a firem, které na tomto poli působí. Důležitý zmíněný způsob je 3D tisk betonové směsi představený v roce 1998 Dr. Behrokh Khoshnevis a jeho technika nazvaná Contour Crafting. Hodnotný je také výzkum univerzity Loughborough, významným průkopníkem je šanghajská firma WinSun, či americká Total Kustom, a za zmínku stojí přístup pana Enrica Dini, zakladatele a majitele firmy D-Shape, jímž vynalezený způsob tisku je nejvíce podobný stereolitografii. V závěru teoretické části byly představeny některé poznatky z výzkumu 3D tisku na Eindhoven University of Technology z důvodu využívání stejného přístupu projektem ČVUT.

V prvním oddílu praktické části bylo navrženo míchací zařízení pro finální úpravu stavební hmoty. Zařízení bude plnit tři funkce, první je zásobník pro předmíchaný beton dopravený dopravní trasou s požadovaným objemem 50 l, druhá pak zamíchání aktivačního činidla do betonu, přičemž činidlo bude přivedeno bočním vstupem přes clonku ve válcové části stroje a třetí je funkce pumpy, jejíž prací je tlačení betonu ze zásobníku skrz hadici až ke trysce. Po zjištění potřebných vlastností bylo stanoveno, že bude nakoupeno více vzájemně kombinovatelných variant šnekové pumpy, konkrétně rotor D5 Kurz, stator D5 Kurz a stator D6-3 Twister od firmy Filamos s.r.o. Se znalostí šnekové pumpy byl navržen pohon míchacího zařízení. Jedná se o třífázový asynchronní převodový motor s výkonem 4 kW od firmy SEW-EURODRIVE.

V druhém oddílu praktické části byla navržená konstrukce ověřena metodou konečných prvků ve třech výpočtech, ze kterých vzešel návrh možných úprav konstrukce pro zlepšení pevnosti. První dva výpočty sloužily pro ověření chování konstrukce od zatížení kroutícím momentem, ohybovým momentem a osovou silou od převodového motoru. Tato ověření ukázala, že navržená geometrie je funkční. Třetí výpočet už byl pak proveden jako přesná analýza geometrie s uvažováním všech zatížení. Tento výpočet ukázal, že konstrukce je funkční, nicméně pro budoucí varianty tohoto stroje jsou nastíněny možné úpravy pro zlepšení nosnosti.

Jako poslední byly modální analýzou zjištěny nebezpečné frekvence ve vztahu k frekvencím od pohonu.

Ve třetím oddílu praktické části byla zanalyzována dopravní trasa. V úvodu jsou popsány dva zvažované způsoby dopravy a následně byl vybrán mokrý způsob dopravy betonové směsi na místo dopravy suché směsi. Důležitou částí třetího oddílu je výpočet potřebného tlaku pro dopravu směsi do požadované pracovní výšky 12 m. Z výpočtu vyšel potřebný tlak 33 bar a na základě této informace bylo možné, s využitím rešerše, navrhnout potřebné nakupované součásti dopravní trasy. Po zúžení výběru zůstaly dvě, k nákupu vhodné, hadice. Konkrétně jde o model 125 od firmy Bautech, nebo model SM40 od firmy GUMEX, spol. s.r.o. Dále bylo navrženo čerpadlo betonu, které může být dodáno firmami Putzmeister, Schwing, mECBO, Brinkmann, Knauf PFT anebo m-tec CZ, s.r.o. V závěru třetího oddílu jsou stejným způsobem navrženy varianty míchačky pro předmíchání betonové směsi dopravované hadicí do míchacího zařízení. Dodavatelé míchaček jsou firmy Knauf PFT, Filamos s.r.o., m-tec CZ, s.r.o.

Výše uvedené úkony měly za cíl navrhnout, zkonstruovat a následně ověřit míchací zařízení pro finální úpravu stavební hmoty spolu s dopravní trasou, čehož bylo dosaženo. Model míchacího zařízení je v dokumentech přiložených k této diplomové práci. Navržené zařízení bude vyrobeno a testováno v následujících měsících po skončení návrhových prací.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] HAGER, Izabela, Anna GOLONKA a Roman PUTANOWICZ. 3D Printing of Buildings and Building Components as the Future of Sustainable Construction?. *Procedia Engineering* [online]. 2016, **151**, 292-299 [cit. 2019-05-22]. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.357. ISSN 18777058. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705816317453>
- [2] GOSSELIN, C., R. DUBALLET, Ph. ROUX, N. GAUDILLIÈRE, J. DIRRENBARGER a Ph. MOREL. Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete – a new processing route for architects and builders. *Materials & Design* [online]. 2016, **100**, 102-109 [cit. 2019-05-22]. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.03.097. ISSN 02641275. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0264127516303811>
- [3] LE, T., S. AUSTIN, S. LIM, R. BUSWELL, A. GIBB a T. THORPE. Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. *Materials and Structures* [online]. 2012, **45**(8), 1221-1232 [cit. 2019-05-22]. DOI: 10.1617/s11527-012-9828-z. ISSN 1359-5997. Dostupné z: <http://www.springerlink.com/index/10.1617/s11527-012-9828-z>
- [4] *Winsun3D* [online]. b.r. [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <http://www.winsun3d.com/En/>
- [5] *Total Kustom* [online]. b.r. [cit. 2019-05-25]. Dostupné z: <http://www.totalkustom.com/home.html>
- [6] *D-shape* [online]. b.r. [cit. 2019-05-25]. Dostupné z: <https://d-shape.com/>
- [7] BOS, Freek, Rob WOLFS, Zeeshan AHMED a Theo SALET. Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing. *Virtual and Physical Prototyping* [online]. 2016, **11**(3), 209-225 [cit. 2019-05-22]. DOI: 10.1080/17452759.2016.1209867. ISSN 1745-2759. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17452759.2016.1209867>
- [8] *HuaShang Tengda* [online]. b.r. [cit. 2019-05-25]. Dostupné z: <https://3dprint.com/tag/huashang-tengda/>
- [9] *3DPRINTCANALHOUSE* [online]. b.r. [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <https://3dprintcanalhouse.com/>
- [10] 3D Concrete Printing. *Eindhoven University of Technology* [online]. b.r. [cit. 2019-05-26]. Dostupné z: <https://www.tue.nl/en/research/research->

groups/structural-engineering-and-design/concrete-research-areas/3d-concrete-printing/

- [11] *PFT G 4 Standard* [online]. b.r. [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: https://www.pft.eu/www/cs/produkte/produktprogramm/mischpumpen/mischpumpe.php?stein_id=876&system_id=172&lv_id=5
- [12] *TONSTAV-SERVICE s.r.o.* [online]. b.r. [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: <https://www.tonstav-service.cz/prodej-stroju-prislusenstvi-nahradnich-dilu>
- [13] *Filamos s.r.o.* [online]. b.r. [cit. 2018-12-10]. Dostupné z: <https://www.filamos.cz/stavebni-stroje/michacky/>
- [14] *Knauf PFT* [online]. b.r. [cit. 2018-12-10]. Dostupné z: https://www.pft.eu/www/cs/produkte/produktprogramm/horizontal_durchlaufmischer/horizontal_durchlaufmischer.php
- [15] *PFT D8-1,5 rozměry* [online]. b.r. [cit. 2019-01-20]. Dostupné z: http://tool.knauf-formbar.de/export/content_scripts/knauf_pdf_download.php?p=p&action=download&a=10382&c=41abca675ce5e54677e1ff06c4e62c4f
- [16] *Filamos s.r.o. Náhradní díly* [online]. b.r. [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: <https://www.filamos.cz/nahradni-dily/>
- [17] *SEW-EURODRIVE* [online]. b.r. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://www.sew-eurodrive.cz/domu.html>
- [18] BOLEK, Alfred a Josef KOCHMAN. *Části strojů*. Vyd. 5., přeprac. (v SNTL 1. vyd.). Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1989. Technický průvodce. ISBN 80-030-0046-7.
- [19] *GUMEX, spol. s r.o* [online]. b.r. [cit. 2018-12-07]. Dostupné z: <https://www.gumex.cz/>
- [20] *Rubena* [online]. b.r. [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://eshop.rubena.cz/>
- [21] *Rubena "Těsnící prvky"* [online]. b.r. [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: https://eshop.rubena.cz/Files/flash/rubena-old/Tesnici-prvky_2015_CZ.pdf
- [22] *Ferona a.s.* [online]. b.r. [cit. 2019-04-29]. Dostupné z: <https://online.ferona.cz/vyhledavani/399>
- [23] *Bohdan Bolzano, s.r.o. Technická příručka Přehled vlastností oceli S235J2G3* [online]. b.r. [cit. 2019-04-29]. Dostupné z: <https://www.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/tycove->

oceli-uhlikove-konstrukcni-a-legovane/nelegovane-konstrukcni-oceli-podle-en-10025/prehled-vlastnosti-oceli-s235jrdrive-s235jrg2

- [24] *Převodní součinitel svarového spoje* [online]. b.r. [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: <http://help.autodesk.com/view/INVNTOR/2014/CSY/?guid=GUID-1569FB41-0D8D-46EC-9452-02840794B06F>
- [25] *Filamos C20 COM-V* [online]. b.r. [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <https://www.filamos.cz/stavebni-stroje/injektazni-technika/injektazni-a-omitaci-cerpadla/>
- [26] POLÁK, Jaromír. *Dopravní a manipulační zařízení II*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2003. ISBN 80-248-0493-x.
- [27] JANALÍK, Jaroslav. *Potrubní hydraulická a pneumatická doprava*. 1. přeprac. vyd. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 1999. ISBN 80-7078-595-0.
- [28] ŠTROCH, P. Do not underestimate danger of explosion; Even dust can destroy equipment and kill. *Perspectives in Science* [online]. 2016, 7, 312-316 [cit. 2018-11-06]. DOI: 10.1016/j.pisc.2015.11.048. ISSN 22130209. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2213020915000968>
- [29] JEŽEK, Jan, Blanka VÁRADIOVÁ a Josef ADAMEC. *Mechanika tekutin*. Vyd. 3. přeprac. Praha: České vysoké učení technické, 1997. ISBN isbn:80-01-01615-3.
- [30] HOSNEDL, Stanislav a Ladislav NĚMEC. *Strojní části potrubních systémů* [online]. Plzeň, 2007 [cit. 2018-11-18]. Dostupné z: http://home.zcu.cz/~hosnedl/a\CMS1/a\CMS1_Prez&Kom_PREDNASKY/KKS\CMS1_P13_Z--CastiPotrubSyst_SH_2007_04_17.pdf. Syllabus přednášek v předmětu KKS /CMS1. Západočeská univerzita, Katedra konstruování strojů.
- [31] *Součinitel místních odporů* [online]. b.r. [cit. 2019-04-14]. Dostupné z: <http://uchi.vscht.cz/uploads/etabulky/soucinitel.mistnich.odporu.html>
- [32] *GMS velkoobchod s.r.o.* [online]. b.r. [cit. 2018-12-07]. Dostupné z: <https://www.gms.cz/bautec-125>
- [33] *Hadice Průcha* [online]. b.r. [cit. 2018-12-07]. Dostupné z: <http://www.hadiceprucha.cz/32788-hadice-na-beton-a-omitkovaci-stroje/>
- [34] *FoMi Hadice* [online]. b.r. [cit. 2018-12-07]. Dostupné z: <https://www.hadice.net/www/katalog/104/hadice-na-beton-a-omitkovaci-stroje/>



- [35] *Tubes International s.r.o.* [online]. b.r. [cit. 2018-12-07]. Dostupné z: <https://www.tubes-international.cz/produkty/prumyslove-hadice/hadice-na-beton-a-omitkovaci-stroje/>
- [36] *PM CZ s.r.o* [online]. b.r. [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: <http://www.putzmeister.cz/cs/produkty/putzmeister/stacionarni-cerpadla-betonu>
- [37] *Brinkmann* [online]. b.r. [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: <http://www.estrichboy.de/enu/produkte.htm>
- [38] *SCHWING Stetter Ostrava s.r.o* [online]. b.r. [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: <http://www.schwing.cz/cz/stavenistni-cerpadla.html>
- [39] *Mecbo* [online]. b.r. [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: <http://www.mecbo.it/portfolio/fattorino-p2/?lang=en>
- [40] *RICHTER DIESEL s.r.o* [online]. b.r. [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: http://www.richterdiesel.cz/cz/page/product-detail/product_category/63-MECBO_cerpadla_betonu_a_betonovy/product/83-mecbo_stavenistni_cerpadla_beton.html
- [41] *M-tec CZ, s.r.o* [online]. b.r. [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: <https://www.m-tec.cz/vyrobky/technika-na-stavenisti/stroje/>

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Příklady aplikace metody Contour crafting (FDM) při výzkumu na různých světových univerzitách. (a) Institute of Advanced Architecture of Catalonia, (b) University of Loughborough, (c) University of Southern California a (d) firma [6] D-shape. [7].....	4
Obr. 2 Portálový stroj pro testování optimálních vlastností betonových směsí pro 3D, výzkum univerzity Loughborough [3]	5
Obr. 3 Stroj pro 3D tisk metodou stereolitografie, kde je vstupním materiálem písek, firmy D-Shape [6]	5
Obr. 4 Schéma sestavy pro 3D tisk s využitím víceosého robota: (1) řídicí jednotka robota, (2) řídicí jednotka tisku, (3) rameno robota, (4) tisková hlava, (5) urychlovací čidlo, (6) peristaltická pumpa urychlovacího čidla, (7) peristaltická pumpa pro předmíchanou směs, (8) míchač směsi, (9) tištěný objekt [2]	6
Obr. 5 První 3D vytištěný betonový domek (vlevo), nejvyšší 3D vytištěná budova na světě (vpravo) [4].....	6
Obr. 6 Projekty stojící za zmínku: (a) dvoupatrový domek od firmy HuaShang Tengda [8], (b) kancelářská budova v Dubaji od firmy WinSun, (c) již zmíněná pětipatrová budova od firmy WinSun v Suzhou, (d) hotelové apartmá na Filipínách od firmy Total Kustom, (e) vila v Suzhou od WinSun, (f) malý hrad v Minnesotě, USA, od firmy Total Kustom a (g) již zmíněný betonový domek v Suzhou od WinSun [7]	7
Obr. 7 Rozestavěný domek (v pravé části obrázku).....	7
Obr. 8 Sestava pro tisk na Eindhoven University of Technology [7]	8
Obr. 9 Sestava tiskové hlavy [7]	9
Obr. 10 Kroucení betonu při použití trysky nekruhového průřezu [7].....	9
Obr. 11 Standardní postup tvorby 3D modelu pro 3D tisk (zleva doprava: CAD modelář, STL soubor, rozřezání modelu na vrstvy, přiřazení tras nástroje pro jednotlivé vrstvy, nahrání do 3D tiskárny, vytištěný 3D objekt) [1].....	10
Obr. 12 Zařízení pro testování betonové směsi (malá tiskárna).....	11
Obr. 13 Reálný stroj (velká tiskárna), (1.) pumpa na beton, (2.) hadice, (3.) portálový stroj, (4.) kočka s navrhovaným míchacím zařízením, (5.) prostor mezi žlutými kolejnicemi je pracovní	12
Obr. 14 Detail navrhovaného míchacího zařízení na kočce velkého stroje	12
Obr. 15 Sestava míchacího zařízení pro velkou tiskárnu), (1.) pohon, (2.) hřídel míchače, (3.) víko zásobníku, (4.) přívod betonu do zásobníku, (5.) nosná obruč, (6.) stojina, (7.) zásobník, (8.) nakupovaná část míchače, (9.) šneková pumpa, (10.) výstup z míchacího zařízení	13

Obr. 16 Kočka velké tiskárny v krajní horní poloze, ze které vychází rozměrové omezení	14
Obr. 17 Předpřipravený přívod betonu do zásobníku	14
Obr. 18 Zásobník ve tvaru jehlanu, první návrh.....	15
Obr. 19 Kuželový tvar zásobníku, druhý návrh.....	16
Obr. 20 Výsledný design zásobníku	16
Obr. 21 První návrh míchače.....	17
Obr. 22 Šroubované míchací elementy	18
Obr. 23 Nakupovaný míchací hřídel od firmy Knauf PFT [14]	19
Obr. 24 Model upraveného míchacího hřídele	19
Obr. 25 Vstup aktivačního čidla válcovou částí s clonkou	20
Obr. 26 Detail vstupu čidla válcovou částí s clonkou.....	20
Obr. 27 Základní rozměry šnekové pumpy [15].....	21
Obr. 28 Snímek mikrostruktury rotoru (bílé oblasti jsou karbidy chromu) [15]	22
Obr. 29 Rotor D5 kurz [16]	23
Obr. 30 Stator D5 kurz [16].....	23
Obr. 31 Rotor D6-3 Twister [16]	24
Obr. 32 Diagram závislosti rychlosti otáčení na dopravovaném objemu různých šnekových pump (červeně pracovní oblast míchacího zařízení) [15]	25
Obr. 33 Převodový motor SEW-EURODRIVE KAF57DRN112M4	26
Obr. 34 Víko míchacího zařízení	28
Obr. 35 Pryžový profil Pireli s bočním těsněním - těsnění s výztuhou [19].....	29
Obr. 36 Šroub s křídlovou hlavou zašroubovaný do čepu zavařeného do trubky. 29	
Obr. 37 Pohled v řezu na zatěsnění pomocí o-kroužků uložených v domku	30
Obr. 38 Detail domku na o-kroužky (1. - modrá), jež je součástí kočky (2. - šedá), zatěsněno zasunutím výstupu z míchacího zařízení (3. - žlutá).	30
Obr. 39 Schéma radiální instalace s těsněním vnitřním průměrem [21]	31
Obr. 40 Požadované stlačení o-kroužku pro hydraulický systém v pohybu.....	32
Obr. 41 Schéma pro dopočítání ohybového momentu od motoru	34
Obr. 42 Rozložení ohybového momentu od motoru pro zadání do programu ABAQUS	34
Obr. 43 Výsledek prvního výpočtu (jednotky napětí jsou v N.mm ⁻²)	35
Obr. 44 Výsledek prvního výpočtu (jednotky posuvů jsou v mm)	35

Obr. 45 Výsledek druhého výpočtu (jednotky napětí jsou v $N.mm^{-2}$).....	36
Obr. 46 Výsledek druhého výpočtu (jednotky posuvů jsou v mm).....	36
Obr. 47 Plošný model pro numerickou analýzu míchacího zařízení velké tiskárny	37
Obr. 48 Plošný model pro numerickou analýzu zařízení malé tiskárny	37
Obr. 49 Výsledek numerického výpočtu míchacího zařízení pro malou tiskárnu (jednotky jsou v $N.mm^{-2}$).....	38
Obr. 50 Naznačení úpravy stroje pro malou tiskárnu - rozšíření trubky v místě spoje	39
Obr. 51 Naznačení úpravy stroje pro malou tiskárnu - podepření stojin žebry	39
Obr. 52 Výsledek numerického výpočtu míchacího zařízení pro malou tiskárnu (jednotky jsou v mm)	40
Obr. 53 Výsledek numerického výpočtu míchacího zařízení pro velkou tiskárnu (jednotky jsou v $N.mm^{-2}$).....	41
Obr. 54 Naznačení úpravy stroje pro velkou tiskárnu - rozšíření trubky v místě spoje	41
Obr. 55 Naznačení úpravy stroje pro velkou tiskárnu - podepření stojin žebry	42
Obr. 56 Výsledek numerického výpočtu míchacího zařízení pro velkou tiskárnu (jednotky jsou v mm)	42
Obr. 57 Tvar problematické frekvence pro stroj na malou tiskárnu	45
Obr. 58 Ukázka jednoho z vlastních tvarů stroje pro velkou tiskárnu	45
Obr. 59 Pístové čerpadlo Putzmeister P718TD [36].....	54
Obr. 60 Šnekové čerpadlo Putzmeister SP11TMR [36]	55
Obr. 61 Směšovací čerpadlo-omítací stroj m-tec M330 [41]	55
Obr. 62 Míchačka m-tec D50.....	56

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Vybrané komponenty šnekové pumpy	23
Tab. 2 Produktová data zvoleného pohonu	26
Tab. 3 Druhy, velikosti a směry zatížení použitých pro MKP výpočet	33
Tab. 4 Frekvence generované motorem a převodovkou	43
Tab. 5 Výsledek modální analýzy pro malou tiskárnu	44
Tab. 6 Výsledek modální analýzy pro velkou tiskárnu	44
Tab. 7. Vstupní hodnoty pro výpočet potrubí	49
Tab. 8. Srovnání hadic.	52
Tab. 9. Srovnání čerpacích strojů	53
Tab. 10 Srovnání horizontálních kontinuálních míchaček	56

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: 3D model míchacího zařízení pro finální úpravu stavební hmoty pro malý stroj

Příloha 2: 3D model míchacího zařízení pro finální úpravu stavební hmoty pro velký stroj