VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ
INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

KONSTRUKCE TISKOVÉ HLAVY PRO 3D TISK BETONOVÝCH SMĚSÍ
MECHANICAL DESIGN OF 3D PRINTING HEAD FOR CONCRETE MIXTURES

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR
Bc. Jakub Slavíček

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR
doc. Ing. David Paloušek, Ph.D.

BRNO 2020

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav konstruování
Student:	**Bc. Jakub Slavíček**
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Konstrukční inženýrství
Vedoucí práce:	**doc. Ing. David Paloušek, Ph.D.**
Akademický rok:	2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Konstrukce tiskové hlavy pro 3D tisk betonových směsí

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Konstrukce tiskové hlavy určené pro stavební hmoty musí reflektovat provozní a funkční požadavky dané typem dopravované směsi, požadavky na čištění, servis a bezpečnost. Mezi důležité parametry konstrukce patří její hmotnost a objem materiálu, který musí být tiskovou hlavou doručen na požadované místo v určitém časovém intervalu. Předpokládá se formování směsi s využitím rotace trysky kolem vertikální osy tiskové hlavy.

Typ práce: vývojová – konstrukční
Výstup práce: aplikovaný výsledek (Gfunk)
Projekt: TAČR

Cíle diplomové práce:

Hlavním cílem práce je navrhnout a realizovat konstrukci tiskové hlavy určené pro kontinuální 3D tisk betonových směsí (obsahujících kamenivo o frakci 4 – 8 mm) s těmito parametry: konstrukce hlavy modulární, rychlost extruze 0,5 – 2 m3/h, možnost rotace trysky dle směru pohybu hlavy, redukce hmotnosti vůči předchozí verzi minimálně o 25 %. Práce koncepčně navazuje na předchozí bakalářskou práci.

Dílčí cíle diplomové práce:

– zpracovat přehled současných řešení tiskových hlav,
– identifikovat parametry současné tiskové hlavy,
– navrhnout konstrukci tiskové hlavy,
– realizovat výrobu a provést funkční testy.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, výkres sestavení, laboratorní protokol.
Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 – 50 stran textu bez obrázků).
Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:
http://ustavkonstruovani.cz/texty/magisterske–studium–ukonceni/

Seznam doporučené literatury:

3D PRINTING OF CONCRETE: STATE OF THE ART AND CHALLENGES OF THE DIGITALCONSTRUCTION REVOLUTION. Mechanical Engineering-CIME [online]. American Society of Mechanical Engineers, 2019, 141(6), 48 [cit. 2019-10-30]. ISSN 0025-6501.

RAEL, Ronald a Virginia SAN FRATELLO. Printing architecture: innovative recipes for 3D printing. Hudson, New York: Princeton Architectural Press, 2018, 173 stran : barevné ilustrace. ISBN 978--
-61689-696-6.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce je zaměřena na návrh a výrobu aktivní tiskové hlavy určené pro 3D tisk betonových směsí. Cílem je zajistit požadované funkční parametry tiskové hlavy při minimální hmotnosti navrhovaného zařízení. Extruzi materiálu z vyrobené tiskové hlavy zajišťuje šnekový dopravník, tvarování vynášeného materiálu je realizováno otočně uloženou tryskou opatřenou zahlazovacími segmenty. Dimenzování hlavních prvků tiskové hlavy proběhlo na základě parametrů naměřených při testech starší verze tiskové hlavy a na základě MKP analýz. Výsledkem je vyrobená tisková hlava schopná extruze materiálu s příměsí kameniva o frakci 4–8 mm rychlostí 0,5–2 $m^3 \cdot h^{-1}$. Hmotnost tiskové hlavy činí 16,4 kg, což je 30% úspora vůči předchozí verzi tiskové hlavy. Vyrobená tisková hlava byla odzkoušena při tisku reálného objektu a splňovala všechny požadované parametry, je připravena pro implementaci do stroje zajišťujícího velkorozměrový tisk dílů do stavebnictví.

KLÍČOVÁ SLOVA

aktivní tisková hlava, 3D tisk betonových směsí, tvarování výnosu

ABSTRACT

This diploma thesis deals with a design and manufacture of an active print head used for 3D printing of concrete mixtures. The aim is to ensure functional parameters of the print head at a minimal mass. Extrusion of the material from the print head is ensured by a screw conveyor, shaping of the material is carry out by a rotatably mounted nozzle provided with trowels. The dimensioning of the main elements of the print head is based on the parameters measured during tests with the older version of the print head and on the FEM analysis. The print head was manufactured and is able to extrude concrete mixture with an admixture of aggregate (fraction 4–8 mm) at a rate of 0,5–2 $m^3 \cdot h^{-1}$. The weight of the print head is 16.4 kg, which is 30 percent less than an older print head weighed. The manufactured print head was tested during the printing of a real object and met all the required parameters. The print head is ready for implementation in a machine providing large-scale printing of parts in the construction industry.

KEYWORDS

active print head, 3D concrete printing, contour crafting

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SLAVÍČEK, Jakub. *Konstrukce tiskové hlavy pro 3D tisk betonových směsí*. Brno, 2020. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. David Paloušek, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Davidu Palouškovi, Ph.D. za odborné vedení a cenné rady. Dále bych chtěl poděkovat rodině za trpělivost a podporu a v neposlední řadě bych chtěl poděkovat všem, kteří mi pomohli při řešení diplomové práce, zejména při měřeních a testech tiskové hlavy.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením doc. Ing. Davida Palouška, Ph.D. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

……

Podpis autora

OBSAH

1	**ÚVOD**	**13**
2	**PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ**	**14**
2.1	Tiskové hlavy	14
2.1.1	Pasivní tisková hlava	15
2.1.2	Aktivní tisková hlava	16
2.1.3	Procesní parametry a systémy tvarování výnosu	20
2.1.4	Systémy vyztužování	25
2.2	Systém polohování tiskové hlavy	26
2.2.1	Výsuvné otočné rameno	26
2.2.2	Rámová konstrukce	27
2.2.3	Portálová konstrukce	27
2.2.4	Delta konstrukce	28
2.2.5	Robotické rameno	28
2.3	Čerpání a doprava betonových směsí	29
2.3.1	Čerpadla se šnekovým pohonem	29
2.3.2	Čerpadla s pístovým pohonem	29
2.3.3	Peristaltická čerpadla	30
2.3.4	Připojovací segmenty	30
2.4	Materiálové vlastnosti tisknuté směsi	31
2.4.1	Základní složení betonu	31
2.4.2	Reologické vlastnosti cementových směsí	33
2.4.3	Aditivní zpracování tisknuté směsi	35
3	**ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE**	**37**
3.1	Analýza problému	37
3.2	Analýza, interpretace a zhodnocení poznatků z rešerše	38
3.3	Cíl práce	39
4	**KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ**	**40**
4.1	Stávající stav tiskové hlavy	41
4.2	Tisková směs	41
4.3	Koncepční návrh celku tiskové hlavy	42

4.4 Koncepční návrh natáčecího mechanismu 43
4.4.1 Varianta s jedním ložiskem 43
4.4.2 Varianta s dvojicí ložisek 44
5 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ 45
5.1 Návrh testovacího zařízení 46
5.1.1 Koncepční řešení testovacího zařízení 46
5.1.2 Měření přibližných hodnot krouticího momentu 49
5.1.3 Konstrukční řešení testovacího zařízení 51
5.2 Měření a zjišťování parametrů tiskové hlavy 57
5.2.1 Měřicí systém a použité vybavení 57
5.2.2 Postup měření 58
5.2.3 Dosažené výsledky 59
5.2.4 Vyhodnocení měření a vyvozené závěry 61
5.3 Konstrukční řešení tiskové hlavy 63
5.3.1 Použité materiály a technologie 64
5.3.2 Tělo tiskové hlavy 65
5.3.3 Uložení šneku 70
5.3.4 Natáčecí mechanismus 77
5.3.5 Cenová rozvaha 84
5.4 Ověřovací experimenty 85
5.4.1 Kontrola hmotnosti vyrobeného zařízení 85
5.4.2 Ověření možností dopravovaného množství materiálu 86
5.4.3 Test natáčecího mechanismu 86
5.4.4 Tisk reálného testovacího objektu 87
6 DISKUZE 89
7 ZÁVĚR 92
8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ 93
9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN 96
10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ 99
11 SEZNAM TABULEK 102
12 SEZNAM PŘÍLOH 103

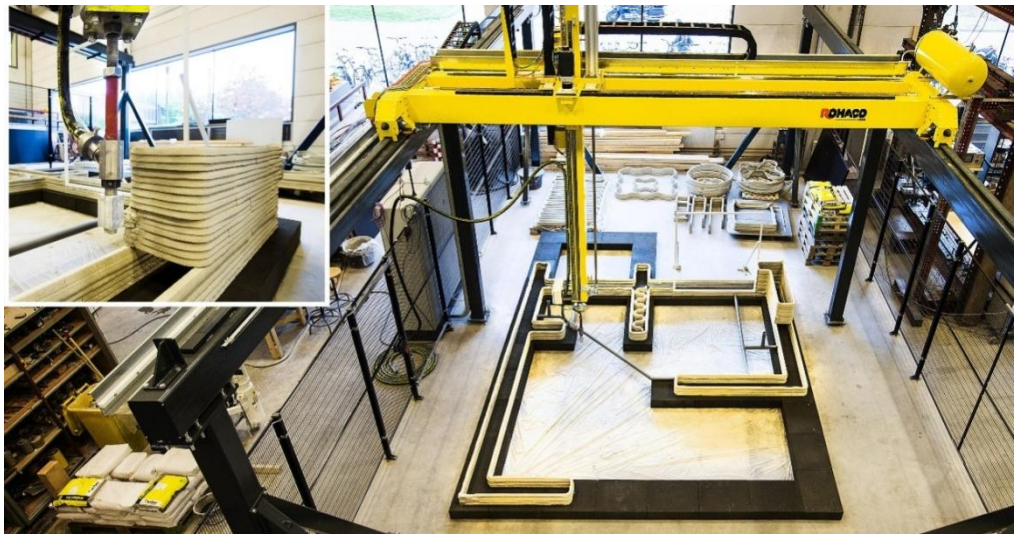
1 ÚVOD

Technologie 3D tisku cementových směsí představuje novou, dynamicky se rozvíjející, oblast aditivních technologií, která by do budoucna mohla představovat alternativu ke klasickým stavebním postupům. Možnosti využití této technologie sahají od výroby prefabrikovaných dílů, přes tvorbu uměleckých objektů, až po stavbu bytových jednotek.

Trend rychlého růstu populace nutí společnost co nejefektivněji využívat veškerý materiál při výstavbě, což právě technologie 3D tisku cementových směsí zvládá velice dobře. Díky principu aditivního nanášení jednotlivých vrstev je tato metoda stavby domů téměř bezodpadová a umožňuje eliminovat další přidružené, ekonomicky a časově náročné práce, kterými je například stavba bednění nebo přesun materiálu v rámci stavby. Mezi další výhody stavby domů aditivním způsobem patří tvarová variabilita tisknutého objektu spojená s tvorbou samonosných konstrukcí a konstrukcí zohledňujících lom světla a termoregulaci, možnost využití přírodních hliněných stavebních směsí získávaných přímo v lokalitě stavby, nebo možnost automatizovat proces výstavby a zároveň zpětně detekovat rozměrovou přesnost.

Zařízení zajišťující aditivní nanášení jednotlivých vrstev cementových směsí musí zohledňovat zejména časově závislé materiálové vlastnosti tisknuté směsi a objem tisknutého materiálu. Materiálové vlastnosti tisknuté směsi jsou předurčeny návrhem vhodné směsi, se kterou má zařízení pracovat.

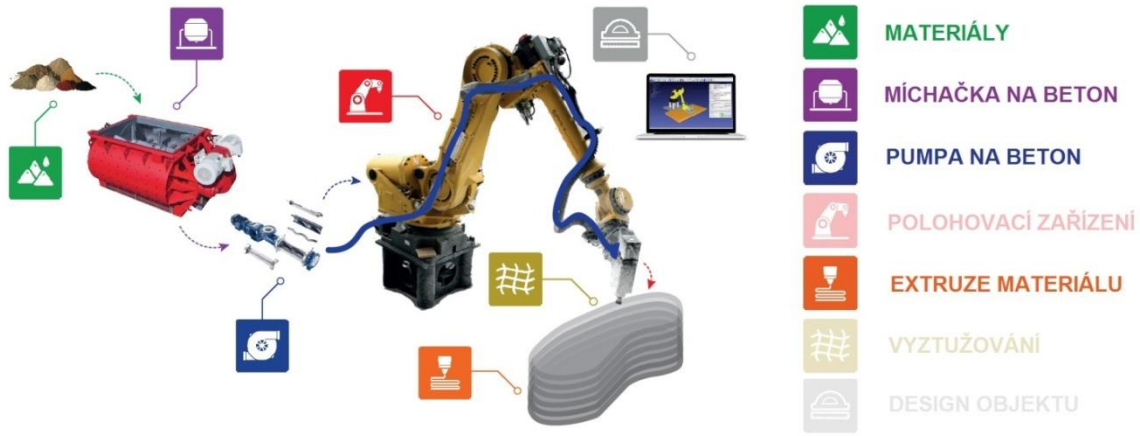
Hlavním cílem této práce je navrhnout a realizovat konstrukci tiskové hlavy zajišťující 3D tisk betonové směsi s obsahem kameniva. Tisková hlava musí splňovat minimální požadavky na rychlost vytlačování, dále je nutné zohlednit i systém čištění hlavy spojený s modularitou zařízení. Tisková hlava by, kromě samotného dávkování materiálu, měla obsahovat systém tvarování výnosu v podobě natáčení trysky ve směru tisku.



Obr. 1-1 3D tisk betonových směsí TU Eindhoven [1]

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Aditivní výroba (AM), někdy také označována jako 3D tisk, je počítačem řízený proces výstavby prostorových objektů, typicky realizovaný nanášením materiálu vrstvu po vrstvě [2]. Jedním z odvětví aditivní výroby je i 3D tisk betonových směsí (3DCP), který se uplatňuje zejména ve stavebnictví. Schéma uspořádání hlavních uzlů řetězce, zajišťujícího 3DCP, je zobrazeno na Obr. 2-1. K zajištění správného chodu celého zařízení je nutné optimalizovat dílčí procesy tak, aby na sebe navazovaly a fungovaly jako celek. Vstupem do řetězce jsou materiály, ze kterých po kvalitním promíchání vzniká tisková směs. Tato směs je za pomoci pumpy dopravována k tiskové hlavě. Tisková hlava v kombinaci s polohovacím zařízením zajišťuje extruzi materiálu na požadované místo. Celý tento proces je řízen počítačem a může být rozšířen o další systémy sloužící např. k podávání výztuží nebo skenování výnosu.



Obr. 2-1 Schéma zařízení realizujících 3DCMP (upraveno) [3]

2.1 Tiskové hlavy

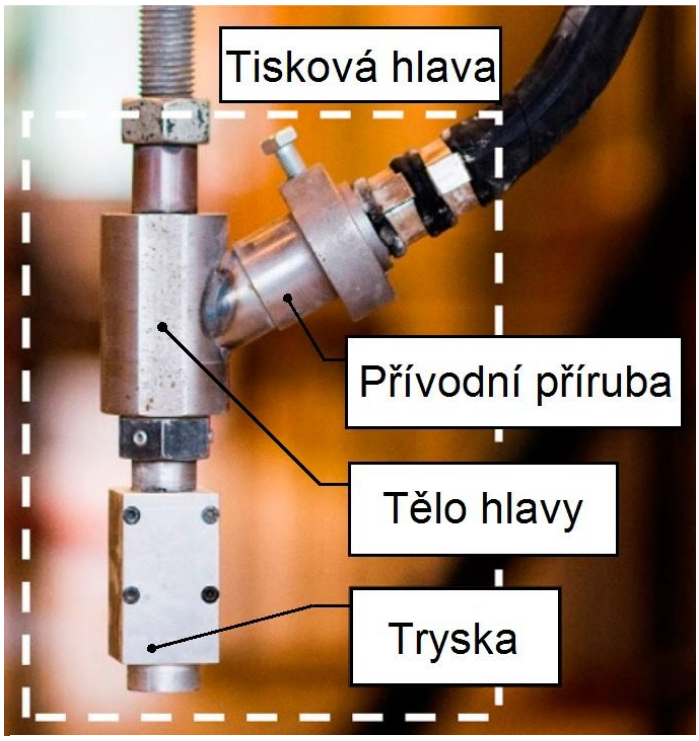
Tisková hlava je zařízení připevněné k polohovacímu mechanismu, které zprostředkovává kontakt mezi příchozím materiálem od pumpy a tisknutým objektem. Hlavní funkcí, která je společná pro všechny tiskové hlavy sloužící k 3DCP je tvarování výnosu při extruzi materiálu na požadované místo.

Obecně se tisková hlava skládá z několika základních částí: tělo tiskové hlavy, příruba pro vstup materiálu přicházejícího od pumpy a tryska, která má za úkol tvarovat vynášený materiál. Dále tisková hlava může obsahovat mechanismus pro úpravu množství tisknutého materiálu, taková tisková hlava se označuje jako aktivní [3]. Pokud tisková hlava takovým mechanismem nedisponuje a materiál tedy pouze tvaruje, aniž by ovlivňovala jeho

dávkované množství, pak se označuje jako pasivní tisková hlava [3]. U pasivní tiskové hlavy je pak množství vytlačovaného materiálu plně řízeno externí pumpou. Tiskové hlavy dále mohou obsahovat přídavné moduly sloužící například k podávání výztuží do tisknutého materiálu, natáčení trysky ve směru tisku nebo zařízení k detekci rozměrové přesnosti výnosu.

2.1.1 Pasivní tisková hlava

Obecně můžeme konstrukci pasivní tiskové hlavy rozdělit na několik základních celků: tělo tiskové hlavy, přívodní příruba a tryska viz Obr. 2-2. Hlavní funkcí tiskové hlavy je tvarovat vynášenou směs do požadované podoby. Toho může být docíleno buď prostou extruzí materiálu z kruhové trysky, nebo tvarováním betonu pomocí dalších přídavných mechanismů. Mezi tyto mechanismy patří například natáčení trysky kolem vertikální osy tiskové hlavy v kombinaci s použitím jiné než pouze kruhové trysky [4] nebo metoda contourcrafting [5]. Více o tvarování vynášeného materiálu viz kapitola 2.1.3. Množství materiálu protlačovaného tryskou pasivní tiskové hlavy je plně řízeno externí pumpou na beton. Z tohoto faktu vyplývají možná omezení použití této tiskové hlavy. Vzhledem k velké vzdálenosti mezi pumpou na beton a tryskou musí materiál vždy vykazovat stejné, pro danou tiskovou hlavu a trysku odzkoušené, reologické vlastnosti, aby nedocházelo např. k samovolnému vytékání tisknutého materiálu z trysky. Tato tisková hlava je tedy vhodná pro cementové pasty a materiály s jasně definovanou reologií vhodnou pro danou tiskovou hlavu. Naopak nevhodné je tuto tiskovou hlavu použít pro experimentální tisk materiálů s různou reologií nebo pro tisk materiálů s obsahem kameniva o větší frakci.



Obr. 2-2 Pasivní tisková hlava (upraveno) [6]

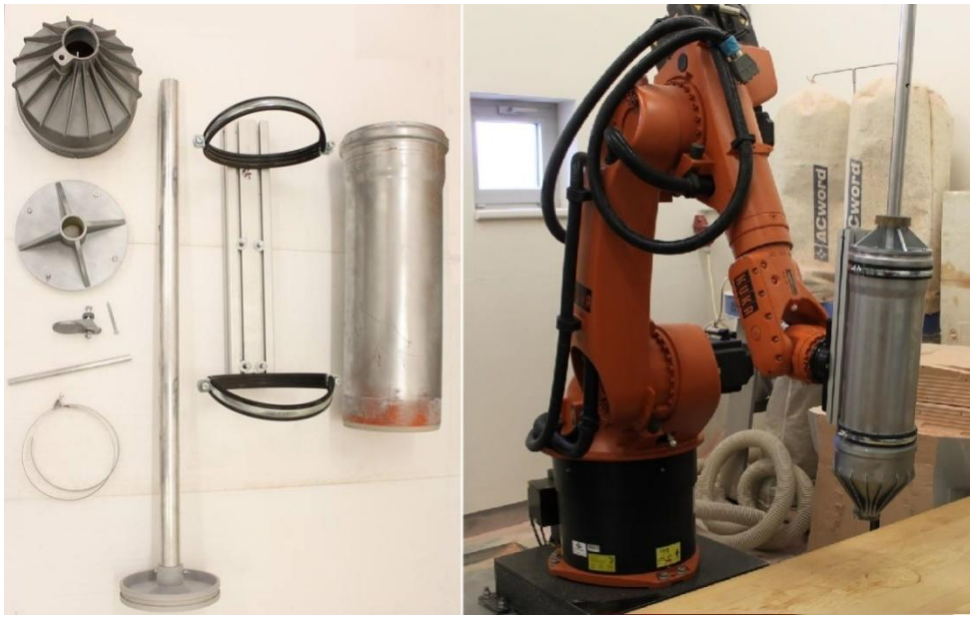
2.1.2 Aktivní tisková hlava

Aktivní tisková hlava obsahuje oproti pasivní tiskové hlavě navíc mechanismus, který umožňuje regulovat vytlačované množství materiálu. Tento mechanismus může fungovat buď na šnekovém nebo pístovém principu. Výhodou tohoto řešení tiskové hlavy je zejména přesnost dávkování materiálu a možnost tisku materiálů s různou reologií a složením. Na materiál v ústí trysky tiskové hlavy nepůsobí tíha sloupce betonu v potrubí jako tomu je u pasivní tiskové hlavy, tudíž zde nejsou kladeny takové požadavky na reologické vlastnosti tisknuté směsi. Nevýhodou těchto řešení je obecně zvýšení hmotnosti tiskové hlavy a z toho plynoucí požadavky na robustnost polohovacího zařízení, které tiskovou hlavu unáší.

Aktivní tisková hlava s pístovým pohonem

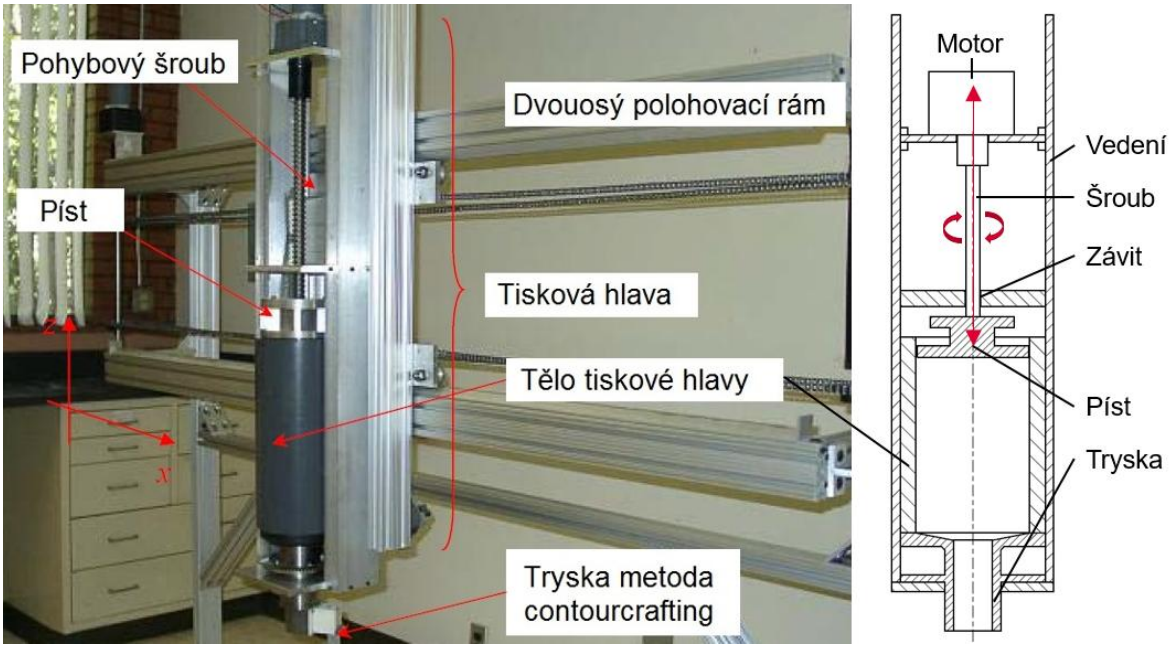
Tisková hlava s pístovým pohonem se klasicky skládá z trysky a těla tiskové hlavy, uvnitř kterého se pohybuje píst s pístnicí. Působením pístu na materiál uvnitř tiskové hlavy dochází k jeho vytlačování z trysky [7]. Píst může být zatěžován buď silou působící na pístnici nebo jiným způsobem např. pneumaticky nebo hydraulicky.

Na Obr. 2-3 je zobrazena konstrukce aktivní tiskové hlavy s pístovým pohonem, která byla použita pro prvotní testy chování tiskové směsi provedené na robotickém pracovišti NETME Center. Tisková hlava s pístovým pohonem je dostačující pro experimentální zkoušení materiálu, případně pro tisk velice malých objektů. Důvodem nevhodnosti použití této hlavy pro tisk rozměrnějších objektů je omezená kapacita materiálu uvnitř těla tiskové hlavy a při větším tisku je kontinuita procesu přerušována nutnými přestávkami na plnění hlavy tiskovou směsí. Polohovací zařízení pak musí kromě hmotnosti samotné konstrukce tiskové hlavy nést i hmotnost materiálu uvnitř hlavy, což zvyšuje nároky na robustnost celého polohovacího zařízení.



Obr. 2-3 Aktivní tisková hlava s pístovým pohonem - Ing. Arnošt Vespalec

Odborný článek autorů Hwanga a Khoshnevise zabývající se zejména metodou contourcrafting popisuje aktivní tiskovou hlavou s pístovým pohonem viz Obr. 2-4, použitou pro jejich experimenty [8]. Tisková hlava se skládá ze speciální trysky metody contourcrafting, těla tiskové hlavy a pístu stlačovaného pohybovým šroubem, který je poháněn krokovým motorem. Celá tisková hlava je unášena dvouosým polohovacím zařízením. Celý tento jednoúčelový mechanismus je určen pro tisk jednoduché stěny a optimalizaci procesních parametrů tisku metodou contourcrafting.

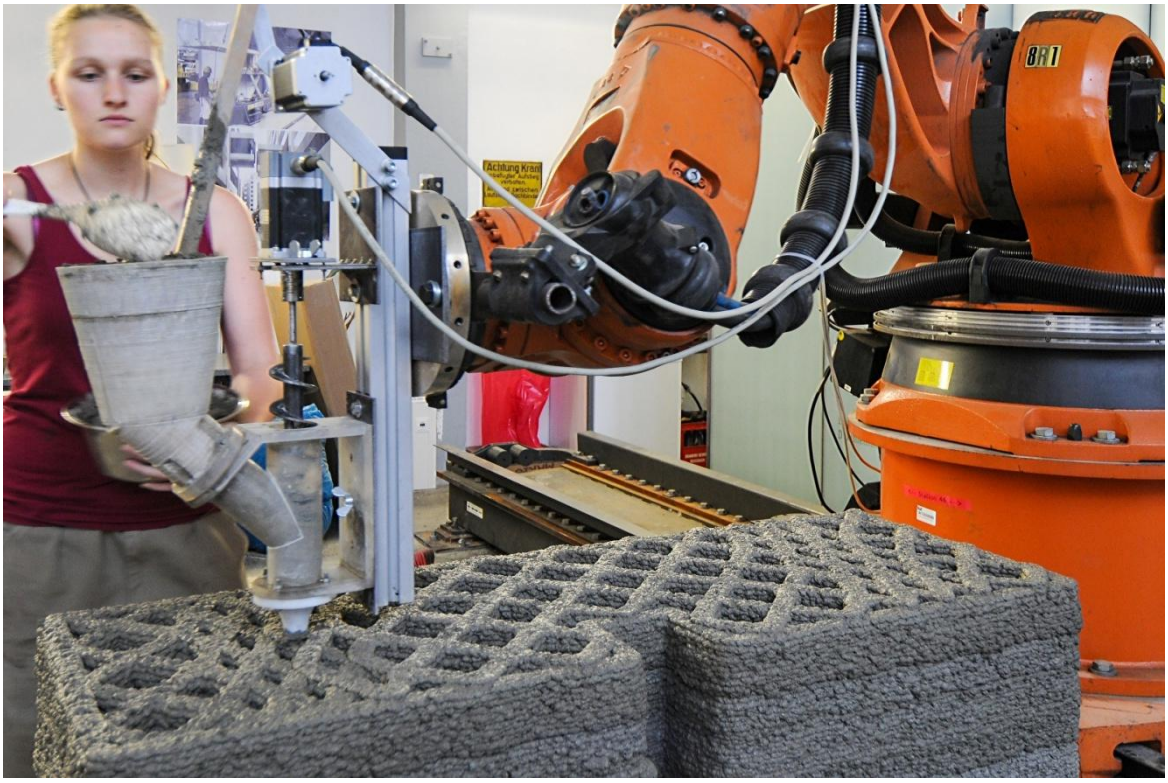


Obr. 2-4 Aktivní tisková hlava s pístovým pohonem CC (upraveno) [8]

Aktivní tisková hlava se šnekovým pohonem

Tisková hlava se šnekovým pohonem je specifická zejména způsobem extruze materiálu, který je urychlován rotačním pohybem spirálovité šnekovnice uložené uvnitř těla tiskové hlavy. Šnekovnice je uložena pomocí ložisek k tělu tiskové hlavy, případně k rámu, ke kterému je tisková hlava připevněna [9]. Rotační pohyb šnekovnice je zajišťován elektromotorem umístěným zpravidla nad uložením šnekovnice. Změnou otáček elektromotoru pak lze kontinuálně měnit množství tisknutého materiálu. Přívod materiálu k tiskové hlavě může být zajištěn přímo připojením hadice od externí pumpy na beton k tělu tiskové hlavy nebo může hlava nést vlastní zásobník na tisknutou směs, případně kombinovat tyto dvě varianty [4]. Výhodou tiskové hlavy se šnekovým pohonem je zejména nižší citlivost na změny reologie tisknuté směsi a možnost tisknout i materiál s obsahem částic o větší frakci [9].

Na Obr. 2-5 je zobrazena aktivní tisková hlava se šnekovým pohonem vyvinutá na Technické Univerzitě Mnichov (TUM), následující odstavec se zabývá touto tiskovou hlavou a čerpá z webových stránek TUM [9]. Šnekovnice tiskové hlavy je poháněná krokovým motorem a je uložena k rámu tiskové hlavy. Tisková hlava obsahuje malý zásobník na tisknutou směs, který je v průběhu tisku manuálně doplňován. Tisková hlava byla vyvinuta za účelem tisku bionických struktur inspirovaných tenkými, lehkými, ale přesto velice pevnými kostmi ptáků. Tisková hlava je určena pro tisk lehké cementové směsi s příměsí dřevěných štěpek, které jsou do směsi přidávány za účelem izolace a snížení hmotnosti vytištěných objektů.

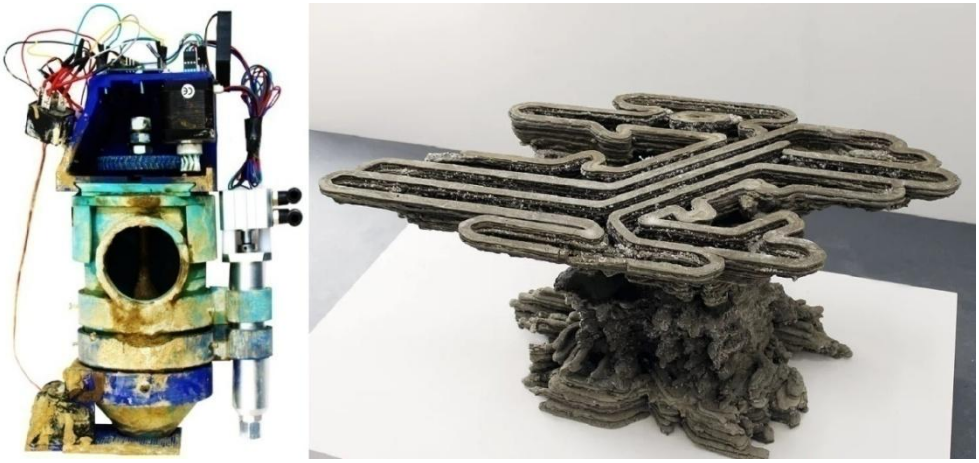


Obr. 2-5 Tisková hlava se šnekovým pohonem TUM [9]

Dalším příkladem aktivní tiskové hlavy se šnekovým pohonem je tisková hlava společnosti COBOD, konkrétně model BOD2 [4]. Společnost COBOD ve svém sortimentu nabízí průmyslová zařízení sloužící k 3D tisku cementových směsí. Zařízení jsou vždy osazena stejnou tiskovou hlavou se šnekovým pohonem, liší se pouze velikostí polohovacího rámu. Tisková hlava obsahuje mechanismus pro natáčení trysky ve směru pohybu tiskové hlavy, dále kamery sloužící pro online sledování průběhu tisku a přívod betonu k tiskové hlavě je řešen kombinací zásobníku umístěného nad tělem tiskové hlavy a přívodní hadice, která doplňuje tento zásobník. Tisková hlava obsahuje hmotnostní čidla, pokud klesne hmotnost tiskové hlavy pod určitou hranici dojde k sepnutí čerpadla na beton a doplnění zásobníku. Maximální rychlost pohybu tiskové hlavy je 1 $m \cdot s^{-1}$ a tisková hlava dokáže tisknout cementovou směs s příměsí kameniva o frakci 8–12 mm.

Obr. 2-7 Aktivní tisková hlava se šnekovým pohonem COBOD (upraveno) [4]

Technologie Amalgamma vyvinutá skupinou studentů z Barlett School of Architecture využívá pro své experimenty speciální tiskovou hlavu, která kombinuje použití aktivního pohonu uvnitř tiskové hlavy s úplným uzavíráním trysky [10]. Tisková hlava pracuje s cementovou směsí o nízké viskozitě, touto směsí je naplněna tisková hlava pomocí peristaltického čerpadla a uvnitř tiskové hlavy rotují míchací segmenty, které napomáhají tisknuté směsi vytékat z trysky. Ve chvíli kdy tisková hlava dojede do místa kde má být ukončen tisk, dojde k uzavření trysky pomocí klapkového mechanismu, čímž je zamezeno nekontrolovanému vytékání směsi z tiskové hlavy. Technologie amalgamma je však specifická především způsobem výstavby objektů. Tisková hlava vždy vytiskne jednu vrstvu stavěného objektu, poté dojde k nanesení polystyrenových kuliček do zbylé oblasti tiskového prostoru a ve třetím kroku tisková hlava nanese do oblastí okolo cementového výnosu lepidlo, které spojí jednotlivé polystyrenové kuličky a vytvoří tak stabilní stavěcí podložku pro tisk další vrstvy. Po ukončení tisku pak dojde k odstranění podpůrného polystyrenu a zachován zůstane pouze vytištěný, tvarově rozmanitý, betonový skelet s převisy. Touto technologií lze vyrábět například designově zajímavé bytové doplňky.



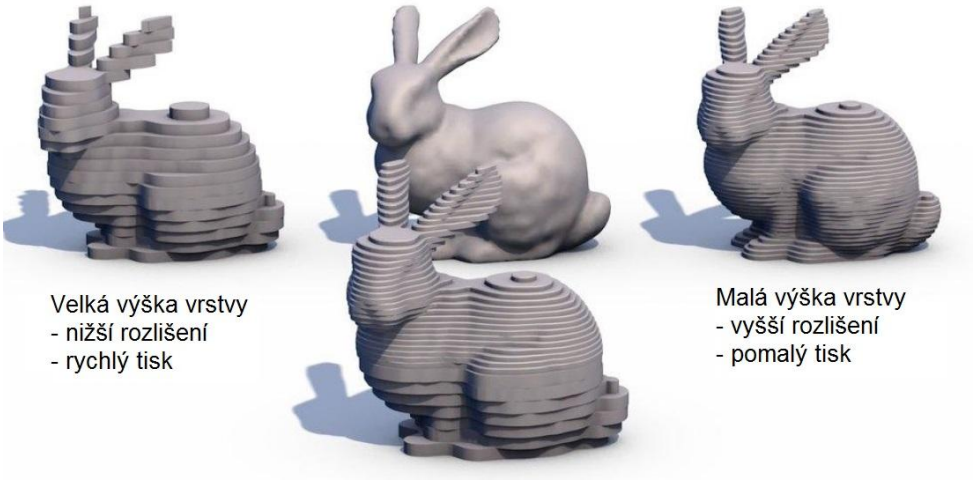
Obr. 2-6 Tisková hlava technologie Amalgamma (upraveno) [9]

2.1.3 Procesní parametry a systémy tvarování výnosu

Tvar a rozměrová přesnost výsledného výnosu hraje při výstavbě objektů aditivním způsobem zásadní roli. Na finální podobu výnosu má vliv řada faktorů mezi něž patří rychlost posuvu tiskové hlavy, druh, konzistence a množství tisknutého materiálu nebo tvar trysky. Tato kapitola se zabývá zmíněnými faktory a jejich vlivem na tvar výsledného výnosu.

Výška vrstvy

Výška vrstvy je základním parametrem, se kterým aditivní výroba pracuje. Je to rozměr ve svislém směru, kterého výnos dosáhne v rámci jednoho přejezdu tiskové hlavy. Při stanovování výšky vrstvy proti sobě jdou dva důležité parametry tisku a to rychlost tisku a rozlišitelnost objektu. Obecně u 3D tisku plastu platí, že čím rychlejší tisk je požadován tím větší výška vrstvy je volena a tím nižší je rozlišitelnost tisknutého objektu a naopak, dále by výška vrstvy neměla přesahovat 80% průměru trysky [11]. Vztah mezi výškou vrstvy a rozlišitelností objektu je názorně zobrazen na Obr. 2-8. Analogii vztahů platících pro 3D tisk plastů lze použít i pro tisk cementových směsí s tím, že extruze cementových směsí musí zohledňovat reologické vlastnosti tisknutého materiálu, které se od tisku plastu značně liší.



Obr. 2-8 Rozlišení vs. rychlost tisku (upraveno) [12]

Rychlost posuvu tiskové hlavy

K dosažení spojitého výnosu o požadovaných rozměrech je důležité synchronizovat rychlost posuvu tiskové hlavy s rychlostí extruze materiálu z trysky. Tyto procesní parametry pak vždy platí pouze pro konkrétní tisknutou směs, změnou složení směsi může dojít ke ztrátě požadované podoby výnosu. Rychlosti posuvu tiskové hlavy se u každého jednotlivého zařízení pro 3D tisk cementových směsí značně liší, tyto rychlosti se pohybují v řádu desítek [13] až stovek $mm \cdot s^{-1}$ [4].

Stanovením vhodných procesních parametrů 3D tisku cementových směsí pro různé tvary výnosu se zabýval ve své studii Ding [13]. Pomocí jejich experimentálního zařízení VF3DCP zkoušeli tisk výnosů s různými průměry kruhových trysek a různými procesními parametry a porovnávali pak soudržnost a tvar těchto výnosů. Experiment probíhal vždy se stejnou směsí, která byla z tiskové hlavy vytlačena do podoby 20 cm dlouhého rovného výnosu. V rámci experimentu byly provedeny testy pro 4 různé průměry trysek a u každého průměru trysky pak byla zhotovena série výnosů s různými rychlostmi posuvů tiskové hlavy a s různou rychlostí vytlačování. Výsledky experimentu jsou zobrazeny na Obr. 2-9 a příslušné procesní parametry v Tab. 2-1.

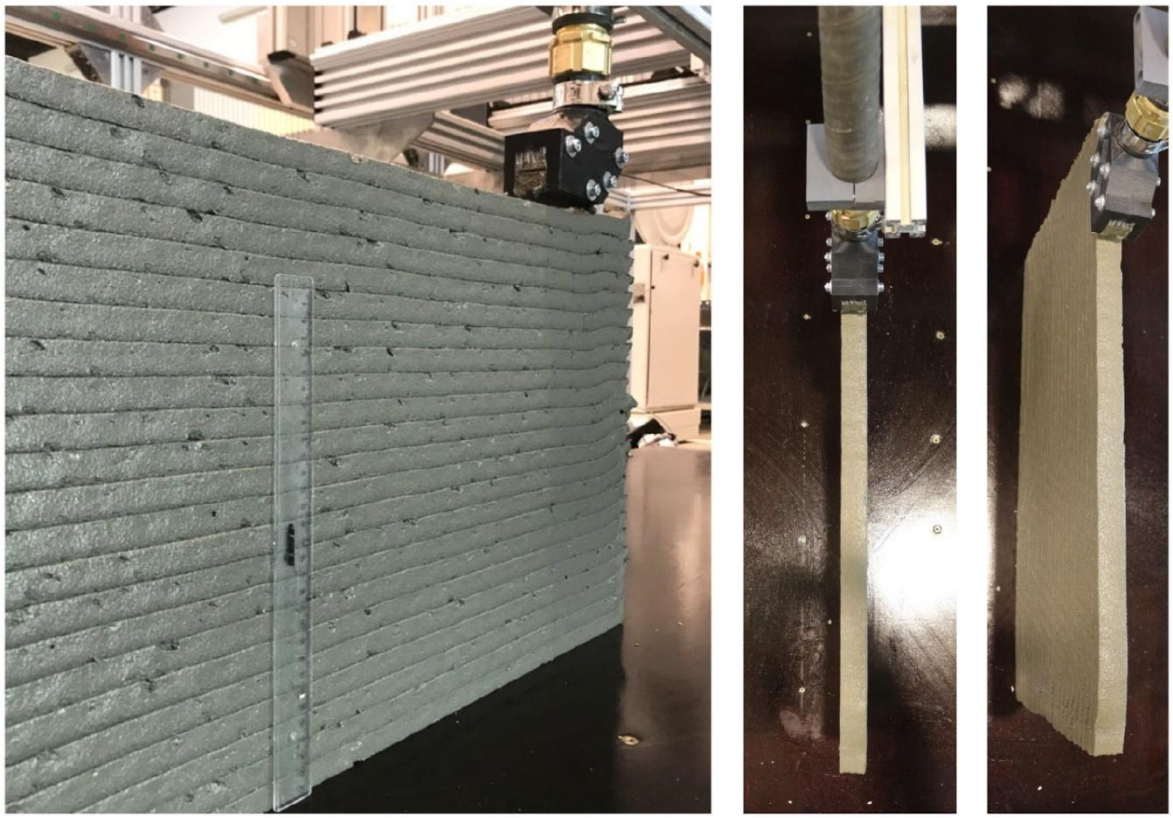
Obr. 2-9 Výnosy pro trysky, (a) 10 mm; (b) 15 mm; (c) 20 mm; (d) 24 mm [13]

Z naměřených dat vyplývá, že se zvyšující se rychlostí posuvu tiskové hlavy musí růst rychlost vytlačování materiálu z trysky, aby nedošlo k přerušení spojitosti výnosu. Nejlepších výsledků vzhledem ke spojitosti výnosu bylo dosaženo při použití trysky s průměrem 15 mm. Aby bylo dosaženo tvarové přesnosti a spojitosti výnosu je tedy důležité experimentálně ověřit procesní parametry pro jednotlivé trysky.

Tab. 2-1 Procesní parametry - rychlost pohybu trysky (mm/s), rychlost vytlačování materiálu určena otáčkami šnekového podavače (r/s) [13]

Průměr trysky 10 mm		**Průměr trysky 15 mm**		**Průměr trysky 20 mm**		**Průměr trysky 24 mm**	
Rychlost trysky	Otáčky šneku	Rychlost trysky	Otáčky šneku	Rychlost trysky	Otáčky šneku	Rychlost trysky	Otáčky šneku
10	0,4	10	0,2	10	0,4	10	0,5
20	0,5	20	0,4	20	0,6	20	0,8
30	0,6	30	0,6	30	0,9	30	1,2
40	0,7	40	0,8	40	1,2	40	1,6
50	0,8	50	1	50	1,4	50	2,2
60	1,0	60	1,2	60	1,6	60	3
70	1,2	70	1,4	70	1,9	70	3,8
80	1,5	80	1,6	80	2,3	80	4,6
90	1,8	90	1,8	90	2,8	90	5,5
100	2,2	100	2	-	-	100	6,4

Volbě vhodných procesních parametrů a geometrie trysky se v rámci svého výzkumu vystavitelnosti (viz kapitola 2.4.3) objektů z betonových směsí zabýval Nerella a spol. z Technické univerzity Drážďany [14]. V rámci svého výzkumu, který se zabýval především volbou vhodných procesních parametrů pro výstavbu objektů z betonových směsí s ohledem na ekonomickou efektivitu, popisují volbu vhodného poměru výšky a šířky extrudované vrstvy. Použité poměry stran obdélníkové trysky (výška trysky : šířka trysky) při popisovaných experimentech se pohybovaly v rozmezí od 1:3 do 2:3 [14]. Přičemž při použití velké výšky vrstvy a úzké stopy dosahuje výnos malé stability při nanášení další vrstvy (hrozí zborcení), ale stačí menší počet přejezdů trysky pro tisk objektu. Naopak při použití malé výšky vrstvy a široké stopy je výnos stabilnější, ale ke stavbě objektu je potřeba větší počet přejezdů.



Obr. 2-10 Vystavitelnost betonových směsí Nerella a spol.

Hlavní publikovaný experiment Nerella a spol. představuje výstavbu rovné stěny dlouhé 700 mm a vysoké 424,7 mm, tvořené z 25 vrstev betonové směsi vynesené tryskou o poměru stran (výška trysky : šířka trysky) 17 : 30 mm, což odpovídá poměru cca 3:5 [14]. Tento poměr je považován za nejvhodnější vzhledem k vystavitelnosti objektu při použití rychlosti posuvu trysky 75 mm/s a časové prodlevy mezi nanášením jednotlivých vrstev 2 minuty. Fotografie na Obr. 2-10 zachycuje tiskovou hlavu po dokončení 23. vrstvy.

Tvarování výnosu změnou tvaru trysky

Existuje několik způsobů, jak lze vynášený materiál tvarovat. Nejjednodušším z nich je tisk s využitím jednoduché kruhové trysky. Výhodou této trysky je, že u tisku s kruhovou tryskou nezáleží, na kterou stranu se tisková hlava pohybuje, výnos má vždy stejný tvar. Nevýhodou tohoto řešení je nízká rozměrová přesnost, nutnost tisknout s malou výškou vrstvy aby nedocházelo k roztékání materiálu a omezená kontrola nad tvarem výnosu.

Z toho důvodu je v určitých případech výhodné využití trysky se speciálním tvarem. Pokud má však tryska jiný, než kruhový tvar a je požadován stejný tvar výnosu ve všech směrech tisku, pak je nezbytné opatřit tiskovou hlavu mechanismem, který bude trysku natáčet ve směru tisku. Na Obr. 2-11 vlevo jsou zobrazeny různě tvarované trysky a na témže obrázku vpravo je zobrazena tvarová tryska s natáčecím mechanismem použitá v praxi. Vytištěný výnos má při použití tvarované trysky vetší geometrickou přesnost a lze stavět materiál s použitím větších výšek vrstvy.

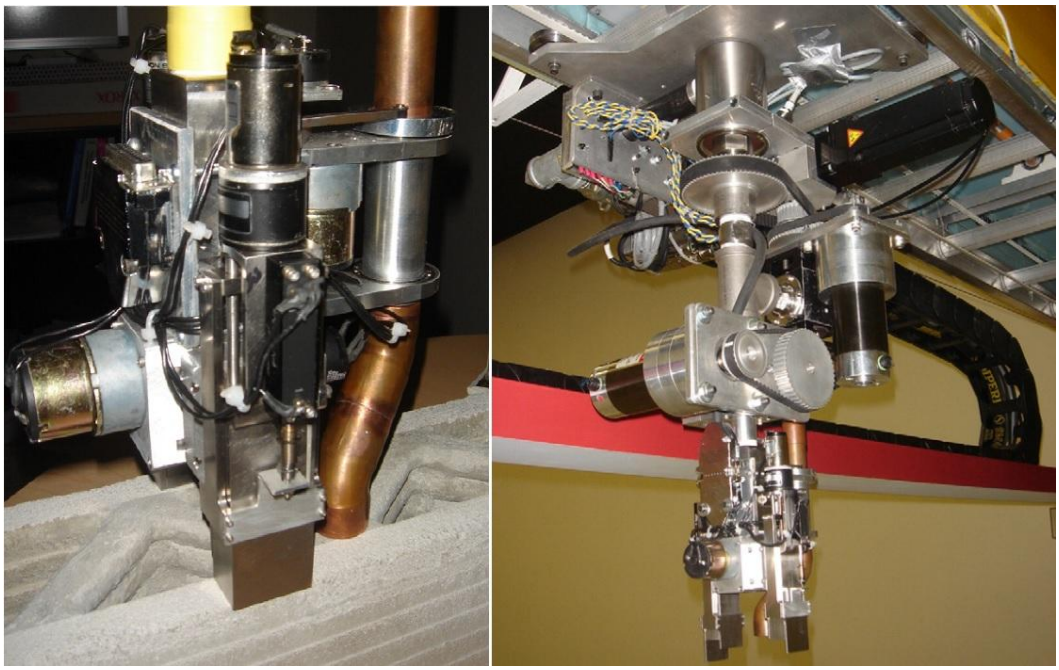
Obr. 2-11 Tvary trysek, natáčení trysky (upraveno) [3, 4]

Tvarování výnosu metodou Contour Crafting

Metoda Contour Crafting (CC) je pokročilá technologie tvarování výnosu při 3D tisku cementových směsí vynalezena Behrokhem Khoshnevisem z University of Southern California, USA [15]. Technologie CC je počítačem řízený proces výstavby objektů aditivním způsobem tzn. nanášením materiálu vrstvu po vrstvě, přičemž výhodou této technologie je zejména možnost nanášet velké vrstvy materiálu v rámci jednoho přejetí tiskové hlavy a přitom zachoval přesný a z pohledových stran hladký a spojitý tvar výsledného výnosu [5]. Toho tisková hlava metody CC dosahuje implementací systému "uhlazovacích" segmentů, které jsou umístěny po stranách trysky a při výstupu materiálu z trysky ho tvarují do požadované podoby viz Obr. 2-13 vpravo. Tato tisková hlava je pak určena pro tisk jednotlivých výnosů, které dosahují vyšší geometrické přesnosti než výnosy z jednoduché trysky.

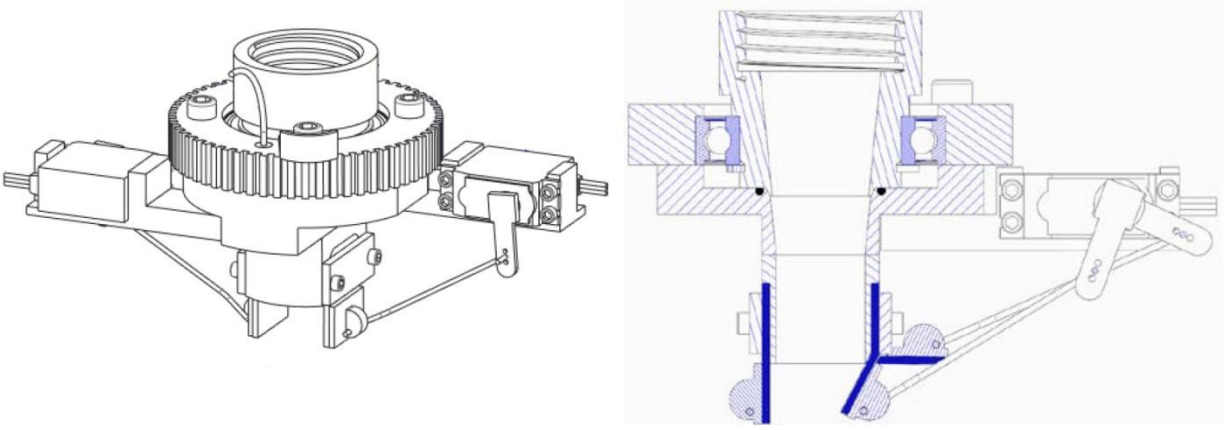
Dále technologie CC představuje jednoúčelovou tiskovou hlavu určenou pro tisk stěn domů s konkrétním tvarem a výplní viz. Obr. 2-13 vlevo. Tisková hlava v první vrstvě výstavby stěny vytiskne dvě vnější obvodové vrstvy a při druhém přejetí tiskové hlavy pak do prostoru mezi obvodovými vrstvami nanese vyztužující výnos, který spojí separované

části stěny v jeden celek. Výhodou této tiskové hlavy je možnost tisku velkého množství materiálu v rámci jednoho výnosu a urychlit tak dobu výstavby. Taková tisková hlava se používá pro tisk zejména prefabrikovaných stěn.



Obr. 2-13 Tisková hlava metoda Contour Crafting (upraveno) [5]

Zajímavý mechanismus založený na principu CC navrhla skupina studentů z Aalto University Finland [16]. Cílem jejich práce bylo navržení přídavného modulu k tiskové hlavě, který bude schopen tvarovat výnos pod úhlem, například při tisku kuželových objektů. Toho dosáhli implementací dvojice servomotorů, které přes táhla ovládají úhel náklonu dvou "hladítek", které tvarují vynášený materiál. Celý tento mechanismus je pak uložen k tiskové hlavě tak, že jej lze řemenovým převodem natáčet dle potřeby ve směru tisku. Mechanismus tedy umožňuje tisk tvarově přesných kónických objektů s uhlazenými obvodovými vrstvami.



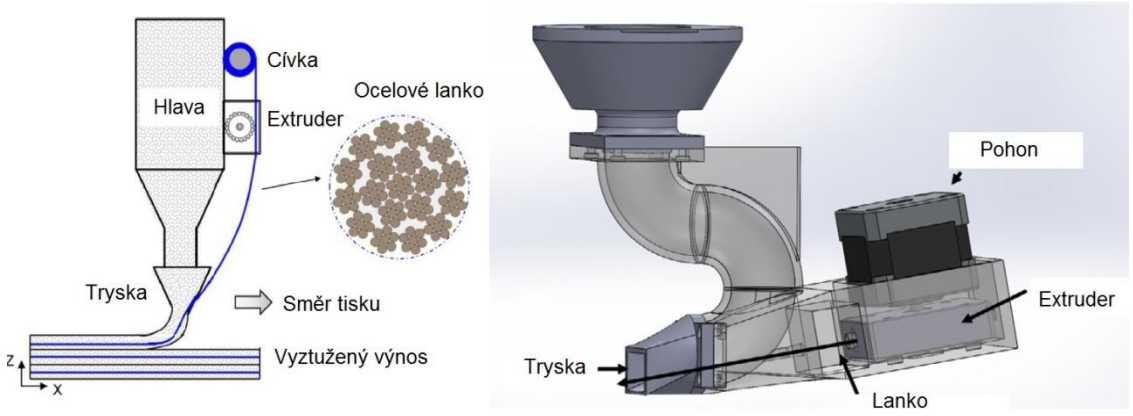
Obr. 2-12 Contour Crafting - Aalto University (upraveno) [16]

2.1.4 Systémy vyztužování

Ve stavebnictví se často používá tzv. železobeton, což je beton vyztužený ocelovými segmenty, které mají za úkol zvýšit pevnost a spolehlivost betonu a zamezit jeho praskání. Snaha používat vyztužovaný beton je i v technologii 3DCP. Automatizovat proces podávání výztuží však není triviální úlohou a i touto problematikou se zabývá řada výzkumných týmů.

Vyztužování cementové směsi železnými segmenty při 3DCP může probíhat hned několika způsoby. Jedním z ve stavebnictví běžně používaných způsobů je vyztužování pomocí drobných drátků přimíchaných přímo do cementové směsi [17]. Výhodou je jednoduchost aplikace výztuží bez potřeby implementace podávacího zařízení. Nevýhodou je však nekontrolovatelná orientace vláken v rámci výnosu, a tak ne vždy stejný efekt zlepšení mechanických vlastností.

Dalším možným systémem vyztužování je podávání ocelového lanka případně řetězu do vynášeného materiálu. K automatizaci tohoto procesu je nutné implementovat k tiskové hlavě podávací zařízení. Nevýhodou tohoto řešení vyztužování tisknutého objektu je problematický tisk v oblastech rohů objektů z důvodu nepoddajnosti podávaného lanka. Tento problém odpadá v případě použití podávání řetězu, při jeho použití však nedochází k významnějšímu zlepšení mechanických vlastností tisknutého objektu [18]. K největšímu zlepšení mechanických vlastností dochází při namáhání výnosu tahem, při použití sedmipramenného ocelového lanka dojde k nárůstu pevnosti v tahu o 290% [19].



Obr. 2-14 Podavač ocelového lanka [19, 20]

Provazování jednotlivých výnosů mezi sebou je dalším z možných druhů vyztužování při 3D tisku cementových směsí. Vyztužování může probíhat jak manuálně, tak může být automatizováno a implementováno jako přídavný modul k tiskové hlavě. Výhodou takového vyztužování je zlepšení propojenosti jednotlivých vrstev a odolnosti proti namáhání smykem. Vyztužování může být realizováno například zapichováním krátkých drátků do předchozího výnosu, drátky vyčnívají do doby, než dojde nanesení další vrstvy materiálu a spojení jednotlivých vrstev [21].

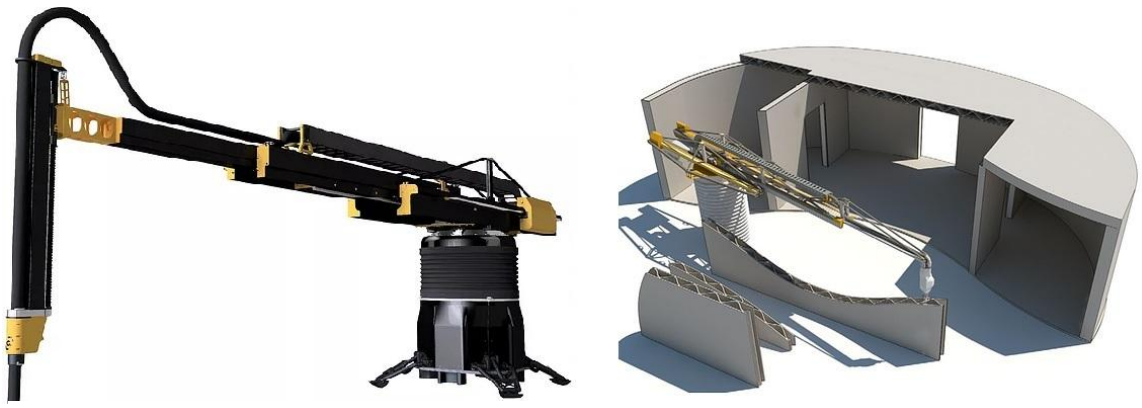
2.2 Systém polohování tiskové hlavy

Na zajištění spojitého a tvarově přesného výnosu nemá vliv pouze tisková hlava popisovaná v předchozích kapitolách, ale i zařízení, které tiskovou hlavou pohybuje v prostoru. Toto zařízení musí být navrženo tak, aby bylo schopné zajistit pohyb tiskové hlavy požadovanou rychlostí a přitom zůstala zachována jeho tuhost. Základní vstupní parametry při návrhu tohoto zařízení jsou tedy hmotnost tiskové hlavy, rychlost, které má zařízení dosahovat a rozměrová tolerance ve které má pracovat.

Velkorozměrovým tiskem cementových směsí se zabývá řada výzkumných týmů případně komerčně zaměřených společností. Existuje řada různých řešení, jak zajistit polohování tiskové hlavy v prostoru, tyto mechanismy lze kategorizovat podle souřadných systémů, ve kterých pracují, nebo podle druhu konstrukce. Mezi příklady zařízení pracujících v polárním souřadném systému patří např. výsuvné rameno společnosti ApisCor [22]. Příkladů zařízení pracujících v kartézském souřadném systému je celá řada, mezi nejznámější příklady patří: rámové řešení společnosti COBOD [4] nebo TU Eindhoven [6], dále portálový systém společnosti BetAbram [23], případně portálový systém Contour Crafting [5], delta systém společnosti WASP [24], nebo použití robotických ramen.

2.2.1 Výsuvné otočné rameno

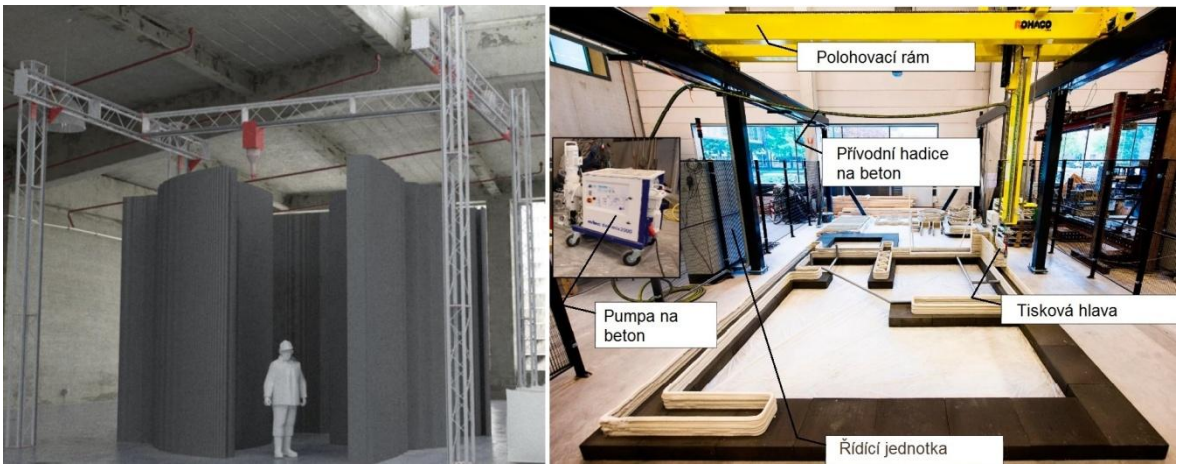
Tento odstavec se zabývá stručným popisem zařízení, vyvinutým společností ApisCor, které je určené k 3D tisku budov [22]. Zařízení je charakteristické prací v polárním souřadném systému, kdy je zařízení umístěno vhodně do stavěcího prostoru a tisk probíhá v rozsahu 360° okolo jeho základny. Mezi výhody tohoto zařízení patří malá prostorová náročnost při převozu, naopak jeho omezení spočívají v nutnosti využití pasivní tiskové hlavy z důvodu nižší únosnosti konstrukce při plném vyložení, nebo omezení tisku ve stavěcím prostoru spojené s umístěním základny zařízení uvnitř tisknutého objektu. Společnost ApisCor se kromě klasického 3DCP na této planetě věnuje ve spolupráci s NASA i potenciálním možnostem tisku mimo planetu Zemi.



Obr. 2-15 Výsuvné otočné rameno Apis Cor (upraveno) [22]

2.2.2 Rámová konstrukce

Zařízení pracuje v kartézském souřadném systému a stavěcí prostor je vymezen rámem, který zajišťuje polohování tiskové hlavy. Rám může být tvořen konstrukcí svařenou z profilů, popřípadě příhradovou konstrukcí. Pohyb konstrukce je zajišťován počítačem řízeným systémem motorů a pohyb v jednotlivých osách je vymezen soustavou vedení. Výhodou konstrukce je její tuhost, rychlost pohybu až $1\ m \cdot s^{-1}$ [4], přesnost a možnost nadimenzování konstrukce pro konkrétní tiskovou hlavu. Nevýhodou je špatná mobilita.



Obr. 2-16 Rámová konstrukce - vlevo COBOD [4], vpravo TU Eindhoven [6]

2.2.3 Portálová konstrukce

Tato konstrukce je inspirována portálovým systémem jeřábů využívaným například v přístavech. Konstrukce je tvořena portálem, v rámci kterého je vymezen pohyb ve dvou osách. Pohyb ve třetí ose je pak zajištěn pohybem celého zmíněného portálu po dvojici rovnoběžných kolejnic. Mezi výhody tohoto systému patří možnost snadného rozšíření tiskového prostoru prodloužením kolejnic a snadná manipulace. Tohoto systému polohování tiskové hlavy využívá např. metoda Contour crafting [5] viz Obr. 2-17 vpravo, nebo společnost BetAbram [23] viz Obr. 2-17 vlevo.

Obr. 2-17 Portálová konstrukce - vlevo Bet Abram [23], vpravo CC [5]

2.2.4 Delta konstrukce

Tato kapitola se zabývá delta konstrukcí vyvinutou italskou společností WASP, informace pro tento odstavec byli čerpány z jejich webových stránek [24]. Jedná se o příhradovou konstrukci sestavenou z jednotlivých nosníků. Delta konstrukce pracuje v kartézském souřadném systému, specifická je zejména uložením tiskové hlavy, která je zavěšena na trojici ramen pohyblivě uložených ke třem vertikálním pilířům konstrukce. Konstrukce je vhodná zejména pro tisk úzkých, vysokých objektů ideálně s kruhovým půdorysem. Maximální rychlost posuvu tiskové hlavy je $400\ mm \cdot s^{-1}$. Konstrukce vznikla za účelem tisku přírodních směsí na bázi hlíny obsahujících dlouhé, vláknité materiály, jako je sláma. Výhodou této konstrukce je její snadná rozebíratelnost.

Obr. 2-18 BigDelta společnosti WASP (upraveno) [24]

2.2.5 Robotické rameno

Pořizovací cena každého z výše uvedených jednoúčelových polohovacích zařízení však není zanedbatelná a proto je vhodné pro prvotní testy tiskové hlavy vzít v úvahu možnost využití univerzálnějšího zařízení, kterým je například robotické rameno KUKA, dostupné v NETME Center VUT. Robotická ramena jsou v praxi hojně využívaným řešením pro manipulaci objektů v prostoru, při jejich využití je však nutné vzít v úvahu jejich omezený manipulační prostor a únosnost. Konkrétně dostupné robotické rameno KUKA KRHA60 disponuje manipulačním prostorem 2033 x 2230 x 2429 mm a únosností při plném vyložení 30 kg.

2.3 Čerpání a doprava betonových směsí

Dalším důležitým uzlem řetězce zajišťujícího 3DCP je čerpadlo na beton, jehož funkce spočívá v dopravě čerstvé betonové směsi k tiskové hlavě. Komerčně dostupná čerpadla sloužící k dopravě betonových směsí lze rozdělit podle principu činnosti na čerpadla pístová, šneková a peristaltická.

2.3.1 Čerpadla se šnekovým pohonem

Princip funkce šnekového čerpadla na betonové směsi spočívá v rozpohybování betonu pomocí šnekovnice otáčející se ve žlabu umístěném pod násypkou. Rotací šnekovnice je dopravovaná směs protlačována potrubím až na požadované místo. Šneková čerpadla lze dělit podle druhu pohonné jednotky na elektrická a agregátová. Výhodou šnekového pohonu je možnost dosažení kontinuálního toku materiálu a jeho množství lze snadno řídit změnou otáček šnekovnice. Rozsah dopravovaného množství se u komerčně dostupných čerpadel pohybuje od 5 do 75 l/min. Příklady šnekových čerpadel viz Obr. 2-19.

Obr. 2-19 Elektrické šnekové čerpadlo (vpravo) [25], dieselové (vlevo) [26]

2.3.2 Čerpadla s pístovým pohonem

Konstrukce pístového čerpadla na beton je založena na dvojici válců, ve kterých se pohybují písty s opačnou fází. Válce jsou uloženy rovnoběžně ve spodní části čerpadla u násypky na beton. Jeden píst vždy beton podtlakem nasává z prostoru násypky a druhý jej vytlačuje přes otočné koleno do výstupního potrubí. Tato čerpadla jsou určena primárně na pumpování velkých objemů materiálu, dopravovaná množství materiálu se pohybují od 280 do 2300 l/min. Opět se čerpadla dodávají buď s elektrickým nebo dieselovým pohonem. Nevýhodou oproti šnekovým čerpadlům je menší plynulost chodu. Příklad pístového, dieselového čerpadla je uveden na Obr. 2-20.

Obr. 2-20 Pístové čerpadlo na beton CIFA [27]

2.3.3 Peristaltická čerpadla

Třetím mechanismem, který se využívá pro dopravu betonu je peristaltický mechanismus. Jeho funkce je založena na deformaci pružného člene, který díky své stlačitelností umožňuje protlačování dopravovaného materiálu ze zásobníku do dopravního potrubí. Velkou nevýhodou těchto čerpadel je nevhodnost pro čerpání směsí s větší frakcí kameniva z důvodu snížení životnosti pružného člene.

2.3.4 Připojovací segmenty

Pro návrh tiskové hlavy jsou důležité zejména připojovací rozměry potřebné k zajištění správného připojení přívodní hadice od pumpy na beton. Hadice k pumpám na beton se dodávají v několika standardizovaných průměrech odpovídajících příslušnému čerpadlu. Nejčastěji používané vnitřní průměry hadic jsou: 50, 65 a 100 mm. Připojování hadic k pumpám případně dalším zařízením je realizováno pomocí rychlospojek. Nejčastěji používané rychlospojky jsou rychlospojky typu KAMLOK viz Obr. 2-21.

Obr. 2-21 Hadice pro dopravu betonu [28], spojky KAMLOK [29]

2.4 Materiálové vlastnosti tisknuté směsi

Porozumění základním procesům probíhajícím v tiskové směsi je předpokladem k zajištění správné funkce tikové hlavy. Tisková hlava navrhovaná v rámci této diplomové práce je určena pro tisk betonové směsi s příměsí kameniva o frakci 4 - 8 mm.

2.4.1 Základní složení betonu

Beton je definován jako kompozitní materiál složený ze směsi cementu, vody, hrubého a drobného kameniva a případně doplňujících složek viz Obr. 2-22. Základní vlastností betonu je, že své charakteristické vlastnosti získává hydratací cementu [30].

Obr. 2-22 Složení betonových směsí

Cement

Cement je hydraulické pojivo, tj. jemně mletá anorganická látka, která po smíchání s vodou, v důsledku hydratačních procesů, tuhne a tvrdne [31]. Po zatvrdnutí pak cement zachovává svoji pevnost, jak na vzduchu tak i pod vodou.

Kamenivo

Kamenivo je složka betonu s největším zastoupením ve výsledné směsi. Kamenivo zaujímá 75 - 80 % objemu betonu a jeho hlavní funkcí je tvorba nosné kostry betonu [30]. Obsah kameniva v betonu má zásadní vliv na jeho pórovitost. Pórovitost je nežádoucí jev vzniku dutin v betonu a předcházet vzniků pórů betonu lze použitím vhodného poměru kameniva o různé velikosti zrn. Kamenivo lze dělit podle různých kritérií: frakce (velikost zrn), petrografie (složení hornin), hmotnosti (těžké, hutné, pórovité) nebo vzniku (těžené a drcené) [30]. Nejčastěji používané rozdělení kameniva podle frakce viz Tab. 2-2.

Tab. 2-2 Frakce kameniva

Označení	Velikost (mm)	Příklad
Jemné	0 - 0,25	Moučka, Filer
Drobné	0 - 4	Písek
Hrubé	4 - 63	Štěrk, drť, štěrkopísek

Voda

V betonářské technologii má voda funkci hydratační a funkci reologickou [30]. Funkce reologická znamená, že voda v kombinaci s dalšími složkami betonu umožňuje vznik tvárné čerstvé směsi o určité viskozitě. Druhá funkce, tedy funkce hydratační, umožňuje hydrataci suché cementové směsi a po vytvrdnutí vznik tuhé struktury cementového kamene.

Doplňující složky

Doplňující složky jsou často přidávané do směsí za účelem změny vlastností betonových směsí v čerstvém stavu, případně zlepšení mechanických vlastností po vytvrdnutí. Tyto přídavné složky lze rozdělit podle skupenství ve kterém se nacházejí na přísady a příměsi.

Příměsi jsou práškovité materiály, které se přidávají do čerstvého betonu za účelem zisku zvláštních vlastností nebo zlepšení některých konkrétních stávajících vlastností [30]. Mezi zlepšované vlastnosti patří například přilnavost k podkladu, smrštivost, pevnost nebo schopnost tuhnutí pod vodou za normálních teplot. Příkladem těchto příměsí je například létavý popílek, což je vedlejší produkt spalování uhlí, dále tzv. křemičité úlety, které jsou odpadem některých hutnických provozů, nebo barevné pigmenty, které slouží k probarvení stavebních materiálů [30].

Přísady jsou chemické sloučeniny, které se přidávají do betonových směsí v malých množstvích cca 0,2 - 5 % hmotnosti cementu ve směsi [31]. Přísady se obvykle přidávají do záměsové vody a poté jako roztok do míchané směsi. Modifikace vlastností čerstvého nebo tuhnoucího betonu je hlavní motivací pro přidávání příměsí do betonové směsi. Příměsi mohou způsobovat efekt: voduredukující (snížení spotřeby záměsové vody), stabilizační (zadržující vodu při tuhnutí), provzdušňovací (vznik pórů), urychlující nebo zpomalující tuhnutí.

2.4.2 Reologické vlastnosti cementových směsí

Reologie je materiálová nauka zabývající se deformací a tokem látek, řeší vztahy mezi chemickým složením, strukturou a mechanickými vlastnostmi kapalin a tuhých látek, které za určitých podmínek mohou také téct [30]. Tok látek je charakterizován pomocí smykového napětí a smykové rychlosti. Jednou ze základních veličin v reologii, které charakterizují tok látek je viskozita [32].

Viskozita vyjadřuje poměr mezi změnou rychlosti a tečným napětím. Viskozita kapalin je charakterizována vnitřním třením, které závisí na teplotě kapaliny (s rostoucí teplotou klesá viskozita) a přitažlivých silách mezi částicemi, čím větší přitažlivá síla mezi částicemi působí, tím vyšší je viskozita [33]. Viskozitu můžeme rozdělit na dynamickou a kinematickou viskozitu. Dynamická viskozita vyjadřuje snahu kapaliny bránit se proti jejímu tečení a jednotkou dynamické viskozity je Pa·s. Kinematická viskozita je definována jako podíl dynamické viskozity a hustoty měřené látky, jednotkou kinematické viskozity je $m^2 \cdot s^{-1}$.

Z hlediska hodnocení tokových vlastností se látky dělí na newtonovské a nenewtonovské. Pro tečné napětí newtonovských (ideálně viskózních látek) platí klasický Newtonův zákon:

$$\tau = \eta \cdot \frac{du}{dx} = \eta \cdot D \qquad \text{(2-1) [33]}$$

Kde:

τ	[Pa]	smykové napětí
η	[Pa·s]	dynamická viskozita
D	[s^{-1}]	rychlostní gradient (smyková rychlost)

Křivka popisující závislost proměnných uvedených ve vztahu 2-1, tedy závislost smykového napětí na smykové rychlosti se nazývá toková křivka a pro newtonowské kapaliny je lineární.

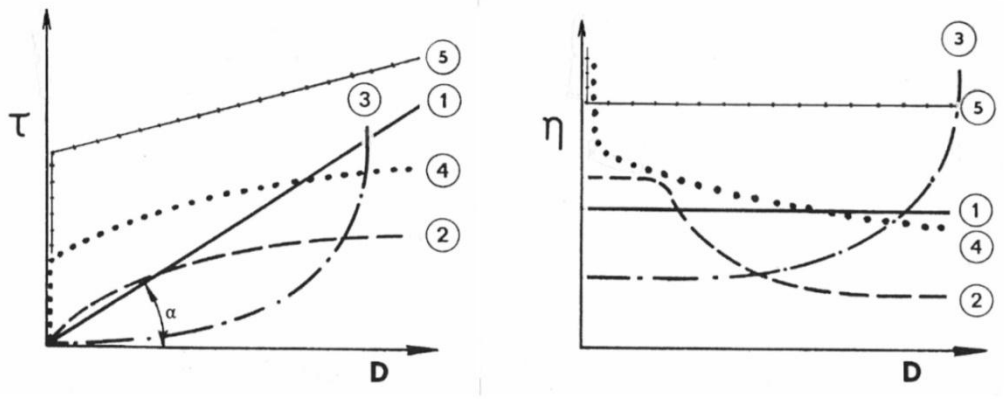
Kapaliny, které se Newtonovým zákonem neřídí a jsou reologicky složitější, se nazývají nenewtonovské. U nenewtonovských kapalin není smykové napětí úměrné smykové rychlosti a platí zde vztah:

$$\tau = \eta_z \cdot D \qquad \text{(2-2) [33]}$$

Kde:

τ	[Pa]	smykové napětí
η_z	[Pa·s]	zdánlivá dynamická viskozita (není konstantní, $\eta=\eta(D)$)
D	[s^{-1}]	rychlostní gradient (smyková rychlost)

Nenewtonovské tekutiny se dělí na Binghamské (tečou až po dosažení určitého napětí – meze toku), dilatantní (zdánlivá viskozita roste s rostoucím gradientem rychlosti) a pseudoplastické (zdánlivá viskozita klesá s rostoucím gradientem rychlosti) [34].



Obr. 2-23 Tokové a viskózní charakteristiky kapalin - 1- newtonská kapalina 2- strukturně viskózní kapalina 3- dilatantní kapalina 4- plastická kapalina 5- binghamská kapalina, [33]

Některé nenewtonovské kapaliny vykazují změnu zdánlivé viskozity v čase při působení konstantního smykového napětí. Pokud dochází ke snižování zdánlivé viskozity v čase působením konstantního smykového napětí nazýváme kapaliny tixotropní, pokud se zdánlivá viskozita naopak zvyšuje jedná se o kapaliny reopektické.

Reologie cementových směsí

Na reologické vlastnosti cementových směsí má vliv několik základních faktorů a to: druh a jemnost použitého cementu, vodní součinitel, druh použité přísady, čas a okolní teplota. Cementové směsi obecně vykazují tixotropní chování. Přidáním superplastifikačních přísad o nízké koncentraci lze dosáhnout chování newtonovského a při koncentracích vysokých dokonce chování plastického (binghamského) [34]. Pro definování tokových křivek cementových směsí existuje řada matematických modelů mezi něž patří: Binghamův, mocninný nebo Herschel-Bulkeyho model.

Tab. 2-3 Reologie cementových směsí [34]

Materiál	Cementová pasta	Malta	Tekoucí beton	Samozhutnitelný beton	Beton
Mez toku (Pa)	10-100	80-400	400	50-200	500-2000
Plastická viskozita (Pa·s)	0,01-1	1-3	20	20-100	50-100

Měření reologických vlastností

Stanovení tokové křivky v praxi je realizováno pomocí průtokových, pádových případně rotačních viskozimetrů. Toková křivka nenewtonovských kapalin se stanovuje zejména třetím z uvedených viskozimetrů, z důvodu nutnosti zachování laminárního proudění materiálu v průběhu celého měření [34]. Měřením reologických vlastností stavebních hmot se zabývala Hegrová [34], její práce je zdrojem informací pro následující 4 odstavce.

Princip měření pádovými reometry je založen na sledování rychlosti pádu tělesa o známé geometrii v kapalině jejíž viskozitu určujeme. Pádovým tělískem bývá obvykle koule a mezi nejpoužívanější pádové viskozimetry patří Stokesův, případně Höpplerův viskozimetr. Výhodou těchto viskozimetrů je široký rozsah měřených viskozit, naopak nevýhodou je špatná údržba.

Měření viskozity pomocí výtokových pohárků patří mezi nejjednodušší používané metody měření. Měření probíhá tak, že z pohárku o jasně definované geometrii vytéká působením gravitace měřená kapalina. Viskozita je poté vypočtena z doby za jakou kapalina proteče. Mezi nejznámější výtokové pohárky patří Fordův pohárek.

Rotační reometr je zařízení, pomocí kterého lze změřit viskozitu, rychlost smykové deformace a smykové napětí, což jsou důležité parametry pro stanovení tokové křivky kapalin. Měřená kapalina je vystavovaná smyku mezi dvěma definovanými plochami, z nichž jedna je v klidu (stator) a druhá vykonává rotační pohyb (rotor), přičemž je vyhodnocován výsledný brzdný účinek kapaliny. Rotační viskozimetry existují v různých konfiguracích: deska-deska, kužel-deska, válec-válec.

Kapilární reometry se používají pro hodnocení indexu toku taveniny. Funkce kapilárního reometru spočívá v protlačování taveniny kapilárou o dané délce a průměru. Hodnotí se množství vyteklého materiálu za 10 minut. Výhodou reometru je jeho vysoká přesnost, nevýhodou naopak možnost měření pouze newtonovských kapalin.

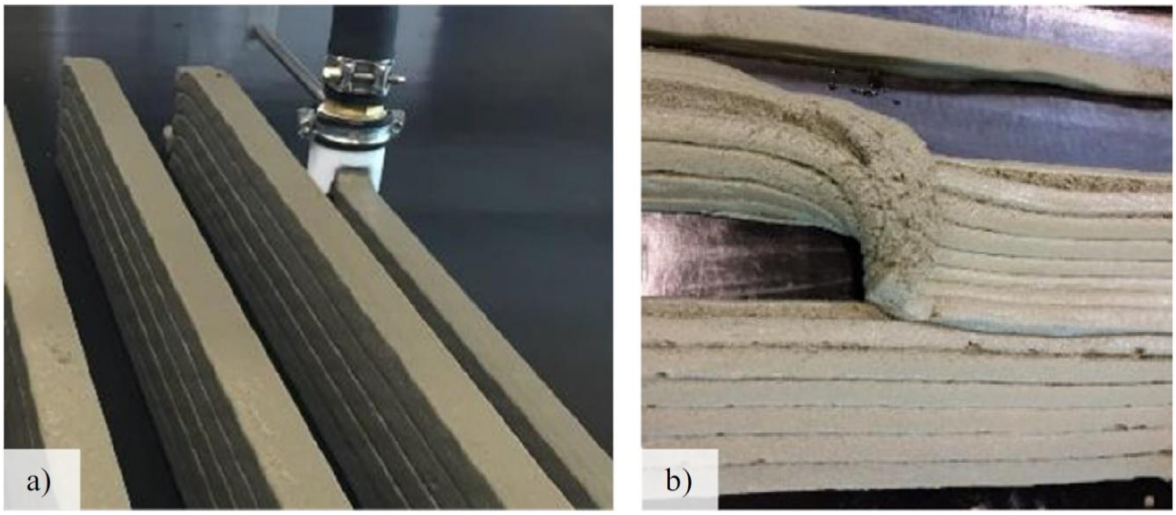
2.4.3 Aditivní zpracování tisknuté směsi

Beton je běžně zpracováván technologií lití do forem, případně nanášen ve formě nástřiku, 3D tisk betonu je novým inovativním postupem, který umožňuje vytvářet objekty složitých geometrických tvarů nanášením materiálu vrstvu po vrstvě [35]. S vývojem nové technologie zpracování betonu je nutné zavést nové pojmy (vystavitelnost, tisknutelnost, zpracovatelnost), které popisují vlastnosti směsi ve vztahu k aditivnímu nanášení. Definováním těchto pojmů se zabýval Austin a spol. v článku [35], jehož obsah je hlavním zdrojem informací pro následující 2 odstavce.

Aby materiál vykazoval dobrou tisknutelnost, musí být snadno vytlačitelný z trysky tiskové hlavy do podoby spojitého výnosu. Tisknutelnost je ovlivněna řadou faktorů, jako

je množství vody ve směsi, poměr jemných a hrubých částic ve směsi nebo doba uplynulá od smísení směsi.

Vystavitelnost je definována jako schopnost materiálu stavět jednotlivé výnosy na sebe bez toho, aniž by došlo ke zborcení stavěného objektu, zároveň však musí dojít k jejich dostatečnému propojení. Vystavitelnost je měřena jako počet výnosů, které je na sebe možné vynést bez toho, aniž by došlo ke znatelné deformaci vedoucí k jejich zborcení. Příklad testů vystavitelnosti objektu viz Obr. 2-24 [14].



Obr. 2-24 Vystavitelnost - a) vrstvení výnosů, b) zborcená stavba [14]

Zpracovatelnost betonu je běžně používaný pojem ve stavebnictví, který určuje dobu od smíchání do počátku tuhnutí směsi [30]. Zpracovatelnost směsi je definována řadou vlastností, které zastřešuje pojem reologické vlastnosti betonu.

Tisknutelnost, vystavitelnost a zpracovatelnost tisknuté směsi jsou pojmy, které charakterizují vhodnost betonu pro 3D tisk. Tyto parametry směsi však mnohdy jdou proti sobě - čím lepší je tisknutelnost, tím horší je vystavitelnost a naopak. Návrh směsi proto musí stanovit vhodný kompromis mezi těmito parametry tak, aby byl materiál vhodný pro zpracování aditivním způsobem.

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Analýza problému

Práce se zabývá konstrukčním návrhem tiskové hlavy určené pro 3D tisk betonových směsí. Tato práce navazuje na moji bakalářskou práci, kde byla představena základní konstrukce tiskové hlavy a v rámci diplomové práce bude navržena konstrukce nová s cílem snížení hmotnosti a rozšíření tiskové hlavy o přídavné mechanismy. Hlavním problémem stávající tiskové hlavy je její vysoká hmotnost (hmotnost tiskové hlavy je 33,5 kg, nosnost robotického ramene KUKA určeného pro testy pouze 30 kg) a absence systému pro přesnější tvarování výnosu. Snížení hmotnosti tiskové hlavy vede ke snížení setrvačných sil působících na tiskovou hlavu při jejím pohybu prostorem, což snižuje nároky na robustnost polohovacího zařízení. Implementace pokročilejšího systému tvarování výnosu by měla poskytnout větší stabilitu výnosu, lepší rozměrovou přesnost a kvalitu povrchu stavěného objektu. Řešení diplomové práce pokrývá oblasti dopravování materiálu, konstrukce, MKP analýz, zjišťování vstupních parametrů a při řešení se očekává řada dílčích problémů.

Pro řešení snížení hmotnosti dílů je nutné znát silové účinky působící na jednotlivé komponenty tiskové hlavy. Stěžejním silovým účinkem je krouticí moment potřebný k roztočení šnekového podavače uvnitř těla tiskové hlavy naplněné tisknutým materiálem. Samotné měření krouticího momentu však není triviální úlohou a bude nutné se mu podrobněji věnovat. Předpokládaným řešením problematiky zjišťování krouticího momentu a provozních parametrů tiskové hlavy BP je návrh testovacího zařízení, které bude sloužit k ustavení tiskové hlavy v prostoru a zjišťování potřebných hodnot.

Očekávaným problémem při realizaci experimentů s tiskovou hlavou je rychlost tuhnutí tisknutého materiálu. Časová proměnlivost reologických vlastností tisknuté směsi by mohla zásadně ovlivnit výsledky měření, a proto bude nutné pro každý test namíchat vždy čerstvou směs, aby bylo dosaženo vždy stejných podmínek experimentu. To povede ke značné časové náročnosti a vzniku velkého množství odpadního materiálu. Z toho důvodu je vhodné zvážit návrh substituční směsi (případně vynechání složky urychlující tuhnutí) s podobnými reologickými vlastnostmi, která by nevykazovala tak rychlou časovou změnu reologických vlastností.

Konstrukční výzvou bude návrh mechanismu, který bude zajišťovat natáčení trysky ve směru tisku. Důležitá bude volba vhodných materiálů, které budou vystaveny kontaktu s tisknutou směsí (zajištění trvanlivosti a nízké hmotnosti dílů). Současně bude nutné zajistit dostatečnou těsnost vzájemně se pohybujících dílů tak, aby nedocházelo ke kontaminaci uložení a zadření celého natáčecího mechanismu.

Problematickým úkolem spojeným s experimenty je synchronizace pohonu šneku tiskové hlavy s přívodem tisknutého materiálu od externí pumpy a zprovoznění tak celého řetězce, který bude ve styku s tisknutou směsí. Řešením tohoto úkolu bude experimentální ladění procesních parametrů na základě podoby tisknutého výnosu. Posledním krokem nutným k ověření funkce nově navržené tiskové hlavy bude tisk reálného objektu, zde bude nutné vyřešit synchronizaci nejen čerpadla s pohonem šneku, ale i polohovacího zařízení a pohonu natáčení výstupní trysky.

3.2 Analýza, interpretace a zhodnocení poznatků z rešerše

Rešerše byla zaměřena na možnosti a vhodnost použití různých mechanismů využívaných v rámci tiskových hlav určených pro 3D tisk betonových směsí. Vzhledem k tomu, že tato práce je zaměřena zejména na konstrukční úpravy a implementaci nových mechanismů k tiskové hlavě, tak největší část rešerše byla věnována právě tomuto tématu.

V prvních kapitolách byla nejprve ověřena vhodnost použití aktivní tiskové hlavy pro požadované účely. Z rešerše vyplývá, že pro tisk směsí s obsahem větších částic jako jsou dřevěné štěpky případně kamenivo není vhodné použít pasivní tiskovou hlavu z důvodu nebezpečí nekontrolovaného vytékání směsi z tiskové hlavy. Pístový pohon u aktivní tiskové hlavy pak není vhodný zejména z důvodu nutnosti přerušování tisku za účelem plnění tiskové hlavy tisknutým materiálem. Vhodnost použití aktivní hlavy se šnekovým pohonem pro účely tisku betonové směsi s příměsí kameniva o frakci (4–8 mm) tedy byla potvrzena.

Dále se rešerše zabývala procesními parametry, které by bylo vhodné zvolit pro tiskovou hlavu při experimentálním ověření její funkce, aby byla zajištěna spojitost výnosu a rozměrová přesnost. Z rešerše vyplývá, že každá společnost používá pro své systémy tisku značně odlišné procesní parametry a lze tedy stanovit pouze přibližný interval vhodných procesních parametrů. Rychlosti posuvu tiskové hlavy se pohybují od 0,01 $m \cdot s^{-1}$ [13] až po 1 $m \cdot s^{-1}$ [4]. Rychlosti otáčení šnekovnice při tisku s aktivní tiskovou hlavou se šnekovým pohonem se pohybují od 0,4 do 2,8 otáčky za sekundu [13]. Zmiňované procesní parametry odpovídají konkrétním tiskovým hlavám, předpokládané procesní parametry vyrobené tiskové hlavy by měli spadat do uvedených intervalů, jejich přesné hodnoty však bude nutné stanovit experimentálně.

Dalším celkem řešeným v rámci rešeršní části práce byly možnosti tvarování výnosu. K tomuto konstrukčnímu uzlu lze přistoupit několika způsoby: tvarování prostou kruhovou tryskou, tryskou se specifickým tvarem a implementovaným systémem natáčení nebo metodou contourcrafting. Nejlepších výsledků rozměrové přesnosti lze dosáhnout použitím systému metody contourcrafting, což je předpokládaný směr vývoje navrhované tiskové hlavy.

3.3 Cíl práce

Cílem diplomové práce je navrhnout a realizovat konstrukci tiskové hlavy určené pro kontinuální 3D tisk betonových směsí. Mezi hlavní sledované parametry tiskové hlavy patří požadovaná rychlost extruze 0,5–2 $m3 \cdot h^{-1}$ a hmotnost tiskové hlavy, která by měla být minimálně o 25 % nižší než u předchozí verze tiskové hlavy. Tisková hlava je určena pro tisk betonové směsi s příměsí kameniva o frakci 4–8 mm, přičemž se předpokládá implementace pokročilého systému tvarování extrudovaného materiálu s cílem zlepšit přesnost a stabilitu výnosu. Pro zjištění parametrů potřebných pro návrh budou provedeny testy stávající tiskové hlavy. Výstupem práce je vyrobená funkční tisková hlava splňující požadované parametry.

Dílčí cíle diplomové práce:

- zpracovat přehled současných řešení tiskových hlav
- identifikovat parametry současné tiskové hlavy
- navrhnout konstrukci tiskové hlavy
- realizovat výrobu a provést funkční testy

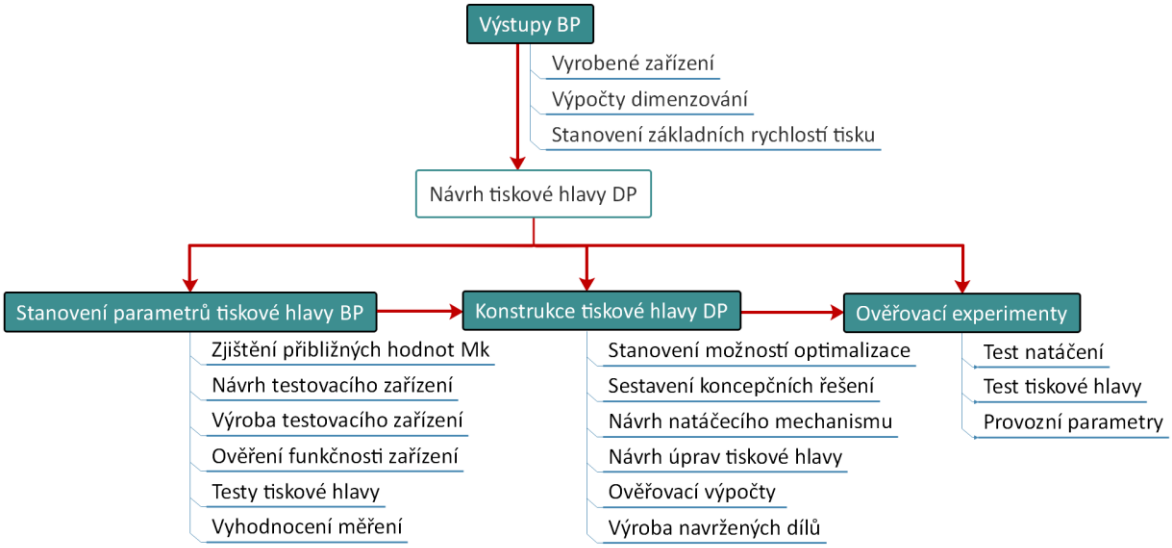
4 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ

Před představením samotných koncepčních návrhů je vhodné uvést postup řešení diplomové práce. Diplomová práce navazuje na moji bakalářskou práci, v rámci které byla navržena a vyrobena první generace tiskové hlavy. Postup řešení diplomové práce lze rozdělit do tří hlavních celků: stanovení parametrů existující tiskové hlavy, konstrukce nové generace tiskové hlavy a ověřovací experimenty.

V rámci celku stanovení parametrů stávajícího řešení tiskové hlavy bude nejprve tisková hlava z BP uvedena do provozu a bude zkontrolována její funkčnost. Následně budou stanovovány vhodné procesní parametry tiskové hlavy, budou provedeny průtokové testy a měření za účelem zjištění krouticího momentu potřebného pro pohon tiskové hlavy. Zjišťování těchto parametrů není triviální úlohou a v rámci diplomové práce bude nutné zkonstruovat měřicí zařízení, které umožní takové testy provést.

Konstrukce nové generace tiskové hlavy bude navržena s ohledem na závěry vyvozené z měření parametrů tiskové hlavy. Důležité pro dimenzování prvků tiskové hlavy budou zejména testy krouticího momentu potřebného pro pohon tiskové hlavy, na základě nichž bude možné snižovat hmotnost jednotlivých dílů tiskové hlavy. Stěžejní díly konstrukce budou kontrolovány pomocí empirických vztahů a MKP výpočtů a výsledné modely hlavy pak budou rozpracovány do podoby výkresové dokumentace a budou vyrobeny.

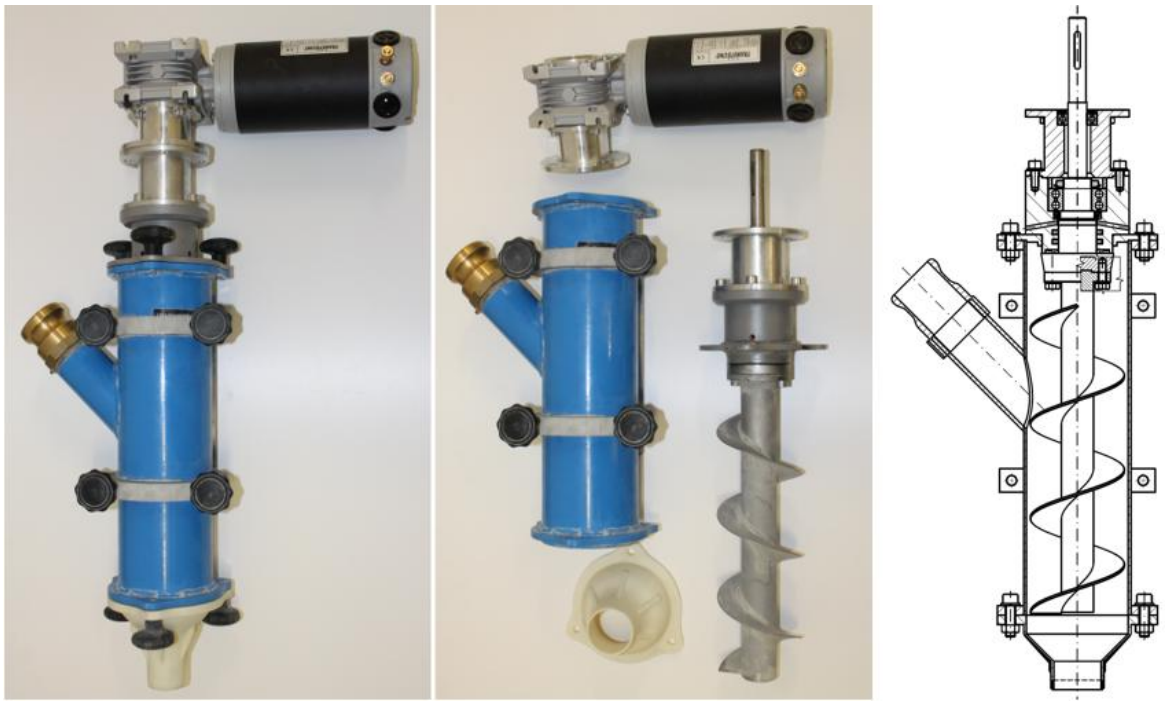
Posledním krokem v řešení diplomové práce bude uvedení tiskové hlavy do provozu, ověření funkce navržené tiskové hlavy a stanovení rozsahu základních provozních nastavení vhodných pro tisk.



Obr. 4-1 Myšlenková mapa řešení DP

4.1 Stávající stav tiskové hlavy

Konstrukční návrh tiskové hlavy realizovaný v rámci mé bakalářské práce [36] byl ve spolupráci s firmou ViaAlta vyroben a následně zprovozněn. Hmotnost konstrukce tiskové hlavy je 23,4 kg. Hmotnost tisknutého materiálu při plném naplnění tiskové hlavy je 9,8 kg. Celková maximální hmotnost tiskové hlavy při tisku činí 33,2 kg. Vyrobená tisková hlava je zobrazena na Obr. 4-2.



Obr. 4-2 Tisková hlava BP

4.2 Tisková směs

Tisková směs byla navržena na Fakultě stavební ČVUT a měla by vykazovat vlastnosti vhodné pro aditivní zpracování. Jedná se o betonovou směs s příměsí kameniva o frakci 4–8 mm a urychlovače tuhnutí (doba tuhnutí směsi cca 20 minut). Složení směsi:

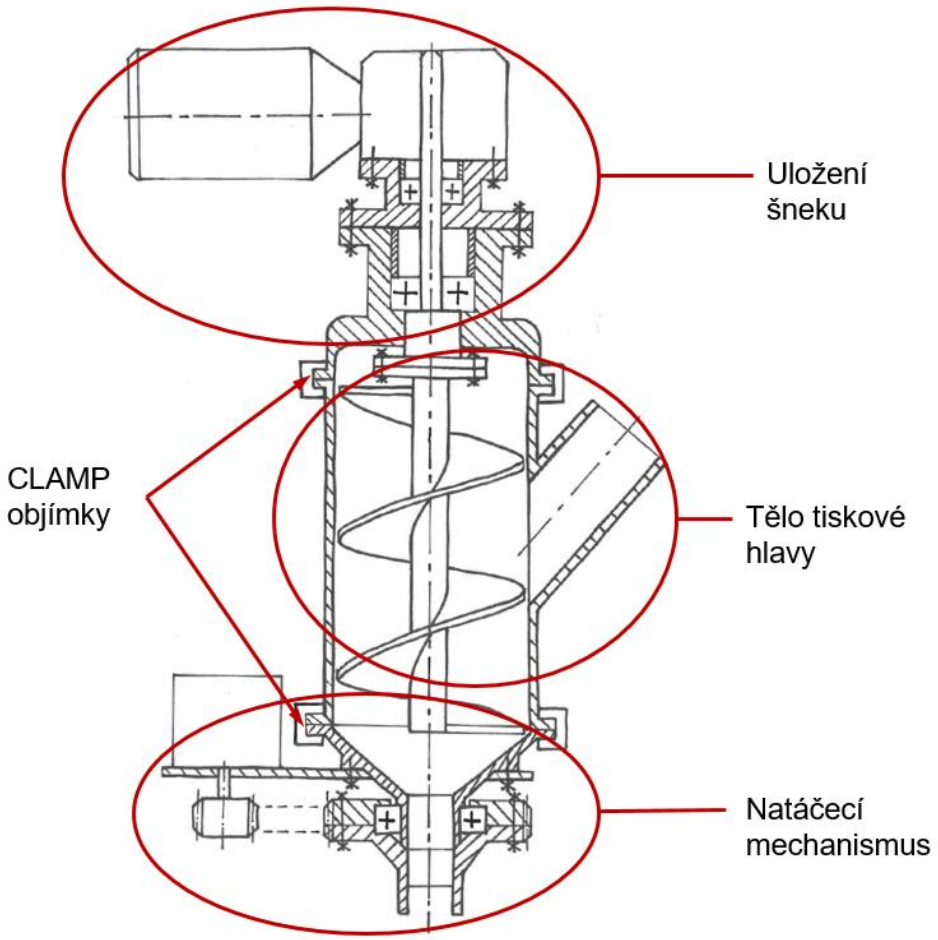
Tab. 4-1 Složení tisknuté směsi

	Kamenivo	Metakaolín	Písek	Cement	Voda	Urychlovač
Hmotnost (kg)	300	100	1130	400	275	3

4.3 Koncepční návrh celku tiskové hlavy

Hlavní uspořádání konstrukčních uzlů tiskové hlavy navazuje na uspořádání představené v mé bakalářské práci. Jedná se o vertikálně situovanou šnekovnici letmo uloženou do dvojice ložisek.Tisková hlava se skládá ze tří hlavních celků: těla tiskové hlavy, uložení šnekovnice a natáčecího mechanismu. Hlavní celky jsou vzájemně snadno demontovatelné díky využití CLAMP spojení, což umožňuje snadné čištění tiskové hlavy po ukončení výrobního cyklu. Předpokládá se pevné spojení těla tiskové hlavy k polohovacímu zařízení pomocí systému objímek. K horní části těla je připevněno shora nasazené uložení šnekovnice a ke spodní části těla tiskové hlavy je připevněn celek natáčecího mechanismu. Oba spoje jsou realizovány pomocí zmiňovaného CLAMP spojení.

Na základě provedených experimentů s tiskovou hlavou BP a z nich stanovených závěrů se předpokládá provedení rozměrových úprav a změn v dimenzování hlavních prvků tiskové hlavy DP. Tyto změny by měly reflektovat jeden z cílů diplomové práce a to snižování celkové hmotnosti tiskové hlavy. Hlavní změny spočívají ve změně vůle mezi šnekovnicí a tělem tiskové hlavy a s tím související dimenzování pohonů a klíčových prvků hlavy.



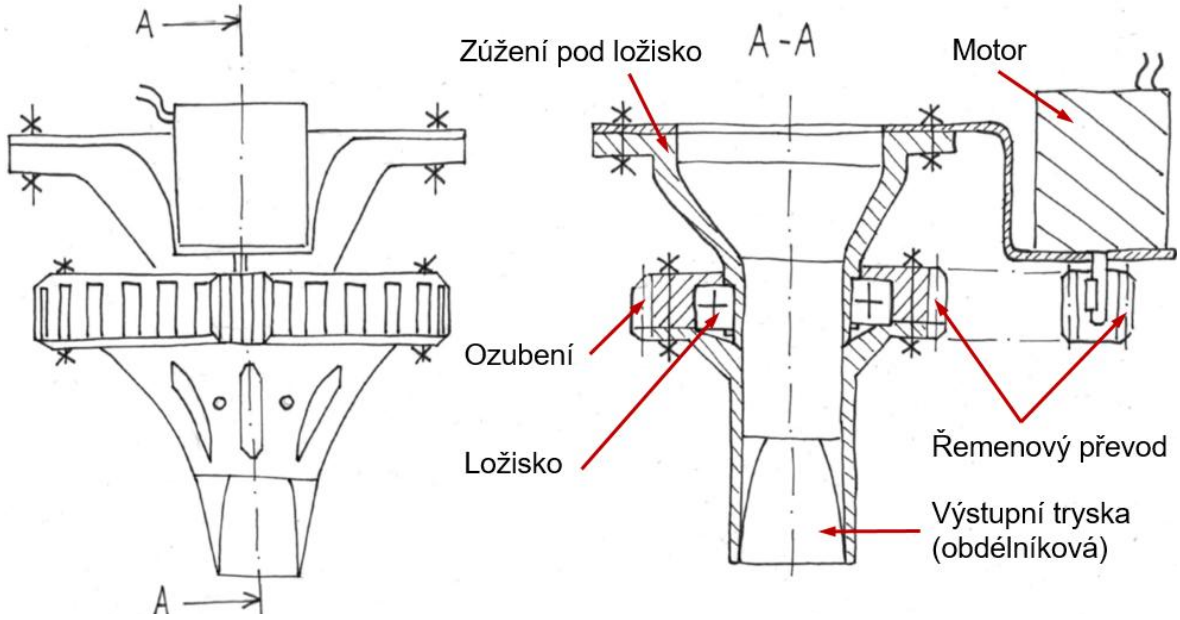
Obr. 4-3 Koncepční uspořádání celku tiskové hlavy

4.4 Koncepční návrh natáčecího mechanismu

Použití trysky jiného než kruhového průřezu je při 3D tisku betonových směsí podmíněno implementací natáčecího mechanismu, který zajistí stejnorodost výnosu ve všech směrech tisku. Takový mechanismus umožňuje rotaci výstupní trysky kolem vertikální osy tiskové hlavy a v kombinaci s vhodným řídícím algoritmem zajišťuje tvarování výnosu do požadované podoby.

4.4.1 Varianta s jedním ložiskem

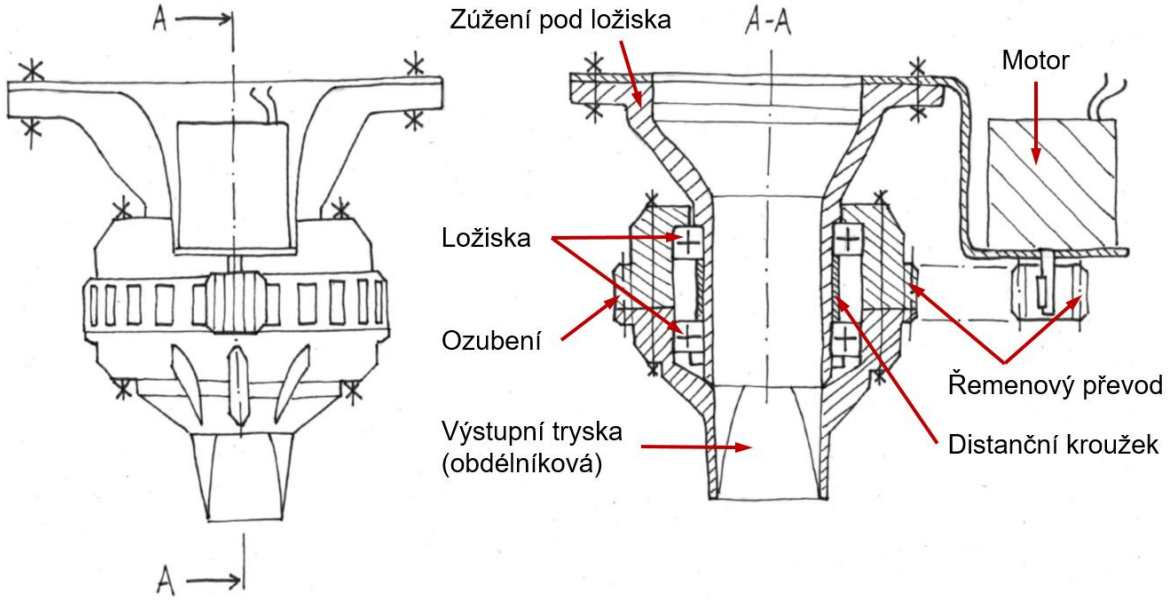
Natáčecí mechanismus je zařízení připevněno ke spodní části tiskové hlavy, sloužící k tvarování materiálu při jeho extruzi z tiskové hlavy do podoby výnosu. Koncepce natáčecího mechanismu s jedním ložiskem se skládá z dílu označeného na Obr. 4-4 jako zúžení na ložisko, v horní části tohoto dílu je příruba pro připevnění k tělu tiskové hlavy, mezi tuto přírubu a přírubu tiskové hlavy je sevřen plech vymezující polohu pohonu natáčecího mechanismu. Na dílu zúžení na ložisko je nalisováno radiální kuličkové ložisko vymezující pohyb otáčejících se dílů. Mezi ty patří ozubení a výstupní obdélníková tryska, tyto díly jsou spojeny šroubovými spoji tak, aby došlo k sevření vnějšího kroužku kuličkového ložiska. Přenos krouticího momentu mezi pastorkem nasazeným na výstupní hřídel pohonu a ozubením natáčecího mechanismu je realizován pomocí ozubeného řemenu. Výhodou této varianty je její jednoduchost, nízká hmotnost nebo možnost snadné výměny výstupní trysky, mezi nevýhody může patřit nižší tuhost uložení realizovaného pouze jedním ložiskem.



Obr. 4-4 Varianta s jedním ložiskem

4.4.2 Varianta s dvojicí ložisek

Umístění a funkce natáčecího mechanismu s dvojicí ložisek je stejná jako u koncepce s jedním ložiskem. Mechanismus se opět skládá z dílu pojmenovaného na Obr. 4-5 zúžení pod ložisko a plechu, který je sevřen mezi přírubu zúžení a těla tiskové hlavy. Díl zúžení pod ložisko v této variantě řešení disponuje delším osazením tak, aby bylo možné na zúženou část dílu nalisovat dvojici ložisek, jejichž poloha je vymezena distančním kroužkem. Na vnější kroužky těchto ložisek je svěrně upevněno ozubení rozebíratelně spojené s výstupní obdélníkovou tryskou. Krouticí moment z pastorku spojeného s výstupní hřídelí pohonu je opět na ozubení natáčecího mechanismu přenášen pomocí řemenového převodu. Hlavní výhodou tohoto řešení je tuhost celého mechanismu, naopak nevýhodou je vysoká hmotnost a prostorová náročnost řešení - najíždění mechanismu do již vytištěného výnosu. Další nevýhodou může být složitější výměna výstupní trysky (údržba zařízení, požadavek na jinou geometrii vynášeného materiálu).



Obr. 4-5 Varianta s dvojicí ložisek

5 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

Návrh konstrukce tiskové hlavy je předurčen provozními požadavky, které jsou dány zejména typem a složením dopravované směsi, dále požadavky na čištění a údržbu zařízení. Tisková hlava je určena pro tisk směsi s obsahem kameniva o frakci 4–8 mm se složením viz Tab. 5-2. Mezi další důležité parametry patří hmotnost tiskové hlavy a objem dopravovaného materiálu, který musí být vynesen na požadované místo v daném čase. Základní parametry pro návrh tiskové hlavy jsou schematicky zobrazeny na Obr. 5-1.

Obr. 5-1 Parametry ovlivňující konstrukci

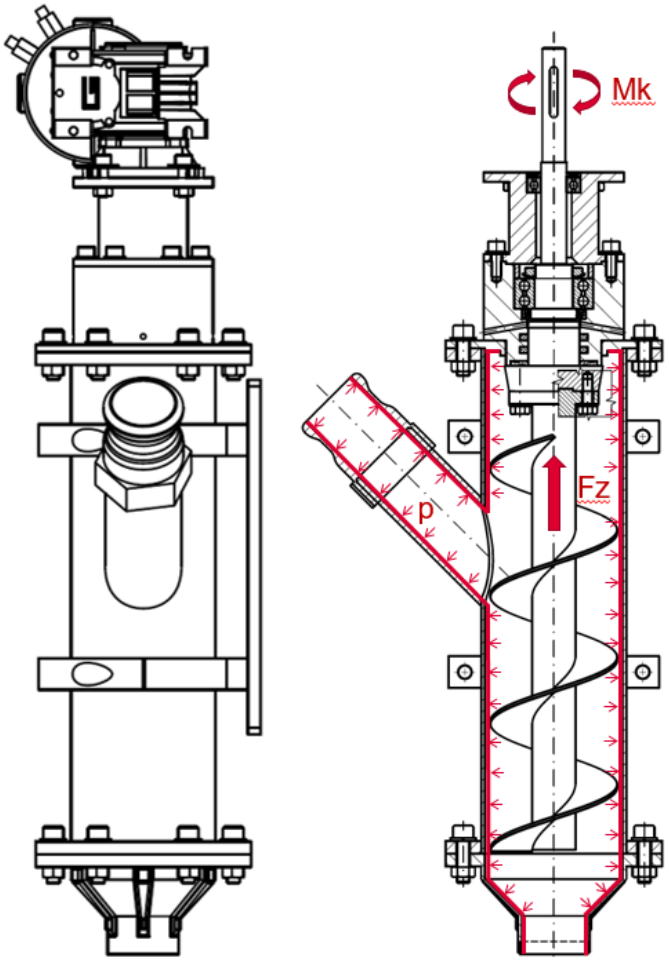
Vývoj konstrukce tiskové hlavy probíhal v několika krocích. Samotnému návrhu tiskové hlavy předcházel návrh testovacího zařízení pro měření potřebných parametrů. Po vyrobení a ověření funkce navrženého zařízení proběhla měření na testovacím zařízení. Na základě naměřených dat byly vyvozeny závěry. Na základě těchto dat mohla být navržena konstrukce nové tiskové hlavy, která byla následně vyrobena. Posledním krokem v řešení diplomové práce bylo ověření funkce navržené tiskové hlavy.

5.1 Návrh testovacího zařízení

5.1.1 Koncepční řešení testovacího zařízení

Snižování hmotnosti tiskové hlavy je úkol, k jehož řešení je nutné znát základní silové účinky působící v tiskové hlavě. Zjištění těchto silových účinků však není triviální úlohou a jejich získání je vázáno na návrh měřicího zařízení, které umožní měřit hlavní silový účinek v tiskové hlavě a to krouticí moment potřebný k protlačování směsi výstupní tryskou. Jedním z hlavních požadavků na měřicí zařízení je jeho univerzálnost, tedy možnost použít zařízení pro měření při různých konfiguracích tiskové hlavy, při použití různých materiálů pro tisk a při ladění procesních parametrů tiskové hlavy.

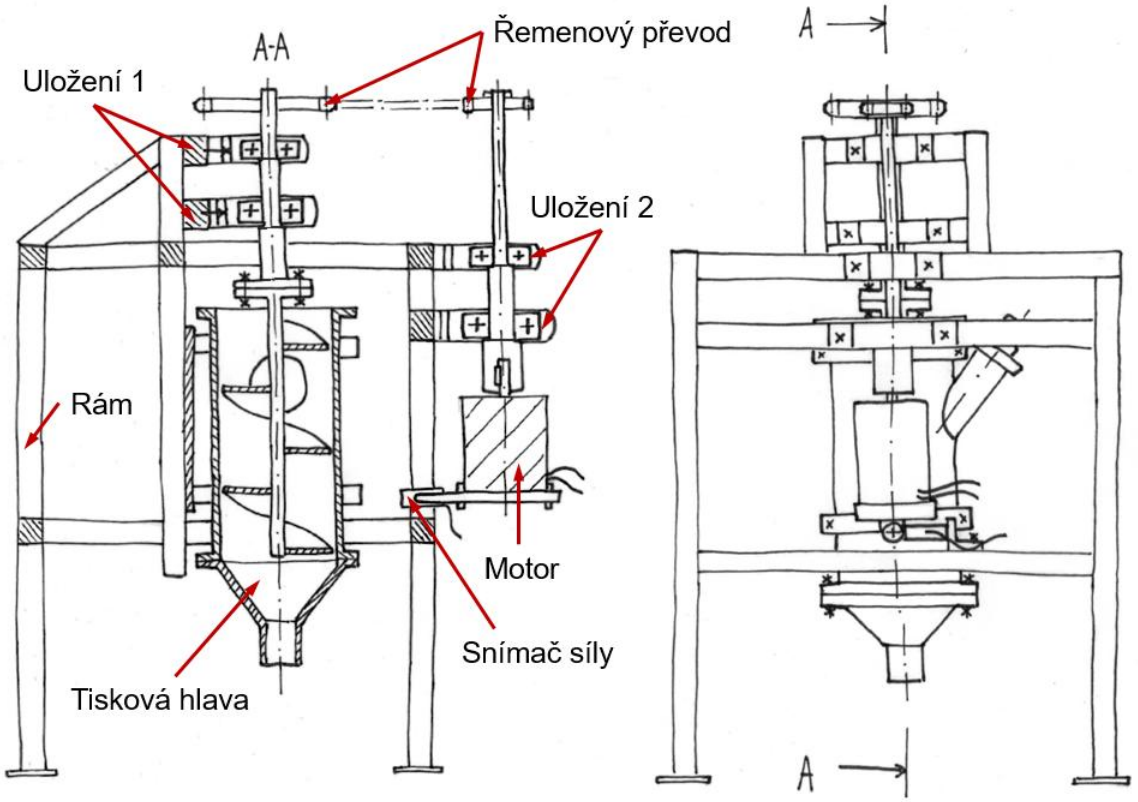
Základní silové účinky působící v tiskové hlavě jsou schematicky zobrazeny na Obr. 5-2, jedná se o krouticí moment *Mk* potřebný k otáčení šnekovnice v tiskové hlavě naplněné betonovou směsí, dále síla *Fz* způsobená odporem materiálu vůči jeho protlačování výstupní tryskou a tlak p způsobený plněním tiskové hlavy betonovou směsí od čerpadla při případném ucpání výstupní trysky tiskové hlavy (kritický stav).



Obr. 5-2 Hlavní silové účinky působící v tiskové hlavě

Varianta testovacího zařícení č. 1

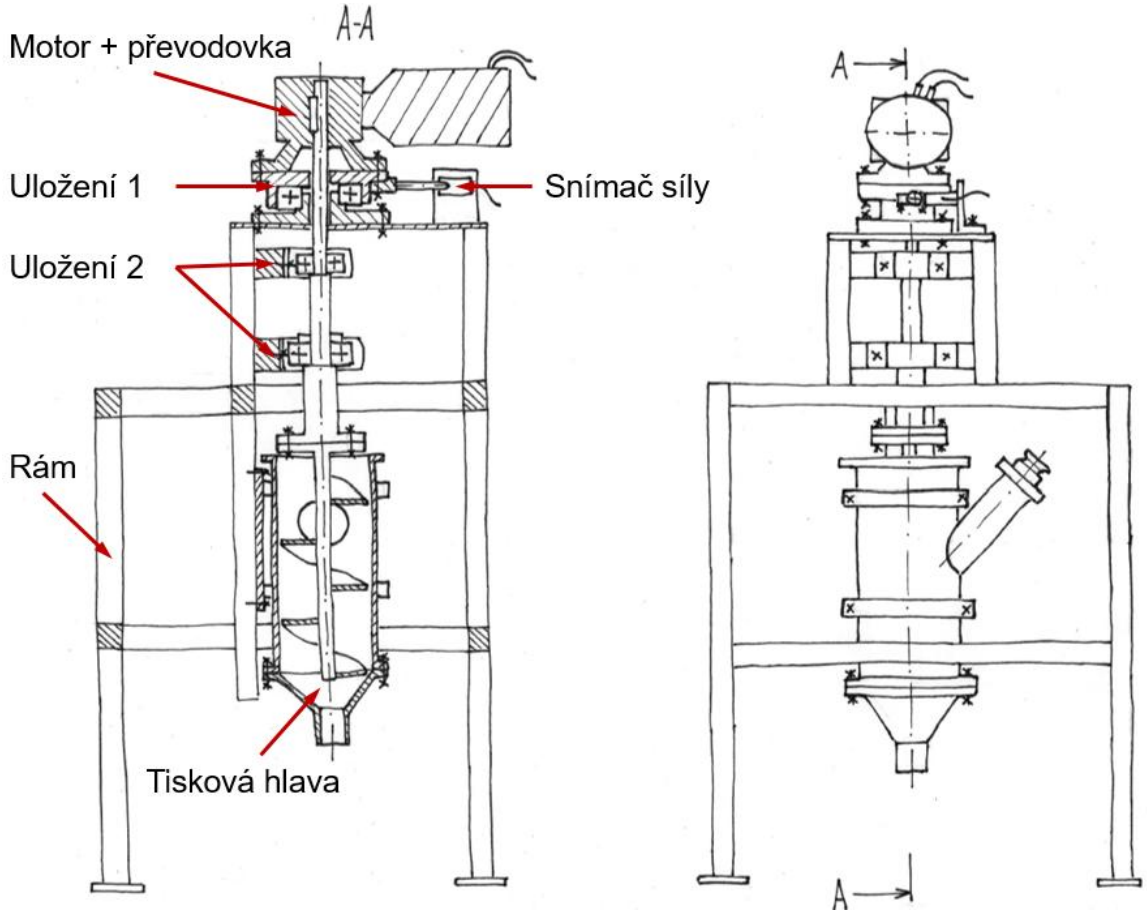
Testovací zařízení varianta č. 1 se skládá z několika celků a to: z nosného rámu, uložení hnacího a hnaného hřídele, motoru s pákou a tenzometrem a samotné tiskové hlavy. Princip měření vychází z předpokladu, že silový účinek vyvolaný otočně uloženým motorem potřebný k pohánění šnekovnice je přenášen přes páku na tenzometr na rámu testovacího zařízení. Základním prvkem celého zařízení je nosný rám, ve vnitřním prostoru rámu se nachází tělo tiskové hlavy. V těle tiskové hlavy dochází k rotaci šnekovnice, která má za úkol protlačovat materiál přivedený od pumpy na beton skrz výstupní trysku. Šnekovnice je pevně spojena s hnacím hřídelem, který je uložen do dvojice ložisek označených na Obr. 5-3 jako Uložení 1. Krouticí moment je mezi hnacím a hnaným hřídelem převáděn pomocí řemenového převodu. Hnaný hřídel je opět uložen do dvojice ložisek označených jako Uložení 2, k hnacímu hřídeli je připojen motor. Motor je pevně spojen pouze s hnacím hřídelem, což umožňuje jeho otáčení kolem vlastní osy. Tomuto otáčení, v případě zatížení šnekovnice, brání páka, která přenáší silový účinek na tenzometrický snímač síly připevněný k nosnému rámu. Výhodou tohoto řešení je možnost změny převodového poměru a tak i otáček šnekovnice pouhou výměnou řemenových kol. Mezi nevýhody naopak patří problematické spojení motoru s hnacím hřídelem, nižší převodový poměr než při použití převodovky a zajištění dostatečné tuhosti hnacího hřídele.



Obr. 5-3 Varianta testovacího zařízení č. 1

Varianta testovacího zařízení č. 2

Druhý koncepční návrh testovacího zařízení je složen z: nosného rámu, uložení hnaného hřídele, otočného uložení motoru s převodovkou a pákou, tenzometru a tiskové hlavy. Princip měření pomocí testovacího zařízení je podobný jako u konceptu č. 1, hlavním rozdílem je nahrazení řemenového převodu šnekovou převodovkou. Sestava motoru převodovky a páky je otočně uložena, což umožňuje přenos sil od šnekovnice přes páku na tenzometrický snímač síly a dále na nosný rám. Tisková hlava je opět ustavena do středu nosného rámu, v tiskové hlavě dochází k rotačnímu pohybu šnekovnice, na kterou je převáděn krouticí moment od motoru prostřednictvím hnacího hřídele. Hřídel je uložen do dvojice ložisek, tento celek je na Obr. 5-4 označen jako Uložení 2. Uložení 1 slouží k vertikálnímu ustavení polohy motoru, převodovky a páky, při zachování natáčecí volnosti celku. Uložení 1 se skládá ze dvou ložiskových domků, spodní domek je statický a je na něm nalisované ložisko s horním domkem, který se může společně s motorem natáčet. Výhodou tohoto řešení je jednoduchost a tuhost celého uložení (uložení přeurčeno z důvodu snadné rozebíratelnosti) a menší rozměrová náročnost. Mezi nevýhody patří nerovnoměrné zatížení ložiska v Uložení 1, způsobené vyosením motoru (motor se nenachází v ose rotace hlavního hřídele - způsobuje klopný moment) nebo nemožnost změny převodového poměru (převodový poměr daný převodovkou).



Obr. 5-4 Varianta testovacího zařízení č. 2

5.1.2 Měření přibližných hodnot krouticího momentu

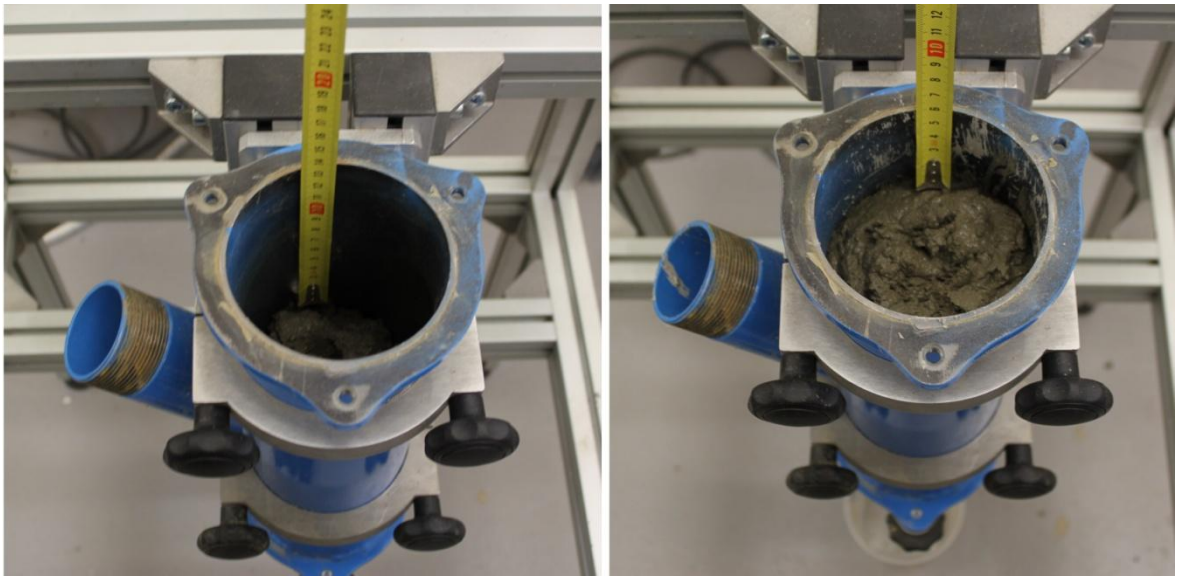
V předchozí kapitole byla zmíněna možná koncepční řešení testovacího zařízení pro měření silových účinků v tiskové hlavě. Za dominantní a zároveň jediný měřený silový účinek je považován krouticí moment potřebný k protlačování materiálu, přiváděného od čerpadla, skrz výstupní trysku. První měření krouticího momentu proběhlo s využitím momentového klíče a důvodem tohoto měření bylo zjištění přibližných hodnot krouticího momentu důležitých pro dimenzování zmiňovaného testovacího zařízení. Po dokončení a kalibraci testovacího zařízení proběhla série měření zaměřených na vliv druhu materiálu a konstrukce klíčových prvků tiskové hlavy na měřený krouticí moment.

Měření s využitím momentového klíče

Zjišťování přibližných hodnot krouticího momentu potřebných k navržení hybných částí testovacího zařízení probíhalo s využitím tiskové hlavy s demontovaným motorem. Tisková hlava byla zavěšena na rámu testovacího zařízení a pomocí redukce a momentového klíče byla poháněna šnekovnice uvnitř hlavy. Tisková hlava byla nejdříve naplněna betonovou směsí poté do ní byla vložena šnekovnice s uložením a následně probíhalo samotné měření.

Obr. 5-5 Test s momentovým klíčem

Měření probíhalo tak, že na momentový klíč byla nastavena malá hodnota krouticího momentu a byla vyvinuta síla, která měla roztočit šnekovnici. Pokud došlo ke „cvaknutí“ v momentovém klíči, pak je moment k protočení šnekovnice vyšší a je nutné ho korigovat. V dalším kroku byla na momentovém klíči nastavena vyšší hodnota a postup byl zopakován. K opakování tohoto postupu docházelo až do doby, kdy bylo momentovým klíčem točeno, aniž by došlo ke „cvaknutí“. První hodnota nastavená na momentovém klíči, při níž nedošlo ke „cvaknutí“ v klíči je hledaná hodnota krouticího momentu. Popisovaný postup měření byl opakován pro různé naplnění tiskové hlavy betonovou směsí viz Obr. 5-6.



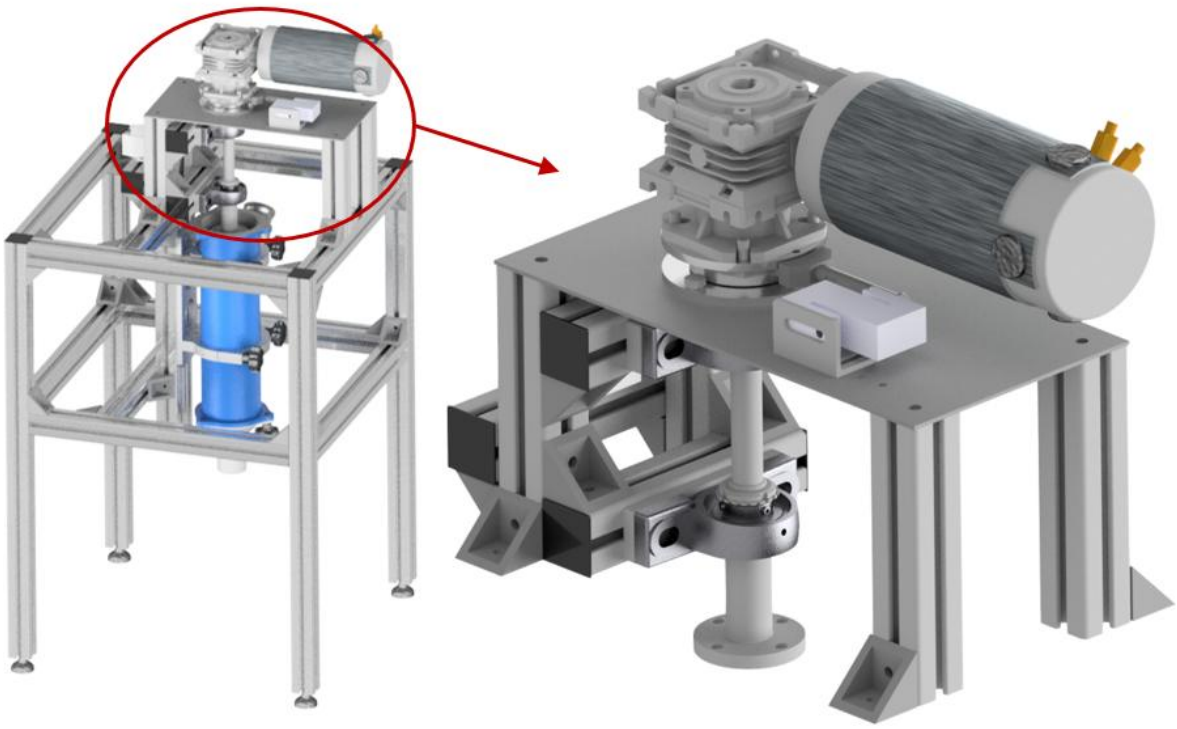
Obr. 5-6 Plnění tiskové hlavy

Naměřené hodnoty krouticího momentu se pohybovali v rozmezí od 7 do 14 N·m v závislosti na naplnění tiskové hlavy materiálem a doby měření od smísení betonové směsi. Podrobnější popis měření s kompletními výsledky viz příloha diplomové práce Protokol měření krouticího momentu č. 1. Naměřené hodnoty dále sloužili k dimenzování testovacího zařízení a volbě potřebných snímačů pro měření. Podrobnější popis měření a všech výsledků viz Příloha 1 - Laboratorní protokol č. 1.

5.1.3 Konstrukční řešení testovacího zařízení

Do podoby finálního konstrukčního řešení testovacího zařízení byla rozpracována koncepce testovacího zařízení č. 2 z kapitoly Koncepční řešení testovacího zařízení a to zejména z důvodu poskytnutí dostatečného převodového poměru využitím šnekové převodovky a nižší rozměrové a výrobní nákladnosti.

Zařízení má rozměry 610 x 610 x 1210 mm a skládá se z hliníkového rámu a nástavby pro uložení hřídele, motoru s převodovkou a snímačů. Konstrukce rámu testovacího zařízení je uzpůsobena k upnutí tiskové hlavy navržené v rámci BP. Model zkonstruovaného zařízení je zobrazen na Obr. 5-7.



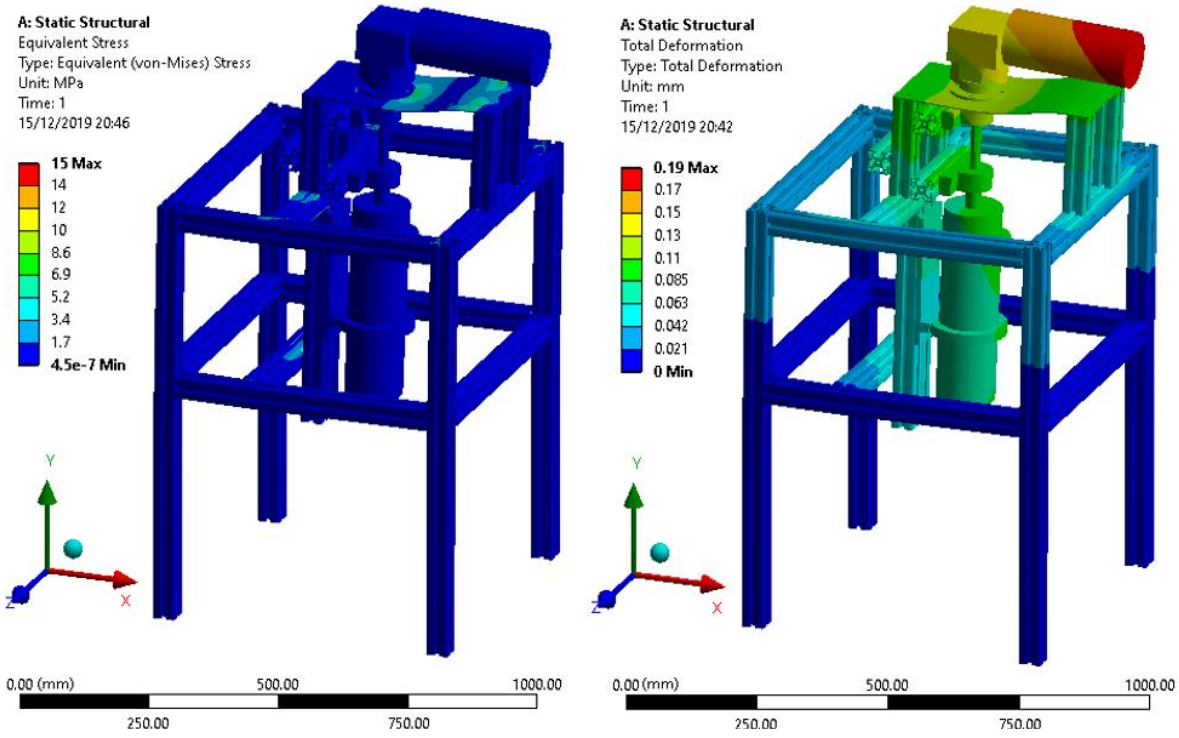
Obr. 5-7 Testovací zařízení

Rám testovacího zařízení

Rám testovacího zařízení je sestaven z hliníkových konstrukčních profilů ALUTEC o rozměrech 45 x 45 mm. Jednotlivé profily jsou mezi sebou spojeny pomocí úhelníků, profilových kamenů a šroubů. Pro kvalitní ustavení polohy testovacího zařízení je rám opatřen čtveřicí stavitelných nožiček. Nástavba testovacího zařízení pro uložení ložisek je sestavena opět z hliníkových konstrukčních profilů ALUTEC o rozměrech 45 x 45 mm v kombinaci s ocelovým plechem o tloušťce 3 mm.

Rám testovacího zařízení po zkonstruování prošel ověřovacími výpočty pomocí MKP analýz v prostředí programu Ansys Workbench. Z důvodu velké výpočtové náročnosti byla do modelu zavedena řada zjednodušení. Byly zjednodušeny zejména modely tiskové hlavy, uložení hřídele a sestavy motoru převodovky a horního otočného uložení. Výpočtová síť byla z důvodu složitosti modelu v několika krocích zjemňována, až dosáhla přijatelné kvality (mesh quality). Kontakty mezi jednotlivými díly sestavy byly typu bonded.

Statická analýza rámu cílila na výpočet maximálních napětí a průhyb rámu při jeho zatížení gravitační silou působící na jeho jednotlivé díly. Zatížení bylo realizováno přiřazením hustoty zjednodušeným dílům o známé hmotnosti a objemu modelů. Hmotnost byla zjišťována zvážením reálných vyrobených dílů a přičtením hmotnosti materiálu, který se do tiskové hlavy vejde, objem byl zjišťován z modelů v programu Inventor. Okrajové podmínky byly realizovány pomocí vazeb dispacement, bylo tedy zamezeno pohybu konců noh testovacího zařízení ve všech třech osách. Výsledkem statické analýzy je maximální průhyb na motoru 0,19 mm a maximální napětí 15 MPa na ocelovém plechu, což je považováno za dostatečně bezpečné hodnoty, které by neměly mít vliv na funkci zařízení.

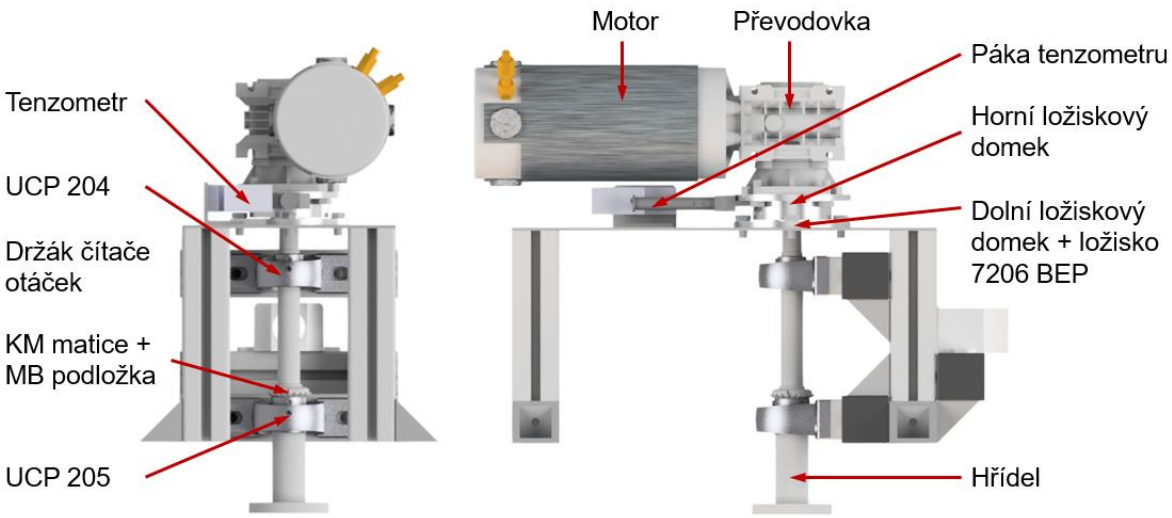


Obr. 5-8 Statická a modální analýza rámu

Okrajové podmínky, kvalita výpočtové sítě i vazby použité pro modální analýzu byly identické jako pro statickou analýzu, nejnižší vlastní frekvence vypočítaná v rámci modální analýzy je 24,5 Hz, což je opět hodnota považovaná ze bezpečnou vzhledem k tomu, že nejvyšší frekvence rotace šnekovnice při testech odpovídá 1,5 Hz. Frekvence rotace vinutí motoru je pak při převodovém poměru šnekové převodovky 1:10 maximálně 15 Hz.

Nástavba pro uložení hřídele, motoru a snímačů

Nosnou kostrou nástavby pro uložení hřídele, motoru a snímačů je rám sestavený z hliníkových konstrukčních profilů ALUTEC a ocelového plechu. Hřídel je ke kostře uložena pomocí dvojice ložiskových jednotek ZKL UCP 204 a UCP 205, k vyrovnání výškových rozdílů jsou mezi ložiskové jednotky a hliníkové profily vloženy frézované ocelové podložky. Axiální zajištění hřídele je realizováno přes větší, spodní ložiskovou jednotku pomocí KM matice a MB podložky. Krouticí moment je mezi hřídelem a šnekovou převodovkou přenášen přes pero těsné. K zajištění možnosti natáčení motoru s převodovkou je mezi nosný plech rámu a přírubu převodovky umístěna dvojice ložiskových domků s ložiskem SKF 7206 BEP. Spodní ložiskový domek je statický a je pevně spojen s nosným plechem rámu, horní ložiskový domek je uložen otočně. K hornímu ložiskovému domku je připevněn motor s převodovkou a páka tenzometru, která má za úkol zajistit přenos sil na tenzometrický snímač připevněný přes držák tenzometru k nosnému plechu. Na Obr. 5-9 je zobrazena popisovaná nástavba.



Obr. 5-9 Nástavba zařízení s uložením a snímači

Princip měření krouticího momentu na testovacím zařízení je založen na předpokladu, že stejný silový účinek, který je potřebný k protočení šnekovnice uvnitř tiskové hlavy naplněné betonem musí být přenesen na rám zařízení. Tento silový účinek je měřen pomocí tenzometrického snímače, na který je přenášena síla pomocí přepákování. Ze známé délky přepákování a naměřené síly na tenzometru pak lze snadno dopočítat potřebný krouticí moment.

Přesné měření otáček hřídele je zajištěno použitím čítače otáček připevněného pomocí plastového držáku k hliníkovému profilu rámu. Čítač otáček je umístěn tak, aby při jeho sepnutí laserový paprsek dopadal na hřídel v místech, kde je nalepen odrazivý pásek.

Použité senzory

Testovací zařízení popisované v předchozích kapitolách slouží k měření krouticího momentu a otáček tiskové hlavy. K tomu aby zařízení měřilo potřebná data, je nutné jej opatřit vhodnými snímači, jedná se o tenzometrický snímač síly a laserový otáčkoměr.

Tenzometrický snímač tahové a tlakové síly

Volba tenzometrického snímače pro testovací zařízení probíhala s ohledem na provedený test měření krouticího momentu viz kapitola 0. Maximální naměřená hodnota krouticího momentu při tomto testu byla 14 Nm. Z této hodnoty a zvolené délky přepákování 150 mm lze dopočítat potřebný rozsah snímače.

$$M = F \cdot r \tag{5-1}$$

$$F_{snimac} = \frac{M_{klic}}{r_{paka}} \tag{5-2}$$

$$F_{snimac} = \frac{14}{0{,}15} = 93{,}33\ N$$

kde:

F_{snimac}	N	je síla na snímači
M_{klic}	N·m	- maximální naměřený moment
r_{paka}	mm	- délka přepákování na snímač

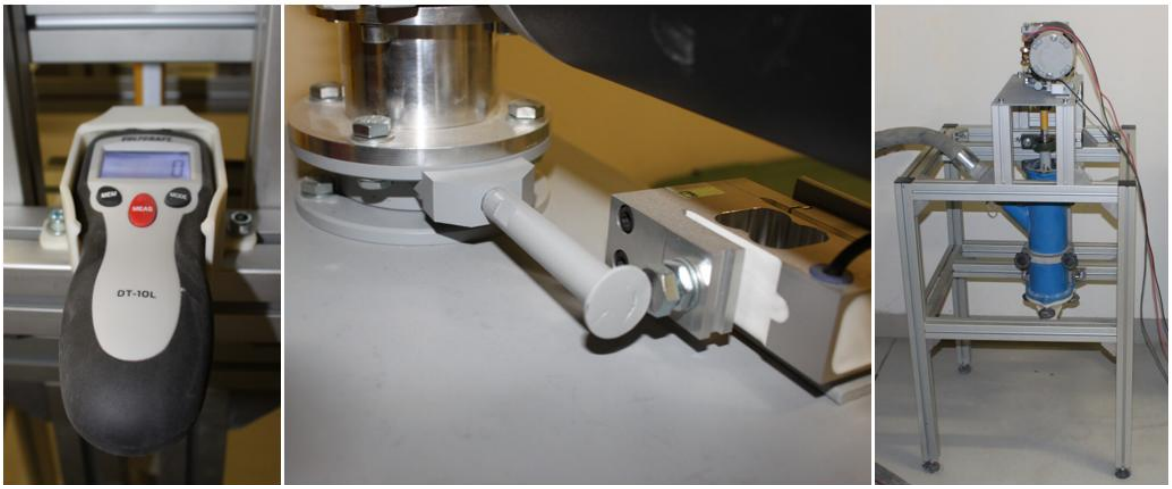
Vypočtený potřebný rozsah snímače odpovídá 93,33 N. Z důvodu očekávání vzniku špičkových sil vlivem zasekávání kameniva v mezeře mezi tělem tiskové hlavy a šnekovnicí byl dále vybírán snímač s rozsahem 200 N. Testovací zařízení bylo osazeno tenzometrickým snímačem S2M od společnosti HBM s rozsahem měření 0 - 200 N, snímač je určen pro měření statických i dynamických tahových i tlakových sil. Přesnost měření snímače je 0,02 jeho rozsahu, což odpovídá maximální hodnotě 4 N.

Laserový otáčkoměr

Měření otáček šnekovnice a hřídele na testovacím zařízení bylo vyřešeno využitím ručního laserového otáčkoměru připevněného k testovacímu zařízení. Jako vhodný pro tuto aplikaci byl zvolen otáčkoměr Voltcraft DT-10L, který nabízí dostatečný rozsah a přesnost měření při zachování cenové dostupnosti.

Rozsah měřených otáček zařízení Voltcraft DT-10L je 2 - 99 999 otáček za minutu, při přesnosti 0,1 % rozsahu. Aktuální měřené hodnoty jsou zobrazovány na LCD displej, do paměti zařízení jsou ukládány maximální a minimální hodnoty zaznamenané po dobu měření a počet uskutečněných otáček pozorovaného objektu.

Měření pomocí otáčkoměru probíhá tak, že na objekt jehož otáčky je třeba měřit je nalepen odrazivý pásek a na tento pásek je poté směřován laserový paprsek otáčkoměru. Na otáčkoměru je čidlo zaznamenávající odražené paprsky laseru a z těchto hodnot zařízení vypočítá příslušné otáčky měřeného objektu. Umístění otáčkoměru a tenzometrického snímače v rámci testovacího zařízení je zobrazeno na Obr. 5-10.



Obr. 5-10 Umístění snímačů na testovacím zařízení

Ověření funkčnosti testovacího zařízení

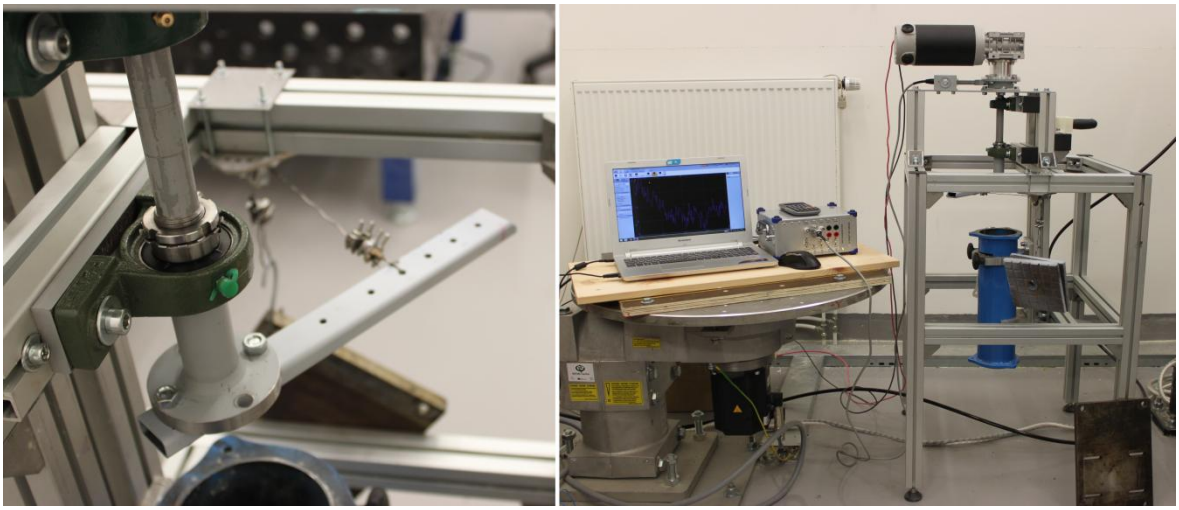
Před samotným měřením na testovacím zařízení bylo nutné ověřit jeho funkčnost a stanovit přesnost měření. Za tímto účelem byl k testovacímu zařízení připevněn kladkový mechanismus v kombinaci s pákou, který umožňoval měřit statické zatížení na tenzometrickém snímači při zavěšení závaží přes kladku viz Obr. 5-11.

Měřicí systém se skládal z tenzometrického snímače HBM S2M, měřicí karty QUANTUMx - MX410 a notebooku se softwarem Catman Easy. Tenzometrický snímač byl zatěžován zmiňovaným kladkovým systémem.

Tab. 5-1 Kalibrace tenzometrického snímače na testovacím zařízení

Závaží [kg]	0	2,035	2,080	4,115	7,545	12,966
Přepočítaná síla [N]	0	19,97	20,40	40,37	74,02	127,20
Síla na tenzometru [N]	1,2	21,1	21,5	41,5	75,1	128,1
Síla na tenzometru bez vlastní hmotnosti [N]	0	19,9	20,3	40,3	73,9	126,9
Síla přes přepákování [N]	0	20	20,5	40,1	74,6	127,9

Použité přepákování z Obr. 5-11 odpovídá délce přepákování na tenzometr tedy 150 mm, což umožňuje snadné dopočítání síly, kterou by mělo závaží zatěžovat tenzometr. Tato síla by měla odpovídat síle gravitačních účinků na závaží zavěšeného na kladce. Pro ověření správnosti měření byla provedena sada měření s různými závažími viz Tab. 5-1.



Obr. 5-11 Kalibrace testovacího zařízení

Měření proběhlo se sadou pěti různých závaží, které byly zváženy na přesné váze, z těchto hodnot byly dopočítány vynásobením gravitační konstantou teoretické hodnoty, které by měl tenzometrický snímač měřit při jeho zatížení hmotností jednotlivých závaží. Při měření hmotnosti závaží jejich pouhým položením na snímač však vznikala chyba způsobená vlastní vahou snímače. Při sepnutí měření a vertikálním ustavení snímače na podložku bez jakéhokoliv zatížení zvenčí, ukazoval snímač hodnotu 1,2 N, tato hodnota odpovídá zmiňované vlastní hmotnosti snímače. Od měření, kdy byl snímač orientován vertikálně, tedy byla vždy odečtena hodnota vlastní hmotnosti snímače. Poté byl maximální rozdíl mezi měřenou a teoreticky vypočítanou hodnotou síly od závaží 0,9 N. Dalším krokem bylo měření hmotnosti přes přepákování a kladkový systém. Zde byl maximální rozdíl mezi měřenou a teoreticky vypočítanou hodnotou síly od závaží 0,7 N. Tyto rozdíly mohou být způsobeny nepřesnostmi ve výrobě přepákování nebo třením v ložiscích, jejich hodnota je však tak nízká, že by neměla mít na měření plánovaná na testovacím zařízení vliv. Hodnoty získané z měření a popisované v tomto odstavci jsou obsaženy v Tab. 5-1.

Předchozí měření se zabývalo pouze statickým měřením hodnot na testovacím zařízení, reálná měření však budou dějem dynamickým. U dynamického měření je při vyhodnocování výsledků nutné vzít v potaz nepřesnosti způsobené vibracemi motoru, hřídele a šnekovnice, které mohou být při roztočení pohybujících se částí testovacího zařízení vybuzeny.

5.2 Měření a zjišťování parametrů tiskové hlavy

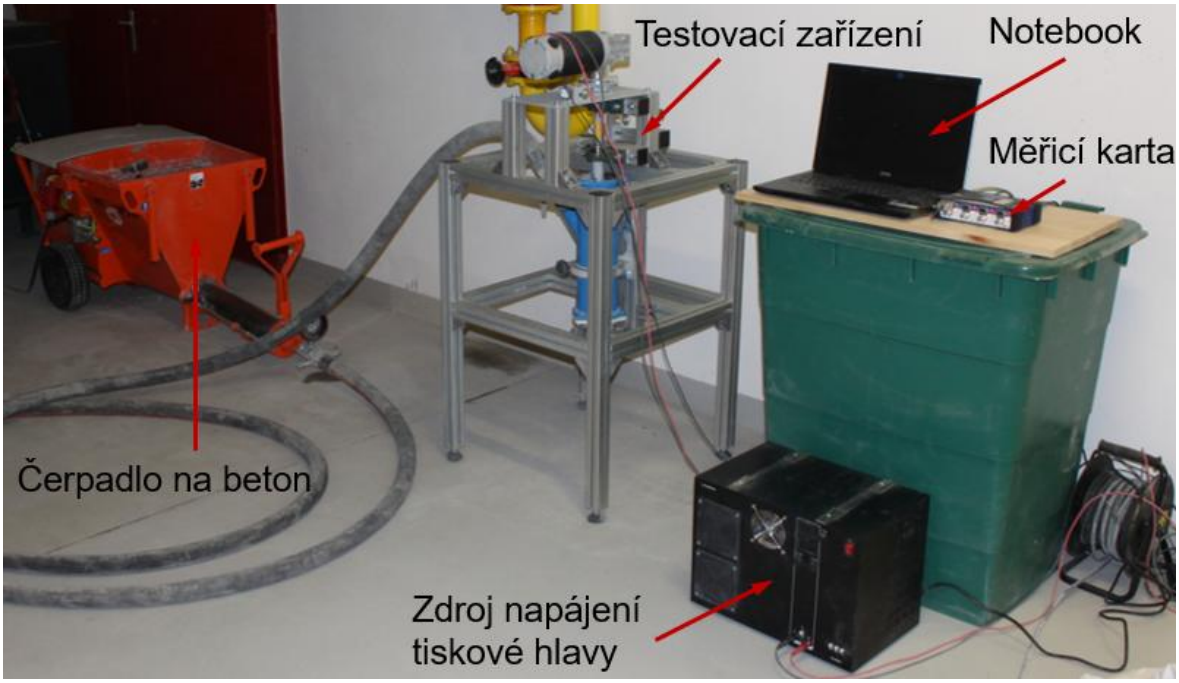
Tato kapitola se zabývá měřením krouticího momentu potřebného k pohonu šnekovnice rotující uvnitř těla tiskové hlavy při jejím provozu v systému zajišťujícím 3D tisk betonových směsí.

5.2.1 Měřicí systém a použité vybavení

Měřicí systém provedených experimentů se skládá z testovacího zařízení s upnutou tiskovou hlavou napájenou laboratorním zdrojem, dále z pumpy na beton, která skrz hadici dopravuje betonovou směs k tiskové hlavě a z notebooku s měřicí kartou pro vyhodnocování měřených silových účinků.

Princip funkce testovacího zařízení byl podrobně vysvětlen v předchozí kapitole, pro záznam dále prezentovaných měření byl opět použit tenzometrický snímač HBM S2M, měřicí karta QUANTUMx - MX410 a notebook se softwarem Catman Easy.

Řízení otáček tiskové hlavy při měřeních bylo realizováno změnou napětí na laboratorním zdroji Diametral M130R50D, který poskytuje regulovatelné výstupní napětí 0–30 V při proudovém rozsahu 0,1–40 A.



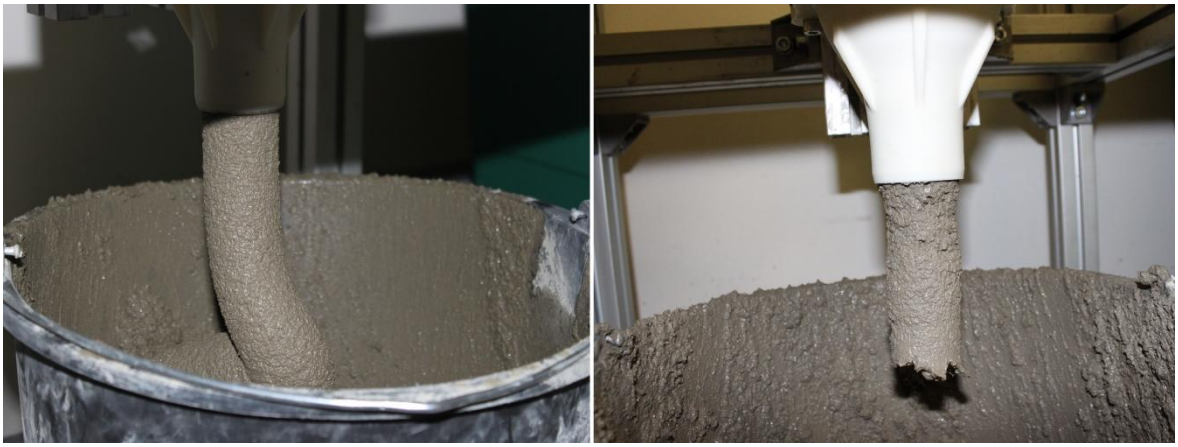
Obr. 5-12 Měřicí systém - měření Mk

Betonová směs byla k tiskové hlavě dopravována pomocí čerpadla na betonové směsi PFT ZP3M. Jedná se o čerpadlo s pracovním tlakem až 20 bar a možností regulace čerpaného množství směsi 8–33 $l \cdot min^{-1}$.

5.2.2 Postup měření

Postup měření lze rozdělit do tří hlavních kroků. Každé měření začínalo přípravou měřicího systému a namícháním testované směsi v míchačce na beton. Po kvalitním promísení jednotlivých složek byla betonovou směsí naplněna násypka čerpadla. Poté byla směs protlačována hadicí propojující pumpu na beton a tiskovou hlavu.

Po protlačení směsi hadicí nastala druhá fáze, tedy ladění otáček čerpadla a šnekovnice tiskové hlavy v závislosti na použité trysce a tisknutém materiálu. Nejprve byly nastaveny na zdroji tiskové hlavy vysoké hodnoty napětí, které odpovídaly vysokým otáčkám přibližně 3 otáčky za sekundu. Tento krok byla prevence proti přeplnění tiskové hlavy protlačovanou směsí. Poté byly postupně zvyšovány otáčky na čerpadle až do doby, kdy výnos z příslušné měřené trysky byl spojitý. Spojitost výnosu se hodnotila čistě vizuálně tak, že pokud nedocházelo k přerušování výnosu při extruzi materiálu z trysky do nádoby, byl výnos prohlášen za spojitý. Spojitost a nespojitost výnosu je zobrazena na Obr. 5-13.



Obr. 5-13 Spojitý výnos (vlevo) a nespojitý výnos (vpravo)

Jakmile bylo nastavením čerpadla dosaženo spojitého výnosu, začalo postupné snižování otáček šnekovnice, až do doby, kdy se tisková hlava začala přeplňovat. Přeplňování tiskové hlavy bylo opět hodnoceno vizuálně, tak, že v horní, odkryté části tiskové hlavy byl pozorován nárůst hladiny betonové směsi nad vrchní přírubu tiskové hlavy. Ve chvíli kdy byl tento nárůst pozorován byla zaznamenána poslední předešlá hodnota napětí a proudu na zdroji, kdy ještě k přeplňování nedocházelo. Kromě napětí a proudu na zdroji bylo dále zaznamenáno nastavení čerpadla a otáčky šnekovnice. Tímto způsobem byly získány hodnoty nastavení tiskové hlavy odpovídající hodnotám nastavení čerpadla.

Po získání vhodného nastavení tiskové hlavy mohlo proběhnout samotné měření krouticího momentu a průtoku materiálu. Měřený krouticí moment, reprezentovaný silou měřenou na tenzometrickém snímači, byl měřen po dobu cca 40 sekund, kdy byla skrz tiskovou hlavu protlačována betonová směs. Poslední měřenou hodnotou byl objemový průtok materiálu za 20 s. Ten byl měřen tak, že byla tisková hlava po dobu 20 s spuštěna a extrudovaný materiál byl poté zvážen a ze známé hustoty byl dopočítán příslušný objem.

Popisovaný postup měření byl opakován pro každou ze čtyř zvolených trysek a každou tiskovou směs. Pro testy byly vybrány 3 kruhové trysky o průměrech 50 mm, 40 mm a 35 mm a jedna obdélníková tryska s rozměry 40 x 24 mm. Složení zkoušené směsi sestavila Fakulta stavební ČVUT, směs by měla vykazovat vlastnosti vhodné pro aditivní zpracování. Pro podmínky zkoušení byl ze směsi vyloučen urychlovač tuhnutí, to by však nemělo nijak zásadně ovlivnit reologické vlastnosti směsi. Druhou zkoušenou směsí byla identická směs, ale bez přidaného kameniva. Na jeden provedený test bylo nutné namíchat 100 kg betonové směsi.

Tab. 5-2 Poměr přísad směsi na 100 kg

Přísada	Plná směs	Směs bez urychlovače	Směs bez kameniva a urychlovače
Cement	18,18	18,18	21,05
Voda	12,50	12,50	14,47
Písek	51,36	51,36	59,47
Kamenivo	13,64	13,64	0,00
Metakaolín	4,55	4,55	5,26
Urychlovač	0,14	0,00	0,00

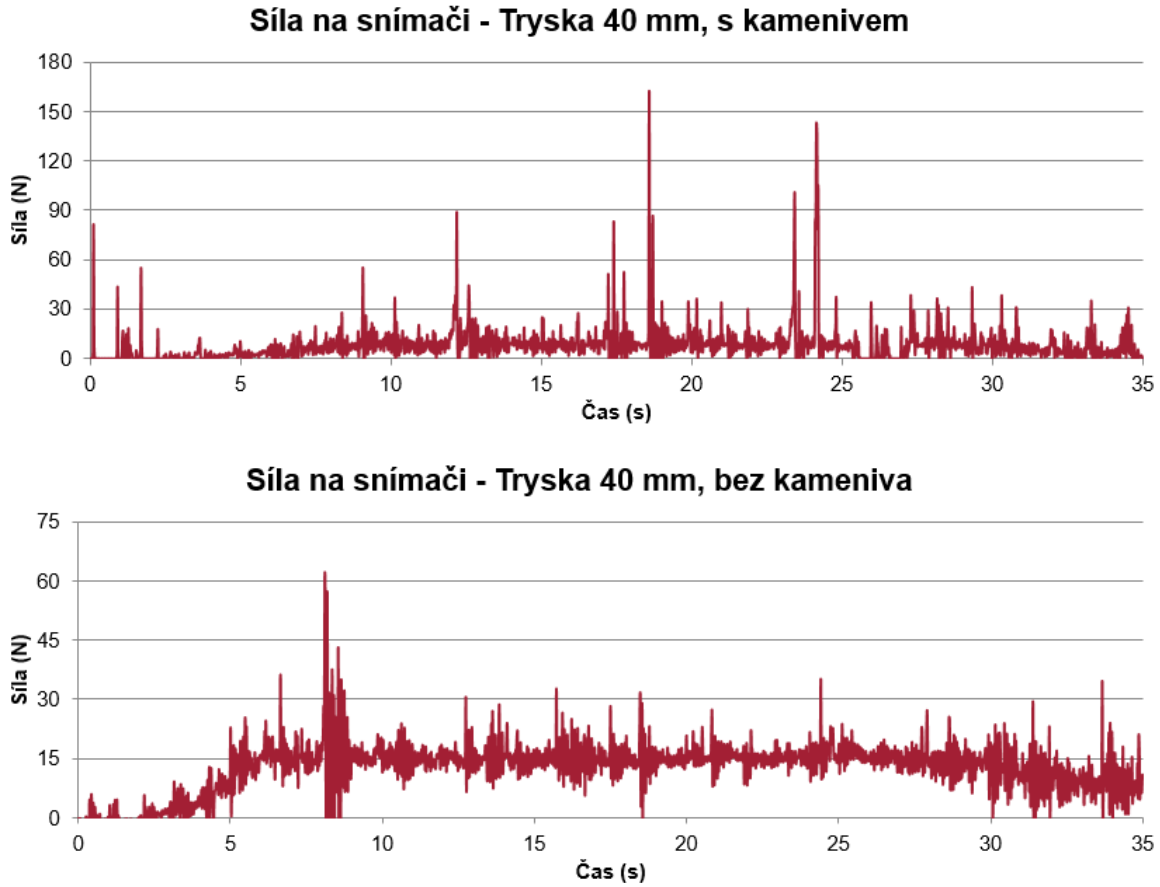
5.2.3 Dosažené výsledky

Celkem bylo provedeno 5 měření, z toho 4 pro materiál nazvaný v Tab. 5-2 jako směs bez urychlovače. Pro tuto směs byly měřeny charakteristiky pro zmiňované 4 trysky. Páté měření bylo provedeno se směsí nazvanou jako směs bez kameniva a urychlovače, tato směs se testovala pouze za použití trysky o průměru 40 mm.

V této kapitole bude představena pouze část naměřených reprezentativních výsledků, podrobné zpracovaní všech výsledků lze nalézt v Příloha 2 - Laboratorní protokol č. 2. V Tab. 5-3 jsou zobrazena nastavení čerpadla a tiskové hlavy pro tisk s různými tryskami při práci s materiálem nazvaným směs bez urychlovače. V grafech na Obr. 5-14 jsou pak zobrazena data naměřená na tenzometrickém snímači při provozu tiskové hlavy za použití trysky o průměru 40 mm a dvou rozdílných materiálů pro tisk - s kamenivem a bez kameniva.

Tab. 5-3 Nastavení tiskové hlavy, průtok, krouticí moment - Směs bez urychlovače

		Tryska 50	Tryska 40	Tryska 35	Tryska 40x24
Nastavení tiskové hlavy	Napětí u [V]	8,1	7,1	6,6	6,6
	Proud I [A]	5,7	5,8	5,7	5,7
	Otáčky bez zátěže [min^{-1}]	67,6	57,2	53,4	53,5
	Otáčky se zátěží [min^{-1}]	66,1	55,4	52,1	52,3
Nastavení čerpadla (10 poloh)		6	4	3,25	3,25
Množství materiálu za 20 s [kg]		29,13	23,07	20,47	19,80
Objem materiálu za 1 h [m^3]		2,19	1,73	1,54	1,53
Naměřená síla na snímači	Maximální hodnota [N]	179,41	162,67	124,48	145,29
	Průměrná hodnota [N]	10,14	10,04	13,79	11,99



Obr. 5-14 Grafy síly na snímači

5.2.4 Vyhodnocení měření a vyvozené závěry

Provozní nastavení

Hodnoty nastavení tiskové hlavy a čerpadla pro jednotlivé trysky a materiály z Tab. 5-3 odpovídají předpokládaným hodnotám. Aby bylo dosaženo spojitosti výnosu u trysek s větším průměrem, musí být zvýšeno množství dopravovaného materiálu, čemuž odpovídá zvýšení otáček šnekovnice rotující v tělu tiskové hlavy. Regulace otáček probíhala nastavením napětí na zdroji v intervalu hodnot 6,6–8,1 V, čemuž odpovídaly otáčky šnekovnice 53,5–67,6 $ot \cdot min^{-1}$, tedy 0,87–1,13 Hz. Použité otáčky šnekovnice, jsou podstatně nižší, než jakých je schopná tisková hlava dosahovat a jejich hodnoty spadají do poměrně úzkého intervalu hodnot, zařízení je tedy navrženo se značným naddimenzováním množství materiálu, které může tisknout. Zde lze vidět prostor pro optimalizaci tiskové hlavy, kdy může být zmenšen průměr šnekovnice a tedy i průměr těla tiskové hlavy při zvýšení otáček šnekovnice.

Měření krouticího momentu

Naměřená data síly na tenzometrickém snímači při provozu tiskové hlavy vykazují velké rozdíly při tisku materiálu bez a s obsahem kameniva. Naměřené hodnoty s tryskou o průměru 40 mm a směsí označenou jako směs bez urychlovače a kameniva vykazují průměrnou hodnotu síly 15,35 N a maximální hodnotu 61,59 N viz Obr. 5-14, čemuž odpovídají hodnoty krouticího momentu 2,3 N·m a 9,24 N·m. Hodnoty naměřené při extruzi s tryskou 40 mm a směsí označenou jako směs bez urychlovače jsou: průměrná hodnota síly 10,04 N, maximální hodnota síly 162,67 N, tomu odpovídají krouticí momenty 1,51 N·m a 24,4 N·m. Jak je vidět v grafu na Obr. 5-14, při tisku směsi s kamenivem dochází k zasekávání částic kameniva ve spáře mezi šnekovnicí a tělem tiskové hlavy a tím ke vzniku špičkových sil. Pohon tiskové hlavy v BP byl navrhován na 32 N·m, pokud má být tedy podstatněji snížena hmotnost motoru a tedy i jeho výkon bude muset dojít ke zvětšení spáry mezi šnekovnicí a tiskovou hlavou tak, aby nedocházelo k zasekávání kameniva.

Objemové množství tisknutého materiálu, výpočet rychlosti posuvu

Objemové množství tisknutého materiálu značně převyšuje požadavky z bakalářské práce na množství tisknutého materiálu 0,5 $m^3 \cdot h^{-1}$. Přepočtem množství dopraveného materiálu za 20 s z Tab. 5-3, které se pohybovalo v intervalu 19,8 - 29,1 kg, lze získat objemové množství materiálu dopravené za jednu hodinu. Množství materiálu dopravovaného tiskovou hlavou při provedených měřeních odpovídá intervalu hodnot 1,53 - 2,19 $m^3 \cdot h^{-1}$. Tyto hodnoty jsou cca třikrát vyšší, než hodnoty požadované, což potvrzuje možnost úpravy konstrukce tiskové hlavy zmenšením průměru šnekovnice.

Z naměřených hodnot objemového množství materiálu extrudovaného tiskovou hlavou za určitý časový interval lze dopočítat rychlosti, kterých by mělo být schopné dosahovat

polohovací zařízení, které bude tiskovou hlavu unášet. K dopočítání těchto hodnot je nutné stanovit výšku a šířku tisknutého výnosu. Rozměry výnosu příslušející jednotlivým tryskám byly voleny tak, aby obsah průřezu výnosu odpovídal obsahu průřezu trysky. Více o volbě rozměrů trysky a tvaru výnosu viz Geometrie trysky. Ze známého (naměřeného) množství materiálu a průřezu výnosu lze jednoduše dopočítat délku výnosu. Z délky výnosu a časového intervalu měření objemu je pak možné dopočítat rychlost posuvu tiskové hlavy. Uvedený vzorový výpočet odpovídá výpočtu pro trysku o průměru 40 mm.

$$V_m = d_v \cdot h_v \cdot l_v \tag{5-3}$$

$$l_v = \frac{V_{20s}}{d_v \cdot h_v} = \frac{0{,}01}{0{,}045 \cdot 0{,}028} = 7{,}628\ m \tag{5-4}$$

$$v_p = \frac{l_v}{t_m} = \frac{7{,}628}{20} = 0{,}381\ m \cdot s^{-1} \tag{5-5}$$

kde:

V_m	m^3	je naměřený objem materiálu
d_v	m	- šířka výnosu
h_v	m	- výška výnosu
l_v	m	- délka výnosu
v_p	$m \cdot s^{-1}$	- rychlost pohybu polohovacího zařízení
t_m	s	- časový interval měření objemu materiálu

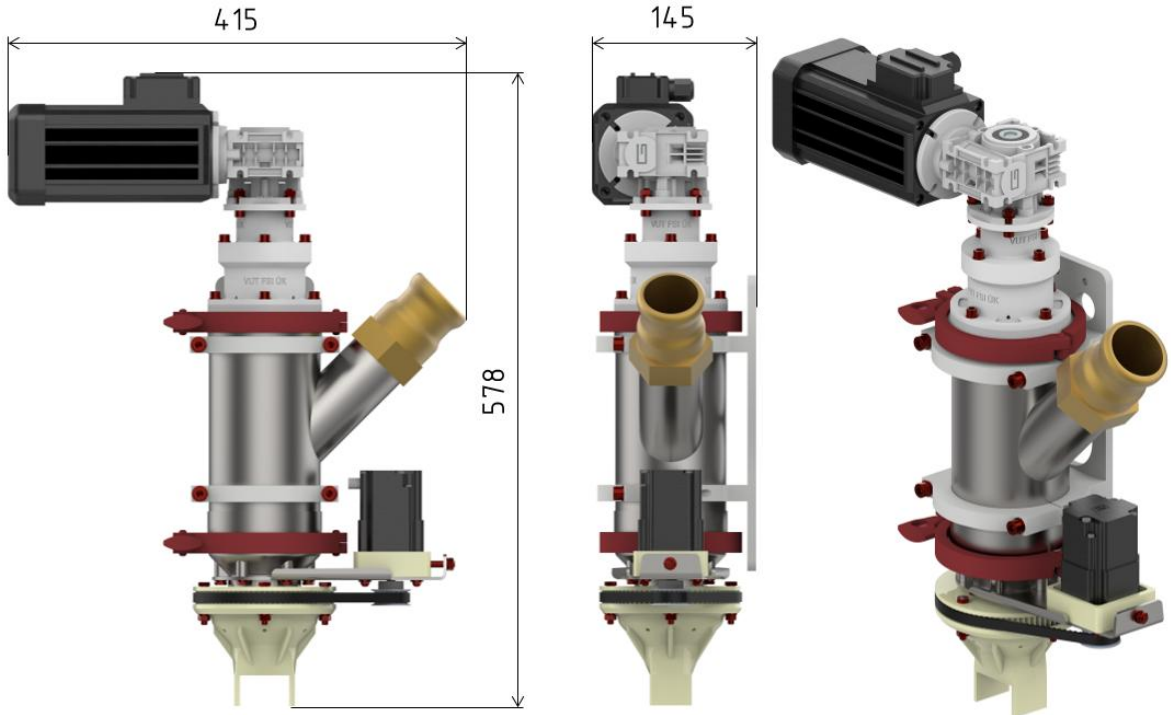
Tab. 5-4 Rychlosti tisku

Rozměry (mm)	Tryska 50	Tryska 40	Tryska 35	Tryska 40x24
V_m (m^3)	0,012	0,010	0,009	0,008
d_v (m)	0,056	0,045	0,040	0,040
h_v (m)	0,035	0,028	0,024	0,024
l_v (m)	6,193	7,628	8,883	8,840
v_p ($m \cdot s^{-1}$)	0,310	0,381	0,444	0,442

Dopočítané rychlosti pohybu tiskové hlavy se pohybují v intervalu 0,31–0,44 $m \cdot s^{-1}$, což jsou hodnoty, které odpovídají předpokládaným rychlostem tisku a rychlostem pohybu polohovacích zařízení z rešerše.

5.3 Konstrukční řešení tiskové hlavy

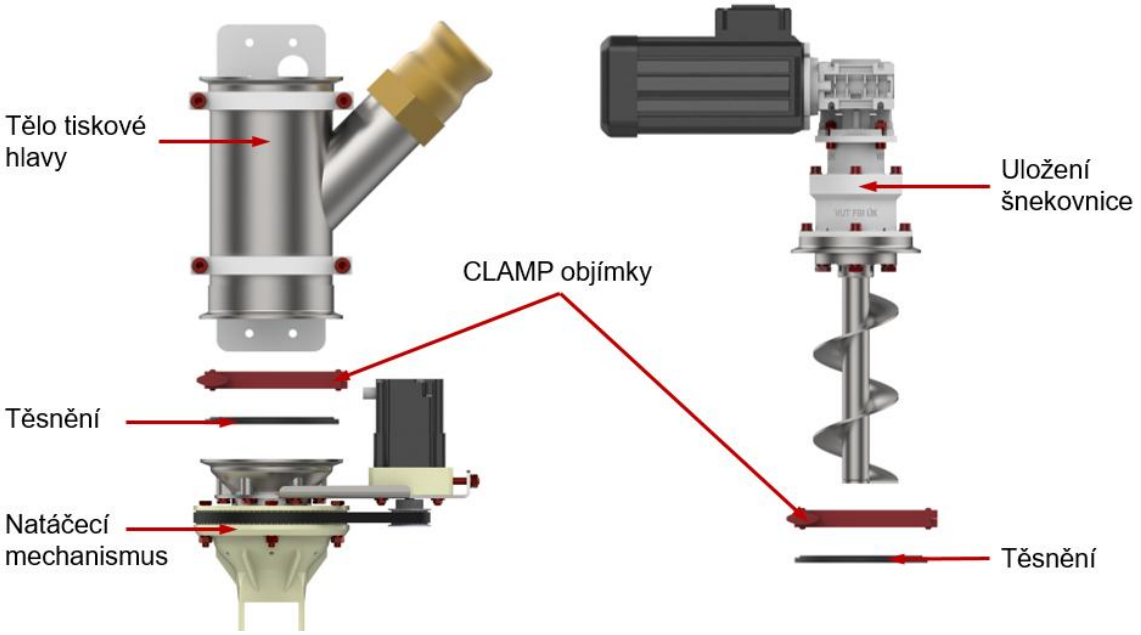
Výsledné konstrukční řešení reflektuje přístupy a poznatky z předchozích kapitol diplomové práce a jeho výsledkem je tisková hlava se šnekovým pohonem o maximálních rozměrech 415 x 578 x 145 mm. Tisková hlava je modulární, skládá se ze tří hlavních montážních celků (tělo tiskové hlavy, uložení šnekovnice a natáčecí mechanismus). Celková hmotnost konstrukce tiskové hlavy je 16,36 kg, z toho 8,48 kg je hmotnost uložení šnekovnice s motorem a převodovkou, 4,0 kg je hmotnost těla tiskové hlavy, 2,76 kg je hmotnost natáčecího mechanismu a 1,12 kg hmotnost spojovacího materiálu. Betonová směs je do tiskové hlavy přiváděna z boku vstupním otvorem o průměru 52,3 mm. Přívod směsi k tiskové hlavě je realizován čerpadlem, které protlačuje betonovou směs skrz hadici připojenou z boku k tiskové hlavě. Maximální hmotnost materiálu obsaženého v tiskové hlavě je cca 4,8 kg. Betonová směs je na výstupu z tiskové hlavy tvarována do požadovaného tvaru pomocí obdélníkové trysky, která je opatřena bočními zahlazovacími segmenty. Pohon šnekovnice tiskové hlavy je realizován pomocí asynchronního motoru se šnekovou převodovkou a natáčecí mechanismus je poháněn krokovým motorem v kombinaci s ozubeným řemenovým převodem. Hlavní sestava tiskové hlavy se základními rozměry je zobrazena na Obr. 5-15, další podrobné pohledy viz Příloha 4 - Rendery.



Obr. 5-15 Hlavní sestava tiskové hlavy

Snadnou a rychlou demontáž hlavních celků tiskové hlavy, důležitou zejména při čištění po ukončení tisku, zajišťuje systém CLAMP objímek. Rozpad tiskové hlavy na tři hlavní montážní celky je zobrazen na Obr. 5-16. Mezi jednotlivými CLAMP přírubami

připevněnými k hlavním celkům tiskové hlavy jsou vložena, z důvodu zajištění těsnosti tiskové hlavy, gumová profilová těsnění. U demontáže tiskové hlavy při čištění se předpokládá ponechání těla hlavy připevněného k polohovacímu zařízení a demontáž a důkladné externí očištění celků natáčecího mechanismu a uložení šnekovnice.



Obr. 5-16 Rozpad tiskové hlavy na montážní celky

Vůle mezi šnekovnicí a tělem tiskové hlavy byla volena s ohledem na dostupné polotovary pro výrobu a byla zvolena větší, než největší rozměr používaného kameniva (4–8 mm). Výsledná vůle tedy odpovídá 8,8 mm, což by mělo zajistit plynulý chod zařízení a eliminovat zasekávání kameniva ve spáře mezi šnekovnicí a tělem tiskové hlavy.

5.3.1 Použité materiály a technologie

Materiály vybrané pro výrobu jednotlivých dílů tiskové hlavy byly voleny s ohledem na prostředí, ve kterém by měly pracovat a s ohledem na jejich měrnou hmotnost (požadavek na snižování hmotnosti).

Všechny součásti v kontaktu s tisknutou směsí jsou vyrobeny z korozivzdorné oceli, vyjma výstupní trysky, která je snadno vyměnitelná (považována za spotřební materiál) a je vyrobena z plastu. Korozivzdorná ocel poskytuje dobrou chemickou odolnost a otěruvzdornost vůči kontaktu s betonovou směsí. Hliníkové slitiny nelze použít zejména z důvodu jejich reaktivity s chemickým urychlovačem tuhnutí obsaženém v tisknuté směsi. Poměrně vysoká měrná hmotnost korozivzdorné oceli pak vede na návrh tenkostěnných a vylehčených dílů.

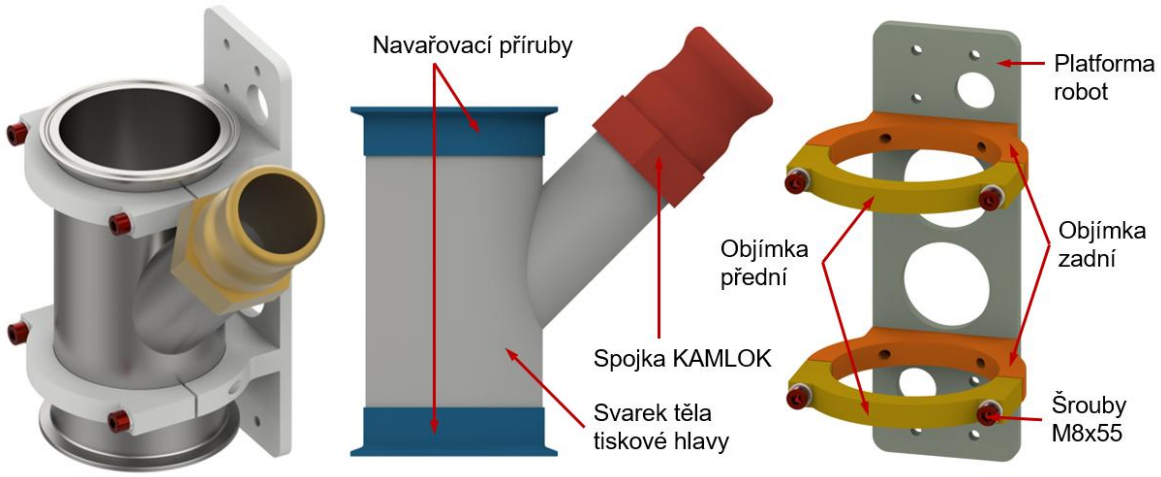
S vylehčováním dílů je spojena i volba technologií pro výrobu jednotlivých dílů, kdy vedle konvenčních technologií byl pro výrobu využit i plastový a kovový 3D tisk.

5.3.2 Tělo tiskové hlavy

Tělo tiskové hlavy se skládá ze dvou hlavních celků a to ze svařence těla tiskové hlavy se spojkou na hadici KAMLOK a ze systému objímek pro uchycení k robotickému rameni KUKA dostupnému pro výstupní experimenty.

Svařenec těla tiskové hlavy je tvořen hlavní svislou trubkou o vnitřním průměru 95,6 mm a tloušťce stěny 3 mm a pod úhlem 45° přivařenou přívodní trubkou o vnitřním průměru 52,3 mm a tloušťce stěny 4 mm. Materiál trubkových polotovarů je korozivzdorná ocel 1.4301. Na konci přívodní trubky je závit G2" pro připevnění rychlospojky KAMLOK, v místech mimo závit je stěna trubky soustružena na tloušťku 3 mm. Na koncích hlavní svislé trubky těla tiskové hlavy jsou přivařeny navařovací CLAMP příruby.

Systém objímek je sestaven z hliníkových výpalků, tloušťka polotovarů pro díly označené na Obr. 5-17 jako objímka přední a objímka zadní je 15 mm, tloušťka dílu platforma robot je 8 mm. Všechny díly jsou vyrobeny z materiálu jakosti EN AW6082. Jednotlivé díly jsou vzájemně spojeny šroubovými spoji M8.



Obr. 5-17 Tělo tiskové hlavy

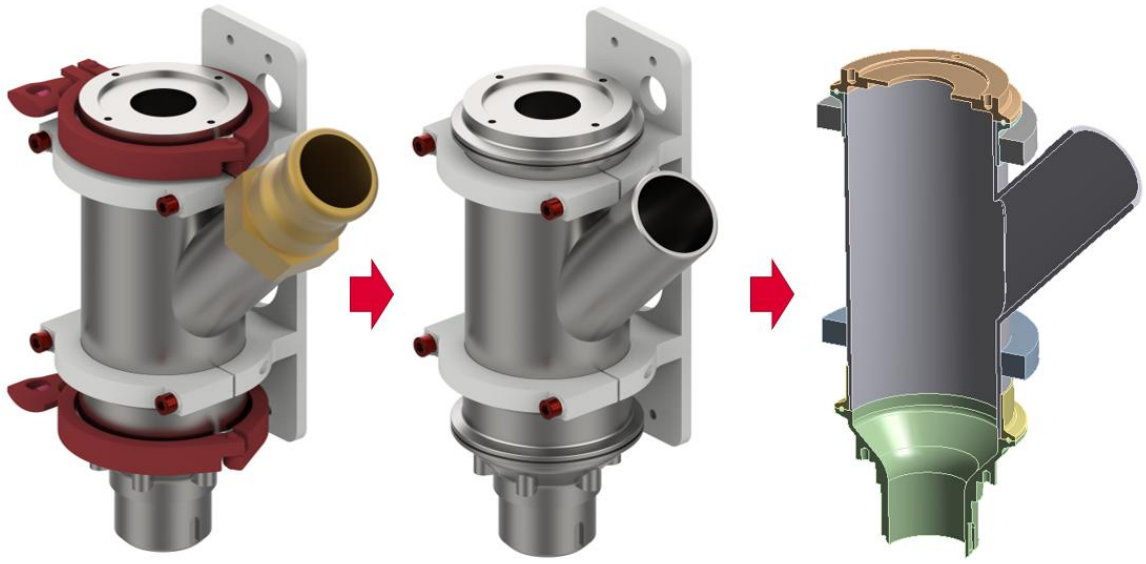
Dimenzování tloušťek použitých polotovarů pro tělo tiskové hlavy probíhalo v několika krocích s využitím MKP metod pro výpočet v prostředí Ansys Workbench.

Dimenzování pláště tiskové hlavy

Tato MKP analýza se zabývá dimenzováním dílů, které jsou v přímém kontaktu s tisknutou směsí a mohlo by tedy dojít k jejich extrémnímu namáhání v případě, že dojde k ucpání výstupního otvoru tiskové hlavy a zároveň bude pokračovat plnění tiskové hlavy směsí od čerpadla (nejhorší stav, ke kterému by mohlo při provozu tiskové hlavy dojít). K tomuto stavu by vzhledem k již provedeným testům docházet nemělo, avšak je to stav, který musí navrhovaná konstrukce vzhledem k bezpečnosti provozu tiskové hlavy vydržet.

MKP analýza tedy simuluje stav ucpání výstupní trysky a natlakování tiskové hlavy čerpadlem přivádějícím tisknutou směs. Maximální zatížení tedy bude odvozeno od tlaku čerpadla PFT ZP 3M FC-230V, které bude sloužit k dopravě směsi k tiskové hlavě. Maximální tlak, který je čerpadlo dle výrobce schopno dosáhnout, je 20 bar. Z provedených experimentů však bylo patrné, že pokud došlo k ucpání hadice při zprovozňování tisku, tak maximální hodnoty tlaku na integrovaném manometru na ústí čerpadla dosahovali největších hodnot cca 15 bar a již při těchto hodnotách čerpadlo vydávalo zvukové efekty, po kterých byl jeho chod raději přerušen. Při uvažování ještě tlakových ztrát v hadici je za maximální možnou hodnotu tlaku pro tuto simulaci považován tlak 16 bar. Provozní tlak při běžném provozu tiskové hlavy se pohyboval okolo 2 bar.

Provedení simulace vyžadovalo značné zjednodušení 3D modelu pláště tiskové hlavy, jak je vidět na Obr. 5-18. Spojka na hadici KAMLOK je dle výrobce dimenzována na maximální provozní tlak 17 bar, CLAMP objímky na maximální provozní tlak 16 bar, vyšší tlak by v tiskové hlavě neměl nastat, což tedy umožňuje jejich bezpečné použití a možnost zjednodušení v rámci simulovaného modelu. Mezi další zjednodušení modelu, sloužící ke snížení výpočtové náročnosti, patří nahrazení systému objímek jednodušší geometrií v podobě vysunutého mezikruží a použití pouze poloviční modelu pláště v kombinaci s využitím symetrie v prostředí Ansys Workbench. Materiálové charakteristiky jednotlivých dílů pláště tiskové hlavy byly nastaveny pro korozivzdornou ocel 1.4301 s mezí kluzu 210 MPa, vyjma objímek, kde byla jako materiál nastavena hliníková slitina EN-AW6082 s mezí kluzu 260 MPa.

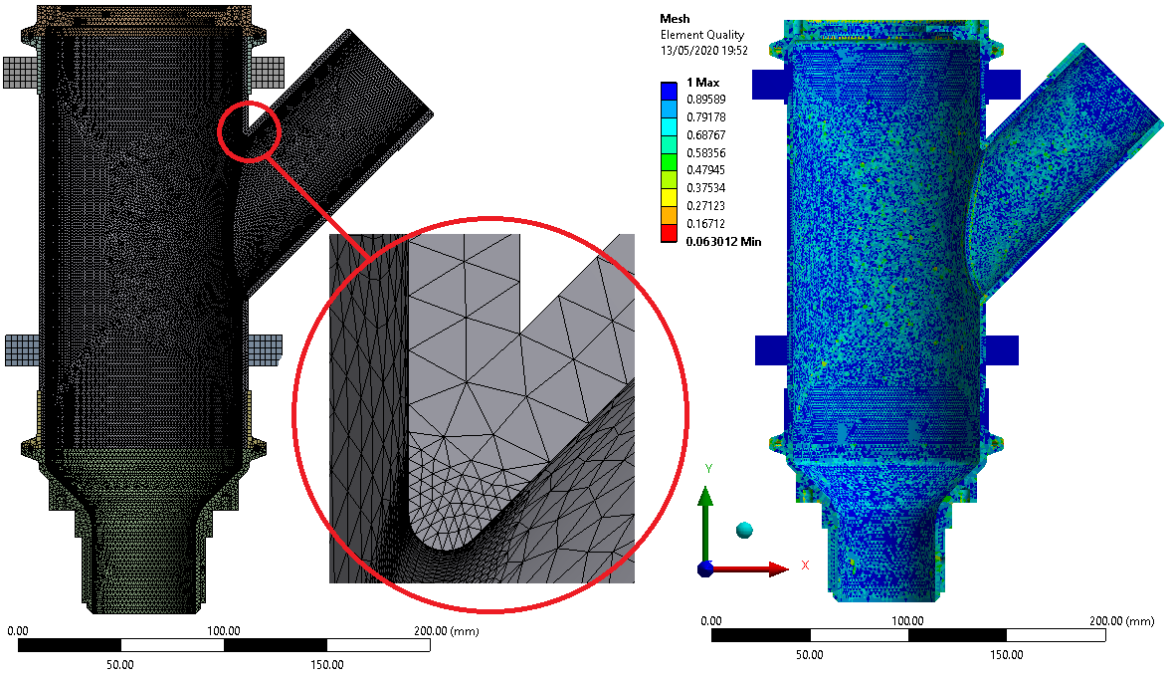


Obr. 5-18 Zjednodušení MKP modelu

Vazby mezi jednotlivými díly poloviční modelu jsou realizovány pomocí vazeb typu bonded (pevný spoj) vyjma vazeb mezi zjednodušenými objímkami a tělem tiskové hlavy, ty jsou nastaveny jako frictional (třecí vazba) s koeficientem tření 0,6, což by mělo

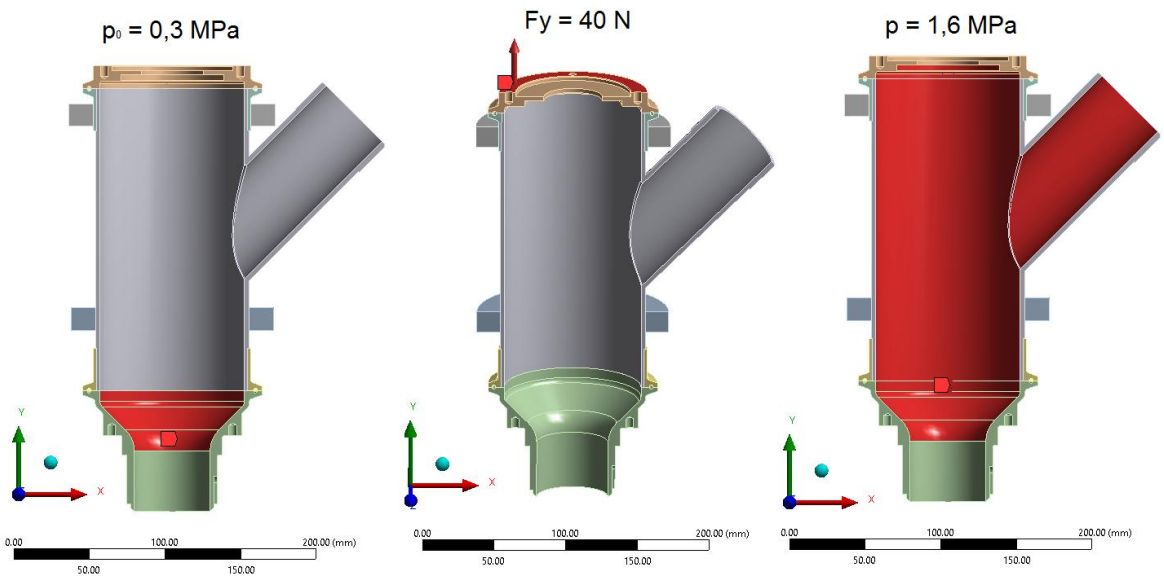
simulovat možný malý posuv v případě deformace pláště hlavy. Celá tisková hlava je k souřadnému systému zavazbena pomocí dvojice vazeb displacement (zamezení pohybu součásti v určitém směru). První vazba displacement je nastavena na vnější průměr objímek tiskové hlavy a je zde zamezeno pohybu v horizontálním směru (posuv v ose x a z je roven nule). Druhá vazba displacement je nastavena na horní mezikruží víka uzavírajícího z vrchu tiskovou hlavu, zde je zamezeno vertikálnímu pohybu (posuv v ose y je roven nule).

Kvalita výpočtové sítě použité pro výpočet je zobrazena na Obr. 5-19. Síť je tvořena čtyřstěny, v oblastech vzniku špičkových napětí je síť zjemněna. Celkový počet použitých prvků je cca 520 tisíc, při počtu uzlů cca 860 tisíc.



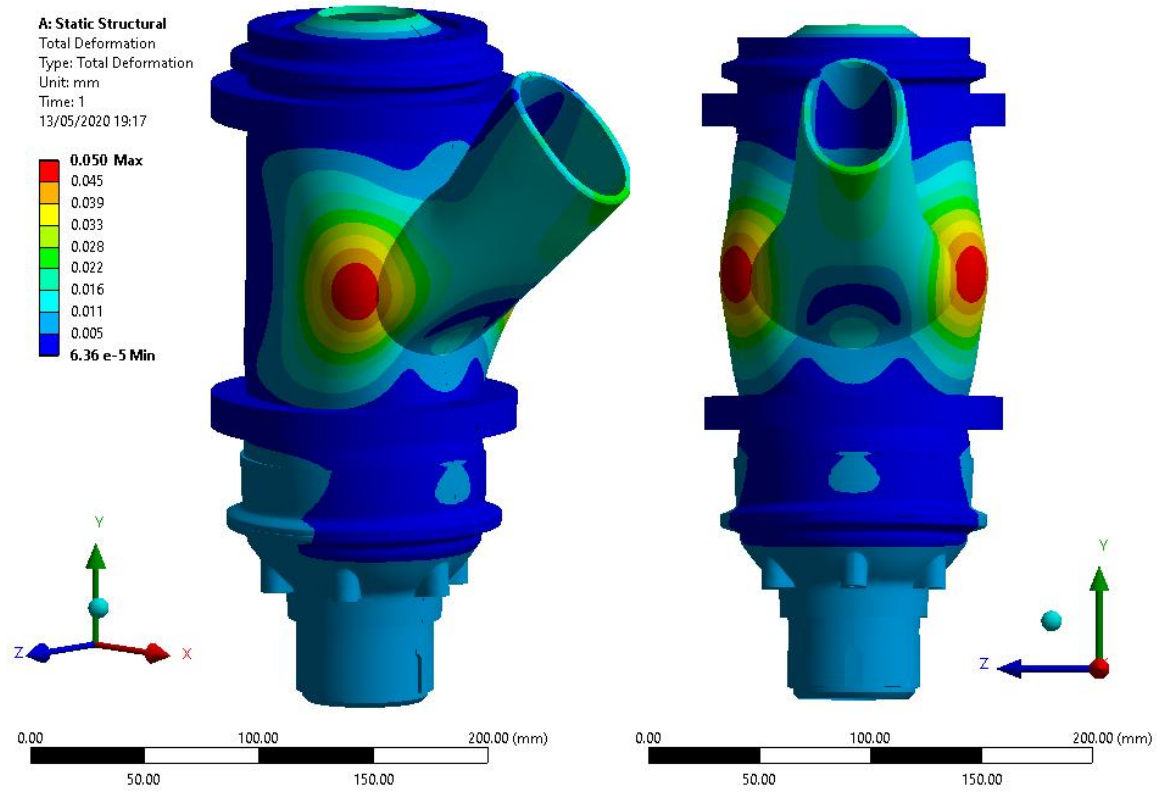
Obr. 5-19 Kvalita meshe MKP tiskové hlavy

Zatížení tiskové hlavy bylo v simulaci realizováno ve dvou krocích. Nejprve provozním zatížením p_0 = 0,3 MPa na spodní část tiskové hlavy a silou F_y = 40 N představující reakční sílu na hřídel při protlačování betonové směsi pomocí šnekovnice skrz výstupní trysku. Tato síla byla stanovena odhadem a přibližně se rovná tíhové síle na betonovou směs při plném naplnění tiskové hlavy, působí však v opačném směru. Provozní zatížení bylo stanoveno z hodnoty provozního tlaku čerpadla cca 0,2 MPa a k této hodnotě byl přičten odhad tlaku vznikajícího protlačováním směsi tryskou o hodnotě 0,1 MPa. Tyto provozní zatížení v prvním kroku zatěžování tiskové hlavy simulují vznik prvotních deformací, ve druhém kroku zatěžování je pak tisková hlava zatížena na všech vnitřních plochách pláště maximálním tlakem p = 1,6 MPa a stejnou silou F_y jako v prvním zatěžovacím kroku. Popisovaná zatížení tiskové hlavy jsou zobrazena na Obr. 5-21.



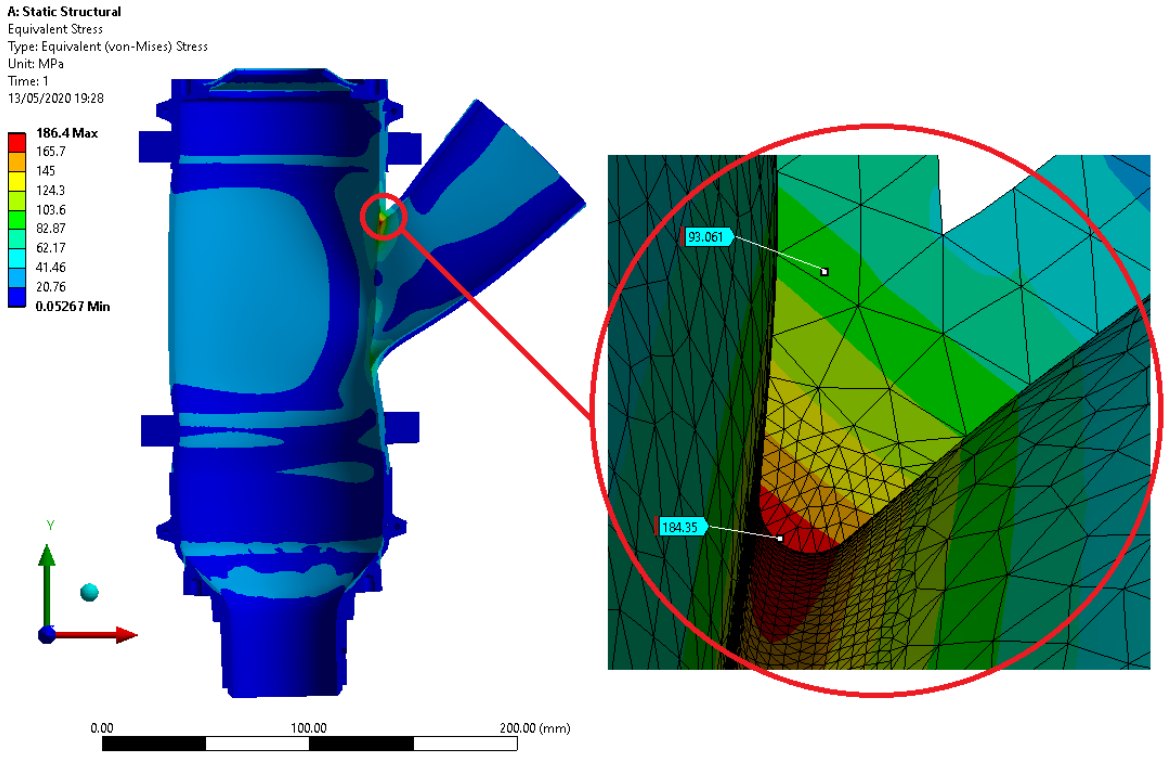
Obr. 5-21 Zatěžování tiskové hlavy

Výsledné deformace tiskové hlavy, dosažené v rámci statické strukturální analýzy za použití výše popisovaných okrajových podmínek, jsou graficky znázorněny na Obr. 5-20. Největších deformací je dosaženo v oblastech spoje hlavní vertikální trubky a trubky přívodní. Maximální hodnota deformace je cca 0,05 mm, což je hodnota vzhledem k rozměrům a funkci tiskové hlavy zanedbatelná a neměla by mít vliv na funkci zařízení.



Obr. 5-20 Deformace tiskové hlavy

Výsledná napětí (Equivalent von-Mises Stress) statické strukturální analýzy jsou znázorněna na Obr. 5-22. Maximální dosažené napětí je 186,4 MPa a místem vzniku tohoto napětí je hrana spojující hlavní vertikální trubku těla tiskové hlavy s přívodní trubkou přivařenou pod úhlem 45°.



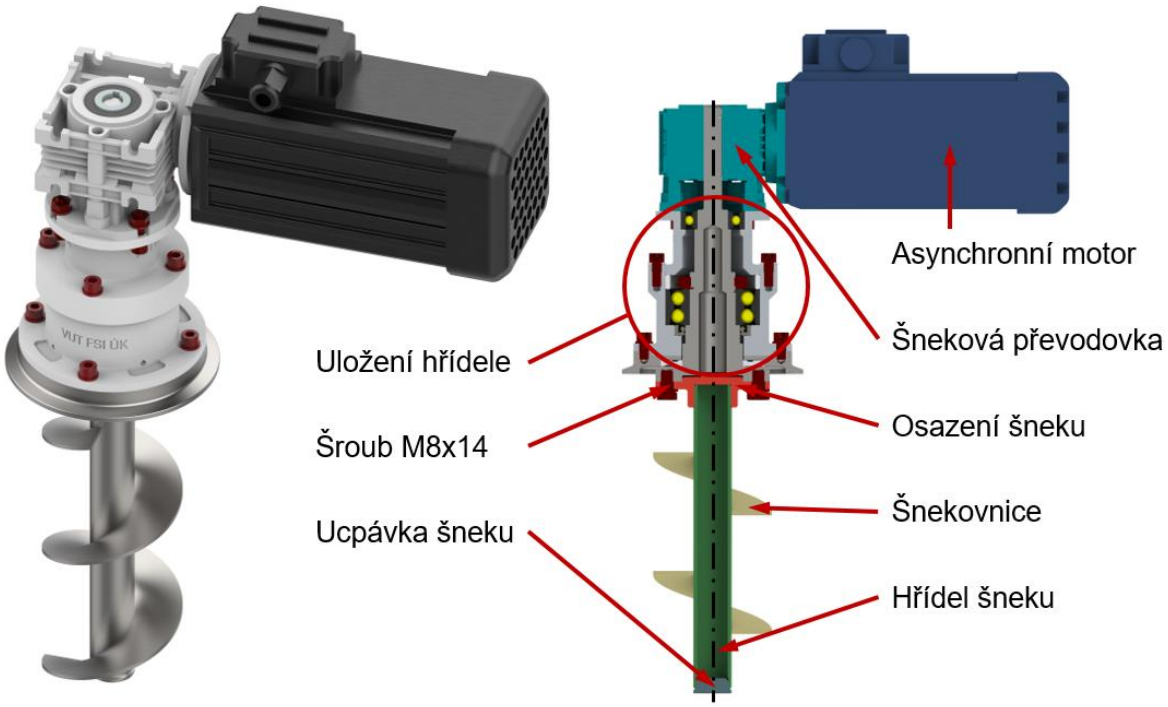
Obr. 5-22 Napětí (Equivalent von-Mises Stress)

Bezpečnost vzhledem k meznímu stavu pružnosti je v tomto místě cca 1,2. Vzniklá nebezpečná oblast je velice úzká, cca o dva milimetry dále je již napětí poloviční a bezpečnost tedy jednou taková. Vzhledem k tomu, že z vnějšku bude nebezpečné místo ještě vyztuženo koutovým svarem a nebezpečná oblast je velice malá (pokud by došlo k plastické deformaci a relaxaci napětí, tak by konstrukce neselhala) je dosažená bezpečnost považována za dostatečnou.

Výše popisovaný výpočet probíhal v několika iteracích, kdy byl nejprve sledován vliv nastavení výpočtové sítě a okrajových podmínek na výsledky simulace, po získání stabilního nastavení simulace (malá změna v nastavení okrajových podmínek nebo v nastavení výpočtové sítě nezpůsobovala výrazné změny ve výsledcích simulace) byl pozorován vliv geometrie pláště tiskové hlavy na výslednou bezpečnost. Postupně byl odebírán materiál z nepotřebných míst, až bylo dosaženo výsledné, výše prezentované, geometrie pro výpočet a následnou výrobu.

5.3.3 Uložení šneku

Uložení šneku se skládá ze tří hlavních celků: motor s převodovkou, šnek a uložení hřídele, který zajišťuje přenos krouticího momentu od převodovky ke šneku. Mezi převodovkou a hřídelí je krouticí moment přenášen pomocí pera těsného 4 x 4 x 40 mm, mezi hřídelem a šnekem je tento přenos realizován čtveřicí šroubů M8 x 14. Šnek se skládá z připojovacího osazení, hřídele šneku, šnekovnice a ucpávky zamezující vniknutí betonové směsi do dutého hřídele šneku viz Obr. 5-23. Uložení hřídele přenášejícího krouticí moment od převodovky ke šneku je realizováno dvojicí radiálních ložisek. Pohon zařízení je realizován asynchronním motorem v kombinaci se šnekovou převodovkou.



Obr. 5-23 Uložení šneku

Volba rozměrů šneku

Rozměry šneku byly dimenzovány na základě průtokových testů materiálu s tiskovou hlavou navrženou v rámci BP. Výpočet množství dopravovaného materiálu vertikálním šnekovým dopravníkem provedený v rámci bakalářské práce se výrazně lišil od reálných naměřených hodnot. V diplomové práci tento postup výpočtu použit nebyl, místo něj byly přibližné rozměry šneku dimenzovány pomocí jednoduchého výpočtu vycházejícího z frekvence otáčení a účinného objemu šneku.

Výpočet vychází z předpokladu, že objem materiálu protlačený tryskou při jednom otočení šneku se rovná objemu válce určeného vnějším průměrem a stoupáním šneku (od tohoto objemu je ještě odečten objem vnitřního hřídele šneku a objem šnekovnice odpovídající jedné otáčce šneku).

Postup výpočtu nastíněný v předchozím odstavci byl v prvním kroku použit pro výpočet dopravovaného množství materiálu při provedených průtokových testech s tiskovou hlavou BP. Ze známých rozměrů šneku a otáček hnacího hřídele použitých při testech bylo vypočteno množství dopravovaného materiálu, to bylo poté porovnáno s reálně naměřenou hodnotou množství dopravovaného materiálu. Tak byla ověřena funkčnost výpočtu a výpočet mohl být použit pro dimenzování rozměrů šneku tiskové hlavy DP. Do uvedeného výpočtu byly dosazeny hodnoty: průměr šneku $d_{š}$ = 0,1 m, stoupání šneku $s_{š}$ = 0,1 m, objem hřídele a šnekovnice na jednu otáčku (odečteno z modelu) $V_{hš}$ = $1{,}55 \cdot 10^{-4}$ m^3 a otáčky šnekovnice $n_{š}$ = 3966 h^{-1} odpovídající trysce 50 mm z Tab. 5-5.

$$V_{ú} = \frac{\pi \cdot d_{š}^{\,2}}{4} \cdot s_{š} - V_{hš} = \frac{\pi \cdot 0{,}1^2}{4} \cdot 0{,}1 - 1{,}55 \cdot 10^{-4} = 6{,}3 \cdot 10^{-4}\, m^3 \tag{5-6}$$

$$Q_h = V_{ú} \cdot n_{š} = \; 6{,}3 \cdot 10^{-4} \cdot 3966 = 2{,}5\, m^3 \cdot h^{-1} \tag{5-7}$$

kde:

$V_{ú}$	m^3	je účinný objem šneku
$d_{š}$	m	- vnější průměr šneku
$s_{š}$	m	- stoupání šneku
$V_{hš}$	m^3	- objem hřídele a šnekovnice na jednu otáčku šneku
$n_{š}$	h^{-1}	- otáčky šneku
Q_h	$m^3 \cdot h^{-1}$	- množství dopravovaného materiálu

Uvedený výpočet byl proveden, stejně jako experimenty, pro tři různá nastavení rychlostí otáčení šneku (3 různé průměry trysek) a výsledné porovnání naměřených a vypočítaných hodnot množství dopravovaného materiálu je zobrazeno v Tab. 5-5.

Tab. 5-5 Výpočet dopravovaného množství

	Tryska 50 mm	Tryska 40 mm	Tryska 35 mm
Použité otáčky (h^{-1})	3966	3324	3126
Vypočítaný průtok ($m^3 \cdot h^{-1}$)	2,5	2,1	1,97
Reálný průtok ($m^3 \cdot h^{-1}$)	2,19	1,73	1,54
Procentuální úbytek (%)	12,4	17,62	21,83

Z vypočítaných a naměřených hodnot vyplývá, že reálný průtok je nižší než teoreticky vypočítaný, což by mohlo být způsobeno například neúplným plněním šneku tisknutou směsí, případně částečně se vracející směsí mezerou mezi šnekovnicí a tělem tiskové hlavy

při nárůstu tlaku na dně hlavy způsobeném protlačováním směsi výstupní zúženou tryskou. Procentuální úbytek množství dopravovaného materiálu se pohybuje od 12,4 do 21,83 %, přičemž nižších odchylek je dosaženo při tisku tryskou s větším průměrem a naopak. Tyto hodnoty budou dále reflektovány při návrhu nového šneku a při volbě rozsahu jeho otáček.

Níže uvedený výpočet šneku byl prováděn v několika iteracích, kdy ve výpočtu bylo reflektováno několik faktorů: polotovary dostupné pro výrobu těla tiskové hlavy, rozsah možného řízení otáček motoru (viz volba motoru a převodovky), volba vůle mezi šnekovnicí a tělem tiskové hlavy a úbytek dopravovaného množství materiálu viz výpočet výše. Do uvedeného výpočtu byly dosazeny hodnoty: průměr šneku $d_{š} = s_{š}$ stoupání šneku (u šnekových dopravníku často používané), objem hřídele a šnekovnice na jednu otáčku (zpětně odečteno z modelu) $V_{hš} = 4{,}9 \cdot 10^{-5}$ m^3, jmenovité výstupní otáčky z převodovky $n_{š} = 5580$ h^{-1} a požadované množství dopravovaného materiálu $V_h = 1{,}8$ m$^3 \cdot$h^{-1}. Hodnota požadovaného množství dopravovaného materiálu byla volena s ohledem na požadovaný rozsah ze zadání (0,5–2 m$^3 \cdot$h^{-1}), dále s ohledem na možnost řízení otáček motoru frekvenčním měničem (viz volba motoru a převodovky) a v úvahu byl brán i procentuální úbytek dopravovaného množství materiálu. Pokud je od hodnoty V_h odečtena průměrná procentuální odchylka 17,3 %, pak reálné množství dopravovaného materiálu bude cca 1,5 m$^3 \cdot$h^{-1}, což odpovídá hodnotě dopravovaného množství materiálu pro tisk s nejmenší tryskou o průměru 35 mm viz Tab. 5-3 (používané otáčky šneku budou vyšší).

$$Q_h = \left(\frac{\pi \cdot d_{š}^{\,2}}{4} \cdot s_{š} - V_{hš}\right) \cdot n_{š} = \left(\frac{\pi \cdot d_{š}^{\,3}}{4} - V_{hš}\right) \cdot n_{š} \tag{5-8}$$

$$d_{š} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot Q_h}{\pi \cdot n_{š}} + \frac{4 \cdot V_{hš}}{\pi}} = 0{,}0779\ m \tag{5-9}$$

kde:

$V_{ú}$	m^3	je účinný objem šneku
$d_{š}$	m	- vnější průměr šneku
$s_{š}$	m	- stoupání šneku
$V_{hš}$	m^3	- objem hřídele a šnekovnice na jednu otáčku šneku
$n_{š}$	h^{-1}	- otáčky šneku
Q_h	m$^3 \cdot$h^{-1}	- množství dopravovaného materiálu

Vypočtený průměr a stoupání šnekovnice je po zaokrouhlení 78 mm, což při použití trubkového polotovaru pro tělo tiskové hlavy o vnitřním průměru 95,6 mm odpovídá vůli mezi šnekovnicí a tělem tiskové hlavy 8,8 mm. Tato hodnota je větší než největší rozměr uvažovaného kameniva ve směsi, což by mělo zamezit zasekávání kameniva ve spáře mezi šnekovnicí a tělem tiskové hlavy.

Volba motoru a převodovky

Výběr pohonu tiskové hlavy ovlivňovalo několik hlavních parametrů: požadovaný krouticí moment, rozsah otáček a možnosti řízení, stupeň ochrany a hmotnost motoru. Volba vhodného pohonu probíhala současně s dimenzováním rozměrů šneku tak, aby požadovaný rozsah dopravovaného množství materiálu odpovídal možnostem řízení pohonu.

Z experimentů zaměřených na zjištění krouticího momentu vyplývá, že při měření krouticího momentu s materiálem bez kameniva (nedocházelo k zasekávání) bylo dosaženo maximálních hodnot potřebného krouticího momentu 9,24 N·m. K zajištění spolehlivého chodu zařízení (kompenzace snížení krouticího momentu vlivem ztrát v převodovce a vlivem regulace otáček) je krouticí moment hledaného motoru vynásoben bezpečnostním koeficientem k_m = 1,5 a krouticí moment hledaného motoru pak odpovídá 13,86 N·m.

Požadovaný rozsah otáček motoru reflektuje interval požadovaného množství dopravovaného materiálu ze zadání (0,5–2 $m^3 \cdot h\text{-}1$) a geometrii použitého šneku. Jelikož výběr motoru a převodovky (výstupních otáček) probíhal současně s dimenzováním rozměrů šnekovnice, tak výstupní otáčky zvoleného pohonu 93 min^{-1} již byly použity v předchozím výpočtu 5-4. Nominální otáčky motoru v kombinaci se šnekem o průměru 78 mm odpovídají dopravovanému množství materiálu cca 1,5 $m^3 \cdot h\text{-}1$, což je nejnižší hodnota naměřená při testech s tryskou 35 mm (pro další navržené trysky budou otáčky vyšší).

Nižších a vyšších hodnot výstupních otáček bude dosaženo použitím frekvenčního měniče. Obecně lze asynchronní motory bez problému používat při otáčkách 2x větších než jsou otáčky nominální, nutné je však počítat s poklesem krouticího momentu. Nižší otáčky lze frekvenčním měničem snižovat téměř až k nule, přičemž problémem u nízkých otáček je zejména zahřívání motoru. Požadovanému intervalu dopravovaného množství materiálu odpovídá interval otáček (30–125 min^{-1}), čehož by použitím frekvenčního měniče mělo být bez problému dosaženo.

Jelikož detekce polohy výstupní hřídele motoru není pro tuto aplikaci důležitá (stačí rozpoznat režim zapnuto - vypnuto a rychlost otáčení) je za vhodný pohon pro tiskovou hlavu považován asynchronní motor řízený frekvenčním měničem. Požadovaným, výše zmiňovaným, parametrům nejlépe odpovídá asynchronní motor Transtecno SMT5644 v kombinaci se šnekovou převodovkou CM026 s převodovým poměrem i = 15. Parametry zvoleného pohonu jsou zobrazeny v Tab. 5-6.

Tab. 5-6 Parametry zvoleného pohonu

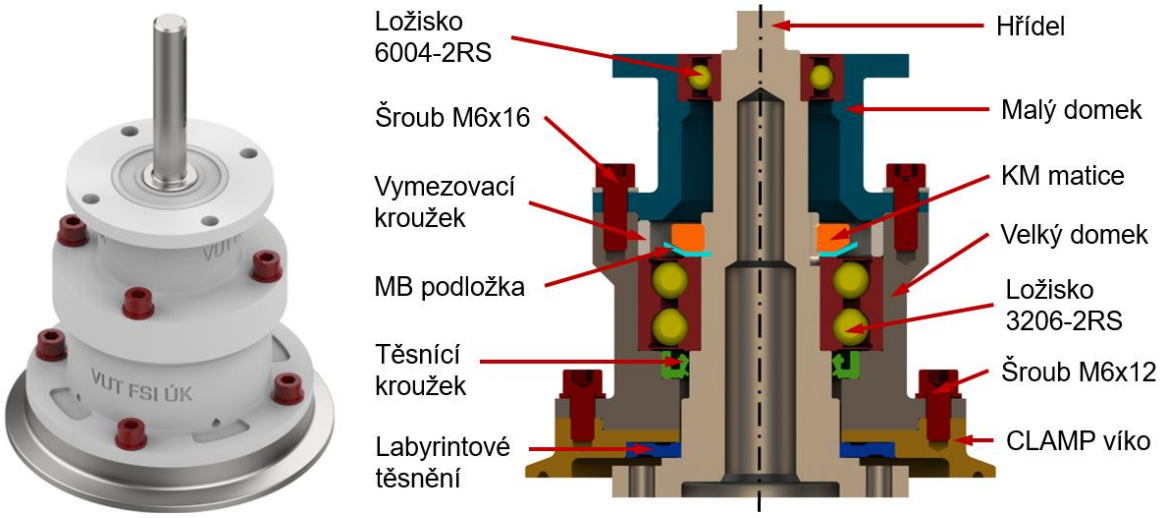
	Otáčky (min^{-1})	Mk (N·m)	Výkon (kW)	Krytí	Hmotnost (kg)
Motor	1400	1,26	0,18	IP66	5,2
Převodovka	93	14	-	-	0,83

Uložení hřídele

Přenos krouticího momentu mezi převodovkou a šnekem je realizován pomocí hřídele uloženého do dvojice ložisek. Ložiska jsou zalisována do dvojice hliníkových ložiskových domků. Ty jsou vzájemně spojeny čtveřicí šroubů M6 x 16 a tento celek pomocí čtyř šroubů připevněn k nerezovému dílu CLAMP víko viz Obr. 5-24, který spojuje uložení hřídele s celkem těla tiskové hlavy.

Hřídel je uložen do dvouřadého ložiska s kosoúhlým stykem 3206-2RS (axiálně zajištěn pomocí KM matice a MB podložky), které přenáší radiální i axiální síly od šneku a do radiálního ložiska 6004-2RS, které slouží k přenosu radiálních sil a zajišťuje plnou určenost uložení i při odstranění motoru a převodovky. Motor s převodovkou tak může být nahrazen například řemenovým převodem nebo pružným hřídelem s pohonem umístěným mimo tiskovou hlavu. Přenos krouticího momentu z převodovky na hřídel je realizován perem těsným 4 x 4 x 40 mm a přenos krouticího momentu mezi hřídelem a šnekem pomocí čtveřice šroubů M8 x 14.

Těsnost uložení je zajištěna pomocí labyrintového těsnícího kroužku NILOS Ring LSTL, který zamezuje vniku nečistot do uložení (určen pro těsnění uložení v permanentním kontaktu s pevnými i kapalnými nečistotami). Velký ložiskový domek je navržen tak, že pokud by nečistoty skrz labyrintové těsnění pronikly zastaví se o hřídelový těsnící kroužek a skrz indikační kanálky (viz příloha Rendery) vytečou do záchytných žlábků, kde zůstanou zachyceny. Pokud obsluha zařízení spatří nečistoty v záchytném žlábku, měl by být proveden servis tiskové hlavy a případná výměna těsnění.

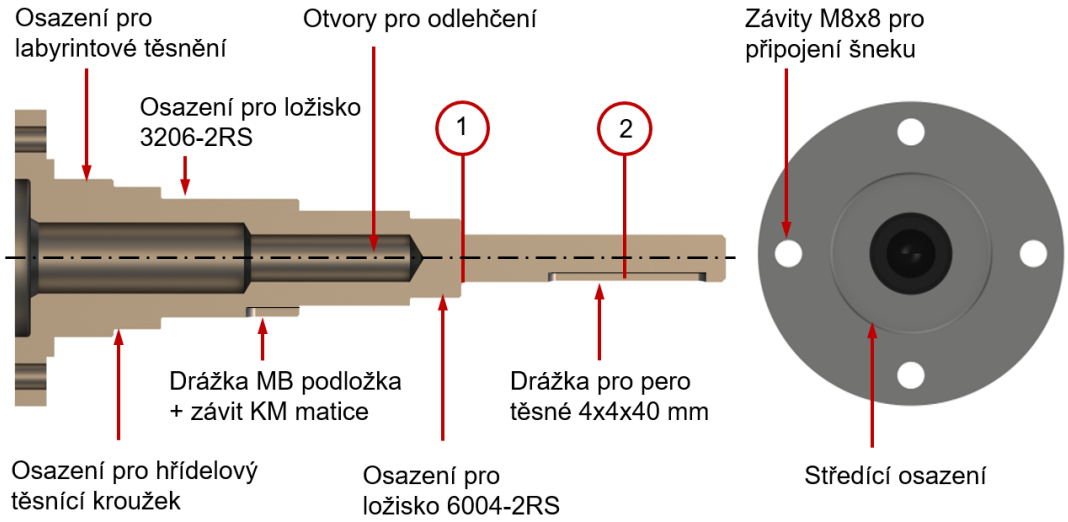


Obr. 5-24 Uložení hřídel

Princip uložení a část použitých dílů uložení zůstala stejná jako v mé BP. Uložení se osvědčilo při provozu tiskové hlavy v praxi, disponovalo dobrou tuhostí a těsností uložení, tudíž ložiska a těsnění byla v nové konstrukci použita stejná jako u tiskové hlavy BP. Zmenšování ložisek a ložiskových domků by nevedlo k výraznému snížení hmotnosti

uložení a výhodou zachování těchto ložisek je jejich značné naddimenzování (viz výpočty v BP), což v případě požadavku na tisk směsi s výrazně horší reologií nemusí vést na návrh nové tiskové hlavy, ale může být vyrobena pouze nová hřídel s výstupem na silnější pohon a uložení hřídele může zůstat zachováno. Kontrola ložisek a šroubového spoje šnek - hřídel byla provedena pro stejné díly a vyšší zatížení již v BP (dostatečná životnost ložisek, dostatečná bezpečnost šroubového spoje), v diplomové práci bude z uložení kontrolováno pouze pero na otlačení a nově navržený hřídel.

Hřídel je vyroben z korozivzdorné oceli 1.4404 s mezí kluzu 220 MPa. Z důvodu snížení hmotnosti je hřídel opatřen otvory pro odlehčení. Na hřídeli se nachází řada koncentrátorů napětí v podobě drážek, závitů a osazení. Otvory pro odlehčení byly navrhovány tak, aby bezpečnost v jednotlivých průřezech s koncentrátory napětí nebyla menší, než bezpečnost ve dvou kritických místech (označených na Obr. 5-25 číslicemi 1 a 2) na nejmenším osazení hřídele, jehož průměr byl předurčen otvorem v převodovce.



Obr. 5-25 Hřídel

Níže uvedené výpočty bezpečností odpovídají bezpečnosti ve dvou kritických průřezech hřídele označených na Obr. 5-25 číslicemi 1 a 2. Tvarový součinitel v těchto místech je dle dostupné literatury $\alpha_{\tau 1} = 1{,}6$ a $\alpha_{\tau 2} = 2{,}2$. První kritický průřez je v místě přechodu z osazení pro převodovku na osazení pro ložisko (na Obr. 5-25 označen číslem 1).

$$\tau_k = 0{,}5 \cdot \sigma_k = 0{,}5 \cdot 220 = 110\ Mpa \tag{5-10}$$

$$\tau_{\max 1} = \alpha_{\tau 1} \cdot \frac{M_k}{W_k} = \alpha_{\tau 1} \cdot \frac{16 \cdot M_k}{\pi \cdot d^3} = 1{,}6 \cdot \frac{16 \cdot 14}{\pi \cdot 0{,}012^3} = 66{,}02\ MPa \tag{5-11}$$

$$k_{k_1} = \frac{\tau_k}{\tau_{\max 1}} = \frac{110}{66{,}02} = 1{,}67 \tag{5-12}$$

Druhý kritický průřez se nachází v místě drážky pro pero těsné. Průřez na Obr. 5-25 označen číslem 2.

$$\tau_{\max 2} = \alpha_{\tau 2} \cdot \frac{M_k}{W_k} = \alpha_{\tau 2} \cdot \frac{16 \cdot M_k}{\pi \cdot d^3} = 2{,}2 \cdot \frac{16 \cdot 14}{\pi \cdot 0{,}012^3} = 90{,}78\ MPa \quad (5\text{-}13)$$

$$k_{k_2} = \frac{\tau_k}{\tau_{\max 2}} = \frac{110}{90{,}78} = 1{,}21 \quad (5\text{-}14)$$

kde:

τ_k	MPa	je mez kluzu ve smyku
σ_k	MPa	- mez kluzu
W_k	mm^3	- modul průřezu v krutu
M_k	N·m	- kroutící moment
d	m	- průměr hřídele
$\alpha_{\tau 1}$	[-]	- součinitel tvaru pro osazení
$\alpha_{\tau 2}$	[-]	- součinitel tvaru pro drážku
$\tau_{\max 1}$	MPa	- napětí v místě osazení
$\tau_{\max 2}$	MPa	- napětí v místě drážky pro pero
k_{k_1}	[-]	- bezpečnost v místě osazení k MSP
k_{k_2}	[-]	- bezpečnost v místě drážky pro pero k MSP

Vypočítané hodnoty bezpečností na hřídeli jsou k_{k_1} = 1,67 a k_{k_2} = 1,21. Nejnižší vypočítaná bezpečnost k meznímu stavu pružnosti se nachází v místě průřezu s drážkou pro pero, i zde je bezpečnost větší než 1 a je považována za dostatečnou.

Přenos krouticího momentu z náboje převodovky na hřídel je realizován perem těsným 4x4x40 mm, kde: délka pera l = 40 mm, šířka pera b = 4 mm, zasunutí pera do náboje t1 = 1,6 mm. Pero bylo navrženo podle drážky v náboji převodovky. Dovolený tlak a vzorce pro výpočet kontroly pera na otlačení jsou převzaty z literatury (()). Dovolený tlak pro oceli p_0 = 150 MPa a výpočet uvažuje se zatěžováním pera střídavým zatížením s malými rázy.

$$F = \frac{2 \cdot M_k}{d} = \frac{2 \cdot 14}{0{,}012} = 2333{,}33\ N \quad (5\text{-}15)$$

$$p_D = 0{,}45 \cdot p_0 = 0{,}45 \cdot 150 = 67{,}5\ MPa \quad (5\text{-}16)$$

$$p_D \geq \frac{F}{t_1 \cdot (l - b)} \tag{5-17}$$

$$67{,}5 \geq \frac{2333{,}33}{1{,}6 \cdot (40 - 4)} = 40{,}51 \ldots platí$$

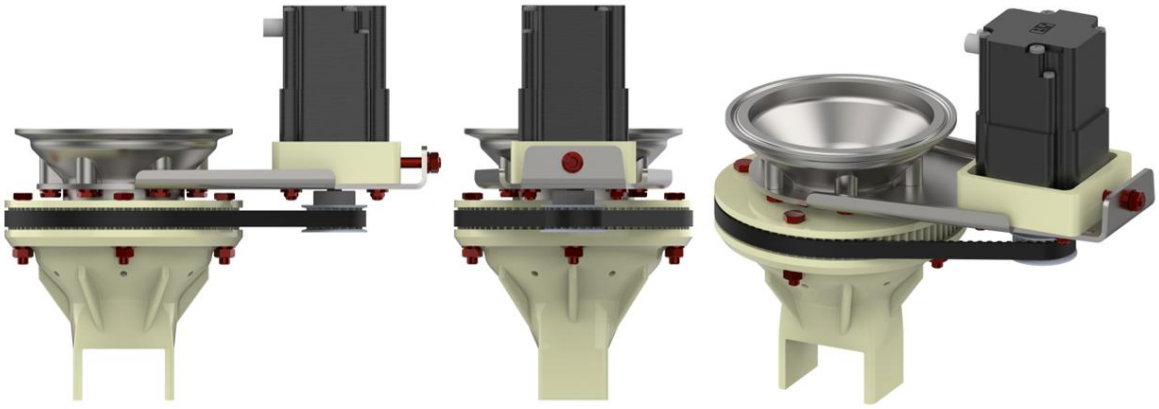
kde:

F	N	je obvodová síla na povrchu hřídele
M_k	N·m	- kroutící moment
d	m	- průměr hřídele
p_D	MPa	- dovolený tlak na bocích drážky
p_0	MPa	- základní hodnota tlaku
t_1	mm	- zasunutí pera do náboje převodovky
l	mm	- délka pera
b	mm	- šířka pera

Z provedeného výpočtu vyplývá, že zvolené pero 4 x 4 x 40 mm pro přenos vyhovuje. Pro přenos krouticího momentu 14 N·m z převodovky na hřídel je možné jej použít.

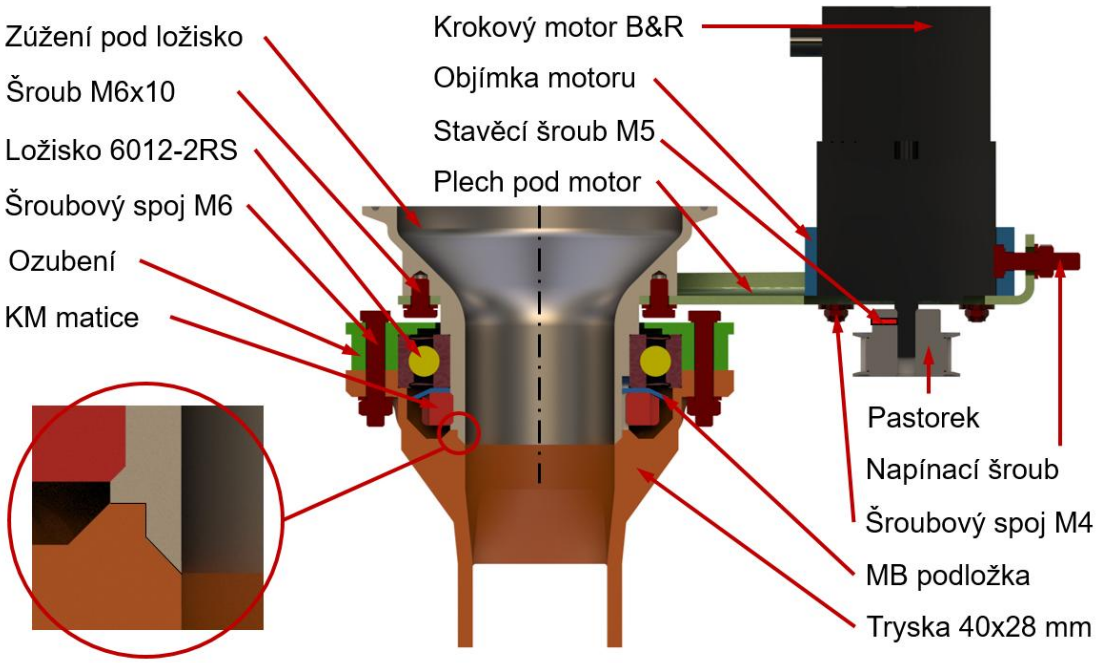
5.3.4 Natáčecí mechanismus

Natáčecí mechanismus je jeden ze tří hlavních celků tiskové hlavy, jeho hlavní funkcí je tvarování výnosu do požadované podoby. Výnos je tvarován pomocí obdélníkové trysky opatřené hladícími segmenty, které zlepšují přesnost a stabilitu výnosu. Stejnorodost výnosu ve všech směrech tisku je zajištěna implementací mechanismu pro rotaci výstupní trysky kolem vertikální osy tiskové hlavy.



Obr. 5-26 Natáčecí mechanismus

Hlavním nosným dílem, ke kterému jsou připevněny další komponenty natáčecího mechanismu je díl na Obr. 5-27 pojmenovaný jako "zúžení pod ložisko". Díl "zúžení pod ložisko" je vyroben z korozivzdorné oceli 316L (pro potřeby DP metodou SLM), v horní části má tvar CLAMP příruby, pomocí které je spojen s celkem těla tiskové hlavy. Zespod je k dílu "zúžení pod ložisko" pomocí šesti šroubů M6x10 připevněn plech pod motor. Plech pod motor slouží k vymezení polohy krokového motoru s pastorkem vůči ozubení natáčecího mechanismu. Toto vymezení polohy je zajištěno systémem drážek v dílu plech pod motor v kombinaci s plastovým dílem objímka motoru a napínacím šroubem. Spodní část dílu "zúžení pod ložisko" disponuje osazením pro radiální ložisko 6012-2RS a závitem s drážkou pro pojištění axiální polohy ložiska pomocí KM matice a MB podložky. Na vnější kroužek ložiska je shora nalisován díl ozubení, k němuž je pomocí čtyř šroubů M6 přitažena výstupní tryska.



Obr. 5-27 Natáčecí mechanismus řez

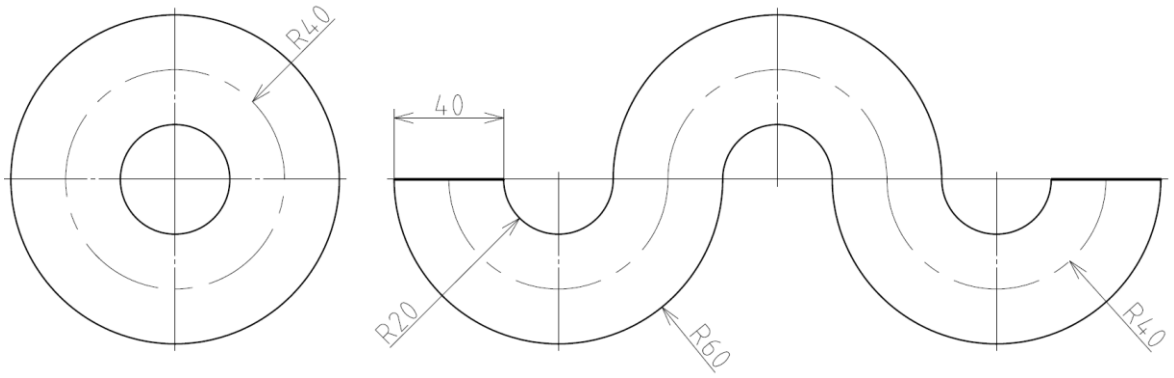
Zajištění těsnosti výstupní trysky vůči vnikání tisknuté směsi do uložení byl jeden z problematických konstrukčních uzlů mechanismu. Z důvodu absence vhodného komerčně dostupného těsnění, byla těsnost mezi dílem zúžení pod ložisko a tryskou zajištěna návrhem vhodně tvarovaného kontaktu (viz Obr. 5-27) a vhodně zvolených materiálů pro výrobu jednotlivých dílů. Tryska natáčecího mechanismu je vyrobena technologií 3D tisku z plastu ABS a je navržena tak, že při nasazení na nerezový protikus "zúžení pod ložisko" vznikne velice malý přesah, který zajistí těsnost kontaktu. Tento přesah však značně zvýší tření mezi díly a proto je před použitím nové trysky nutné vytištěnou trysku zaběhnout. Při záběhu si nerezový díl udělá v plastové trysce potřebný prostor, čímž se sníží tření a těsnost kontaktu zůstane zachována. Při delším použití trysky se předpokládá, že betonová směs se bude do spáry mezi těmito díly pomalu dostávat a ve

chvíli kdy směs vydře kontakt natolik, že tisknutá směs pronikne do uložení, mělo by dojít k vytékání směsi indikačními kanálky na bocích trysky, což upozorní obsluhu stroje na nutnost výměny trysky. Navržená tryska je tedy považována za spotřební materiál a ve chvíli vydření kontaktu by měla být nahrazena.

Řemenový převod

Přenos krouticího momentu od krokového motoru na výstupní trysku je realizován řemenovým převodem s využitím ozubeného řemene. Důvodem použití převodu s ozubeným řemenem je nízká hmotnost celého převodu (možnost využití plastových dílů) při současném zajištění přesného natočení (bez skluzu). Návrh řemenového převodu je předurčen rozměrovými možnostmi a požadavky na rychlost otáčení výstupní trysky.

Rychlost otáčení výstupní trysky je odvozena z maximální uvažované rychlosti posuvu tiskové hlavy a z předpokladu, že s tryskou o průměru 40 x 24 mm (nejmenší uvažovaná) bude tisková hlava při plné rychlosti tisknout výnos s poloměrem zaoblení větším než 40 mm (menší poloměr zaoblení by způsoboval deformace výnosu vlivem kolize hladících segmentů s vyneseným materiálem). Možnosti tvarování stopy (vlevo - válec, vpravo - vlnovka) jsou zobrazeny na Obr. 5-28, kde čerchovanou čarou je zobrazen pohyb polohovacího zařízení a plnými čarami půdorys vynášeného materiálu.



Obr. 5-28 Možnosti tvarování výnosu

Níže uvedený výpočet uvažuje tisk jedné vrstvy válcovitého objektu o průměru 80 mm (poloměr zaoblení 40 mm viz Obr. 5-28 vlevo), při rychlosti pohybu polohovacího zařízení 0,5 $m \cdot s^{-1}$ (nejrychlejší uvažovaná rychlost). Ze známého průměru válcovitého objektu je nejprve vypočítána délka trajektorie pohybu polohovacího zařízení (trajektorie po které se bude pohybovat vertikální osa tiskové hlavy) a z délky trajektorie a rychlosti pohybu polohovacího zařízení čas tisku jedné vrstvy. Ze známého času tisku jedné vrstvy je vypočtena potřebná rychlost otáčení trysky.

$$l_t = 2 \cdot \pi \cdot r_t = 2 \cdot \pi \cdot 40 = 251{,}33\ mm \qquad (5\text{-}18)$$

$$t_t = \frac{l_t}{v_t} = \frac{251{,}33}{500} = 0{,}503\ s \tag{5-19}$$

$$\omega_t = \frac{\varphi_t}{t_t} = \frac{2 \cdot \pi}{0{,}503} = 12{,}49\ rad \cdot s^{-1} = 1{,}99\ ot \cdot s^{-1} \tag{5-20}$$

kde:

l_t	mm	je délka trajektorie pohybu polohovacího zařízení
r_t	mm	- poloměr zaoblení trajektorie
t_t	s	- doba průjezdu trajektorie (jedné vrstvy)
ω_t	rad·s^{-1}	- úhlová rychlost natáčení trysky
φ_t	rad	- úhel natočení (plný kruh = 2π)

Maximální potřebná rychlost otáčení výstupní trysky je dle výpočtu cca 2 ot·s^{-1} (n_2 = 120 ot·min^{-1}), tato hodnota společně s rozměrovými možnostmi velikosti ozubení a možnostmi řízení krokového motoru vstupuje do dalšího výpočtu, který se zabývá výpočtem řemenového převodu. Efektivní otáčky hřídele krokového motoru se pohybují v rozsahu od 50 do 500 ot·min^{-1}, z těchto hodnot vyplývá, že navrhovaný převod bude do pomala. Volbou převodového poměru (i = 4) je snaha přiblížit se otáčkami výstupní hřídele k horní hranici efektivních otáček (dosažení požadovaných otáček při zachování širokého intervalu regulace). Roztečný průměr většího řemenového kola (d_2 = 127,32 mm) byl vybrán ze standardní používané řady řemenových kol tak, aby ozubení poskytovalo dostatečný vnitřní prostor pro uložení ložiska a šroubový spoj viz Obr. 5-27. Ze známých roztečných poměrů byl dopočítán doporučený interval vzdálenosti os.

$$i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{d_2}{d_1} \tag{5-21}$$

$$n_1 = i \cdot n_2 = 4 \cdot 120 = 480\ ot \cdot min^{-1} \tag{5-22}$$

$$d_1 = \frac{d_2}{i} = \frac{127{,}32}{4} = 31{,}83\ mm \tag{5-23}$$

$$0{,}7 \cdot (d_1 + d_2) < A < 2 \cdot (d_1 + d_2) \tag{5-24}$$

$$0{,}7 \cdot (31{,}83 + 127{,}32) < A < 2 \cdot (31{,}83 + 127{,}32) \tag{5-25}$$

$$111{,}4 < A < 318{,}3 \ \rightarrow A = 115\ mm \tag{5-26}$$

kde:

i	-	je převodový poměr řemenového převodu
n_1	ot·min^{-1}	- rychlost otáčení výstupní hřídele (menší řemenové kolo)
n_2	ot·min^{-1}	- rychlost otáčení trysky (větší řemenové kolo)
d_1	mm	- roztečný průměr menšího řemenového kola
d_2	mm	- roztečný průměr většího řemenového kola
A	mm	- vzdálenost os řemenových kol

Z vypočítaných hodnot roztečných průměrů řemenových kol je dále dopočítána teoretická délka řemene *Lp´* a na základě této hodnoty je zvolen řemen se skutečnou délkou *Lp*.

$$Lp' = 2 \cdot A \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) + \frac{\pi \cdot (d_1 + d_2)}{2} + \frac{\pi \cdot \gamma \cdot (d_2 - d_1)}{180} \tag{5-27}$$

$$\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{(d_2 - d_1)}{2 \cdot A} = \frac{(127{,}32 - 31{,}83)}{2 \cdot 115} = 0{,}4152 \tag{5-28}$$

$$\frac{\alpha}{2} = \cos^{-1}(0{,}4152) = 65°28' \tag{5-29}$$

$$\gamma = 90° - \frac{\alpha}{2} = 90° - 65°28' = 24°32' \tag{5-30}$$

$$Lp' = 2 \cdot 115 \cdot \sin(65°28') + \frac{\pi \cdot (31{,}83 + 127{,}32)}{2} + \frac{\pi \cdot 24°32' \cdot (127{,}32 - 31{,}83)}{180} = 500{,}12 \rightarrow Lp = 500\ mm \tag{5-31}$$

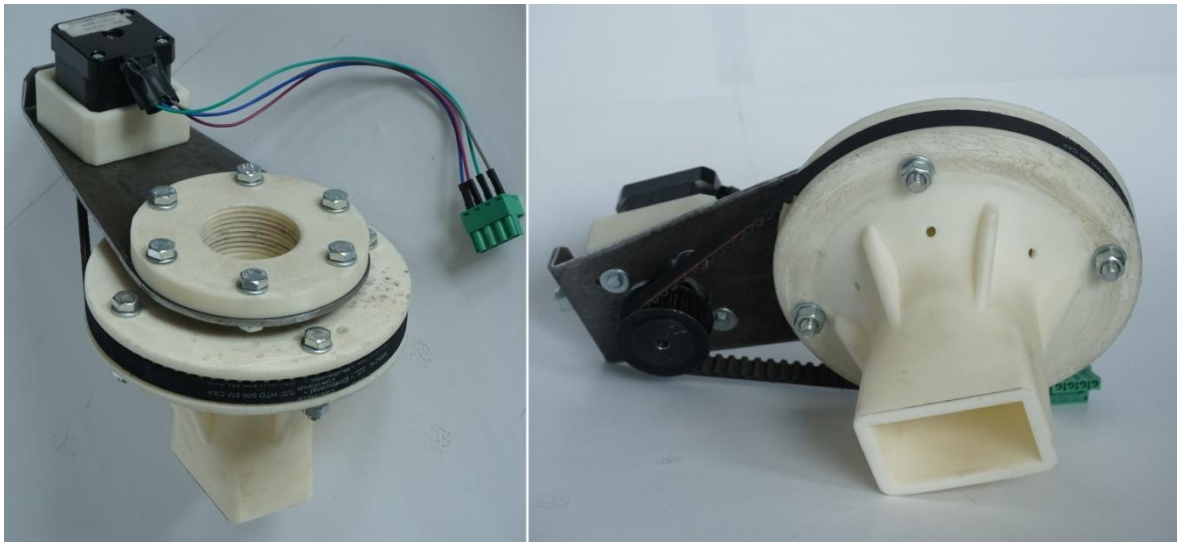
kde:

Lp'	mm	je teoretická délka řemene
α	°	- úhel alfa
γ	°	- úhel gama
d_1	mm	- roztečný průměr menšího řemenového kola
d_2	mm	- roztečný průměr většího řemenového kola

Na základě provedených výpočtů byl navržen řemenový převod skládající se z ozubené řemenice HD20-5M 9 (zajištěné stavěcím šroubem na hřídeli krokového motoru), ozubeného řemene Goodyear 9 5M 500 a ozubeného řemenového kola vyrobeného z plastu ABS pomocí 3D tisku.

Pohon natáčecího mechanismu

Pohon natáčecího mechanismu je realizován pomocí krokového motoru B&R 80MPF1.500 s přídržným krouticím momentem 1,1 N·m. Způsob těsnění mezi dílem zúžení pod ložisko a výstupní tryskou (třecí kontakt) vytváří společně se setrvačností betonové směsi odpor vůči otáčení výstupní trysky. Tento odpor definuje krouticí moment potřebný pro pohon mechanismu. Výpočetní simulace tohoto kontaktu by byla velice složitá, z toho důvodu byl vyroben plastový prototyp natáčecího mechanismu, který sloužil k ověření funkčnosti systému natáčení a k určení krouticího momentu potřebného pro pohon zařízení.



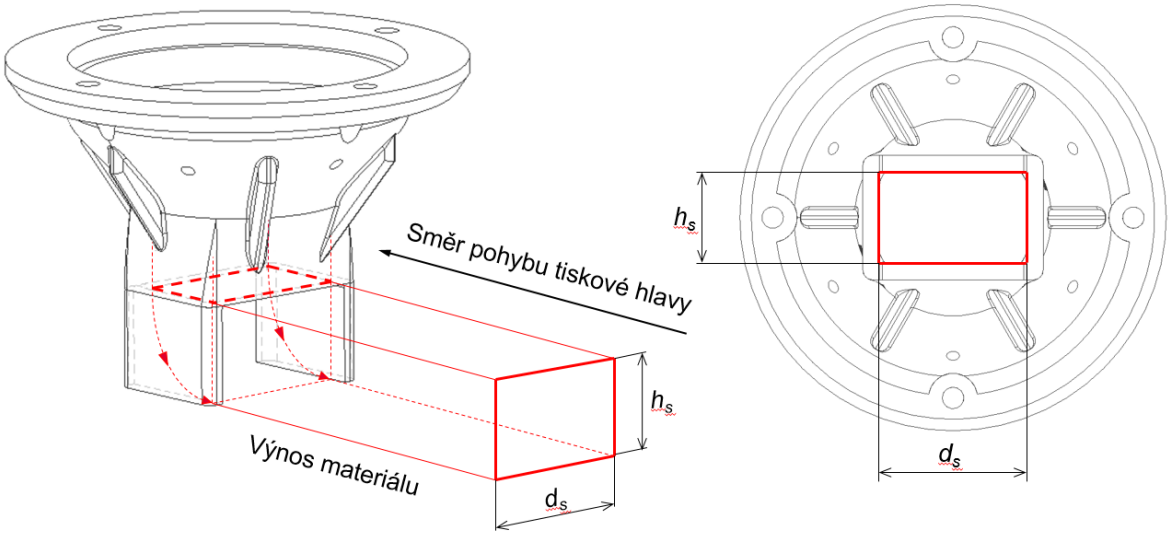
Obr. 5-29 Plastový prototyp natáčecího mechanismu

Plastový prototyp natáčecího mechanismu viz Obr. 5-29 byl poháněn krokovým motorem s přídržným momentem 0,5 N·m. Tento mechanismus byl pomocí vývojové desky Arduino uveden do provozu a byl sledován chod zařízení při různé rychlosti otáčení výstupní trysky. Z provedeného experimentu vyplynulo, že pro roztočení trysky (překonání třecích sil v těsnicím kontaktu) při nižších rychlostech by byl použitý krokový motor (0,5 N·m) dostatečným pohonem, avšak při rychlostech otáčení vyšších než cca 1 ot·s^{-1} docházelo k občasnému zasekávání chodu krokového motoru (pokles krouticího momentu při vyšších rychlostech otáčení). Na základě provedeného experimentu a odhadu velikosti sil vzniklých setrvačností tisknutého materiálu byl pro pohon natáčecího mechanismu zvolen krokový motor s přídržným momentem 1,1 N·m.

Geometrie trysky

V rámci návrhu konstrukce tiskové hlavy byla vytvořena geometrie základní řady trysek o šířce tisknuté stopy d_s = 40, 45 a 50 mm. Trysky byly navrženy s ohledem na poznatky získané v rešerši (vhodný tvar a poměr délek stran výstupní obdélníkové trysky d_s:h_s - 3:5) a s ohledem na rozměrové možnosti, způsob výroby a požadavky na těsnění kontaktu trysky a dílu zúžení pod ložisko.

Výstupní tryska má obdélníkový tvar a je opatřena hladicími segmenty z důvodu zlepšení stability a přesnosti výnosu. Obsah obdélníkového průřezu výstupních trysek 40 x 24 mm a 45 x 28 mm odpovídá obsahu průřezu kruhových trysek o průměrech 35 mm a 40 mm (trysky použité u měření krouticího momentu na testovacím zařízení). Důvodem použití stejného průřezu trysek je předpoklad stejného objemového průtoku materiálu tryskou (při současném zajištění spojitého výnosu) a tak možnost přibližné predikce rychlostí tisku. Objemové množství tisknutého materiálu tryskou o průměru 50 mm bylo vyšší než v zadání požadované (neočekává se tak rychlý tisk), z toho důvodu byla třetí tryska navržena s menším obsahem průřezu 50 x 30 mm. Výška vrstvy tisknutého objektu je určena kratší stranou obdélníkového průřezu trysky. Vlivem pohybu tiskové hlavy prostorem dochází k transformaci průřezu výnosu z roviny vodorovné (v trysce) do roviny svislé, o 90° otočené (ve výnosu) viz Obr. 5-30.



Obr. 5-30 Geometrie trysky

Tryska je vyrobena aditivním způsobem z plastu ABS, geometrie je navržena s ohledem na způsob výroby (možnost vyztužení žebry, složité tvarování). Z důvodu komplikovaného zajištění těsnosti uložení trysky je tento plastový díl považován za spotřební, v případě poškození trysky tisknutým materiálem nebo v případě průniku nečistot do uložení (vizuální kontrola indikačních kanálků) je doporučeno trysku vyměnit. Před připevněním nově zaběhlé trysky k natáčecímu mechanismu je vhodné namazat břit nerezového dílu zúžení pod ložisko plastickým mazivem z důvodu snížení tření v kontaktu s trysky a nerezového břitu.

5.3.5 Cenová rozvaha

V Tab. 5-7 jsou uvedeny náklady na nákup a výrobu jednotlivých dílů tiskové hlavy navrhované v této diplomové práci. Uvedené ceny odpovídají reálným výrobním nákladům vyjma dílů zúžení pod ložisko a ložiskové domky, ty byly vyrobeny aditivně (prototypovým způsobem) pomocí stroje SLM dostupného na fakultě. Ceny těchto dílů v uvedené tabulce odpovídají přibližným cenám konvenčního způsobu výroby daných dílů.

Tab. 5-7 Cenová rozvaha

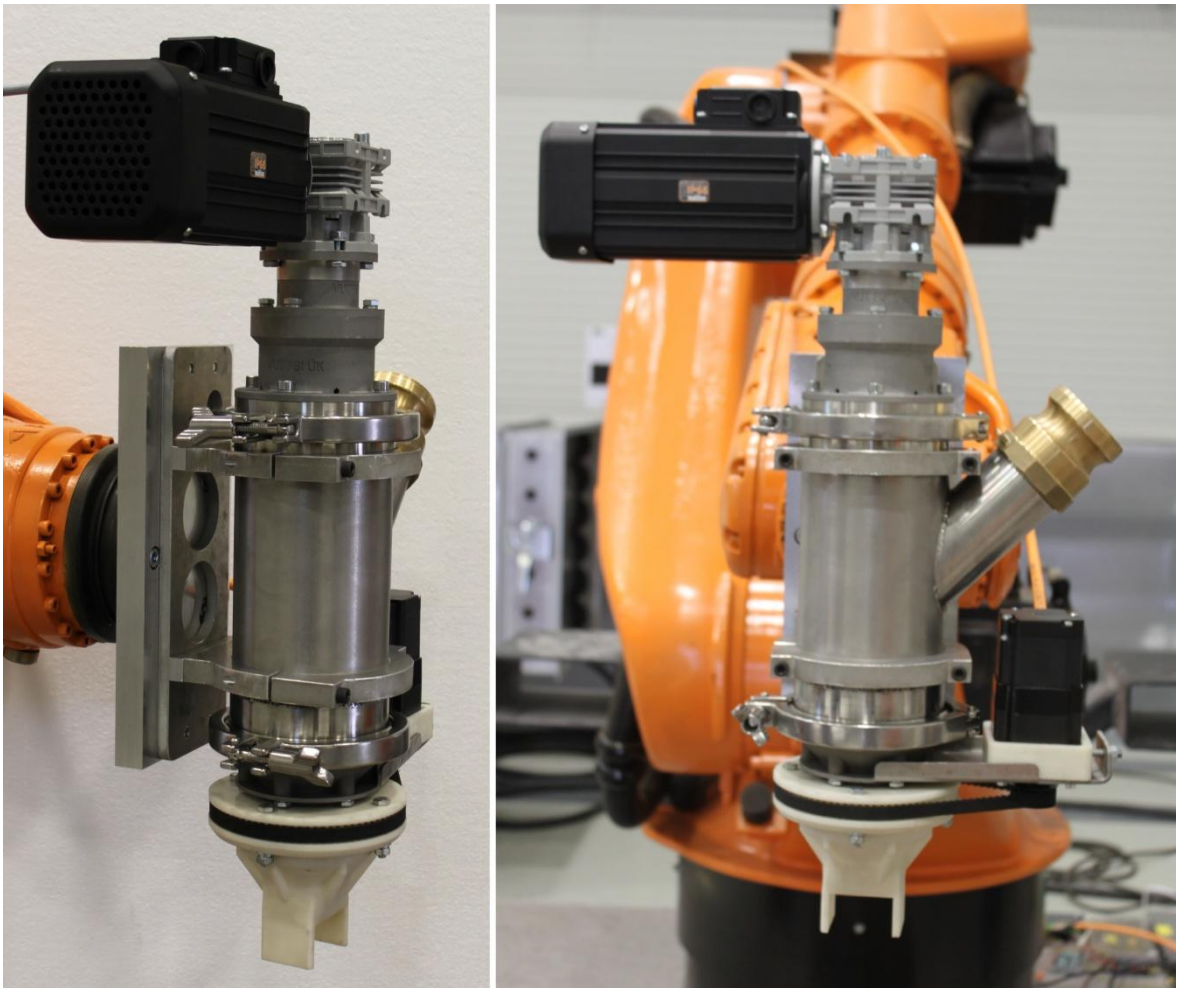
Podsestava	**Díl**	**Cena (Kč)**
Tělo tiskové hlavy	Svařenec těla	5380
	KAMLOK spojka	405
	Objímky + platforma	600
Podsestava uložení	Hřídel	4600
	Uložení - víko	2580
	Motor + převodovka	4987
	Ložiskové domky	2900
	Ložiska + těsnění	805
	Svařenec šnek	3550
Podsestava natáčení	Zúžení pod ložisko	3800
	Plech pod motor	150
	Krokový motor	1652
	Ložisko	116
	Řemenice + řemen	179
	3D tištěné díly - ABS	550
Spojovací materiál	CLAMP objímky + těsnění	830
	Šrouby, podložky, matice	250
Celkem	bez DPH	33334
	s DPH	40334

Celková cena navrženého zařízení bez elektroniky činí cca 40334 Kč s DPH.

5.4 Ověřovací experimenty

5.4.1 Kontrola hmotnosti vyrobeného zařízení

Tisková hlava byla po vyrobení jednotlivých dílů sestavena a připravena pro ověřovací experimenty. První měření mělo za úkol ověřit hmotnost vyrobeného zařízení a porovnat ji s predikcí z modelů. Naměřená hmotnost tiskové hlavy byla 16,41 kg, hmotnost tiskové hlavy vypočítaná z 3D modelu byla 16,36 kg, vzniklá chyba je cca 50 g a je považována za zanedbatelnou. Fotodokumentace sestavené tiskové hlavy viz Obr. 5-31.

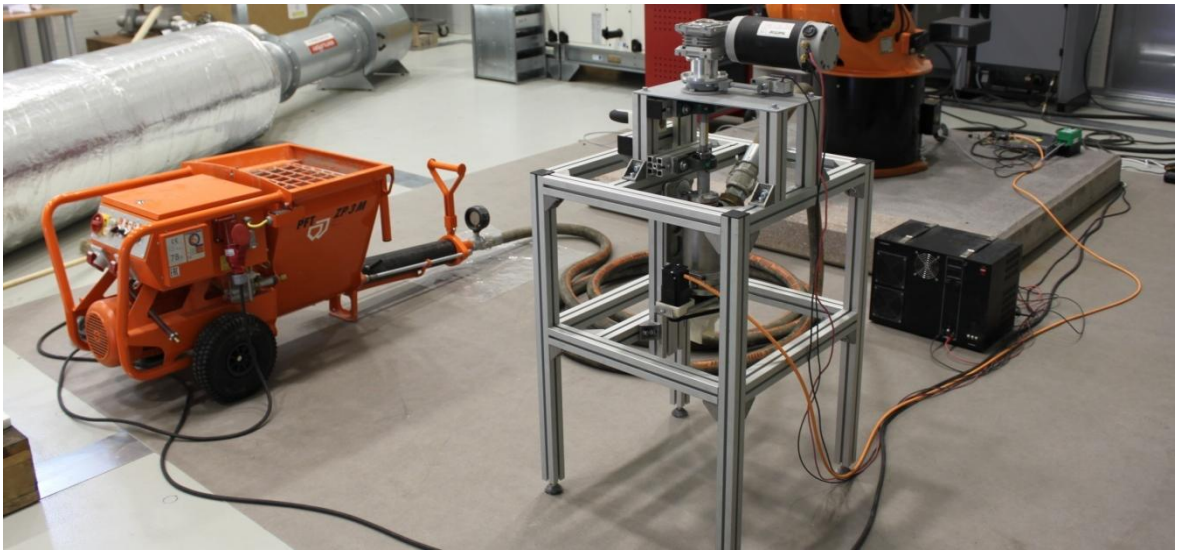


Obr. 5-31 Sestavená tisková hlava

Další ověřovací testy tiskové hlavy probíhaly na robotickém pracovišti areálu Admas, FAST VUT Brno, kde byly provedeny testy tiskové hlavy s betonovou směsí. Byly provedeny 3 hlavní experimenty s cílem ověřit požadované funkční parametry tiskové hlavy. Kompletní postup, okrajové podmínky a výsledky měření viz Příloha 3 - Laboratorní protokol č. 3.

5.4.2 Ověření možností dopravovaného množství materiálu

První ověřovací experiment měl za úkol ověřit schopnost tiskové hlavy extrudovat množství materiálu požadované ze zadání diplomové práce (0,5–2 $m^3 \cdot h^{-1}$). Měření probíhalo s využitím testovacího zařízení viz Obr. 5-32, podobně jako při průtokových testech tiskové hlavy BP. Nejprve bylo nastaveno na čerpadle požadované množství tisknutého materiálu (minimum nebo maximum požadovaného intervalu) a poté k tomuto průtoku bylo hledáno vhodné nastavení tiskové hlavy. Přesný postup získávání provozních nastavení tiskové hlavy viz Příloha 3. Tisková hlava vykazovala dostatečně široký interval nastavení rychlosti otáčení šneku tiskové hlavy, možnost tisku množství dopravovaného materiálu na horní hranici požadovaného intervalu 2 $m^3 \cdot h^{-1}$ bylo úspěšně ověřeno a byly zaznamenány příslušná provozní nastavení tiskové hlavy. Provozní nastavení tiskové hlavy pro dopravované množství materiálu na dolní hranici intervalu získáno nebylo z důvodu omezených možností dopravy tisknuté směsi čerpadlem. Minimální množství materiálu, které čerpadlo reálně dopravovalo odpovídalo cca 0,7 $m^3 \cdot h^{-1}$, z toho důvodu bylo získáno provozní nastavení pro tuto hodnotu dopravovaného množství materiálu.



Obr. 5-32 Testovací zařízení - finální testy

5.4.3 Test natáčecího mechanismu

Funkčnost natáčecího mechanismu byla ověřována tak, že na čerpadle a tiskové hlavě byly nastavena provozní parametry odpovídající dopravovanému množství materiálu 2 $m^3 \cdot h^{-1}$. Následně byla tiskovou hlavou protlačována betonová směs a byl pozorován chod natáčecího mechanismu při různých otáčkách výstupní trysky. Rychlost otáčení výstupní trysky byla regulována pomocí vývojové desky Arduino (tlačítka + potenciometr) v rozsahu otáčení (0–2 s^{-1}). Natáčecí mechanismus vykazoval plynulý chod na celém testovaném intervalu, nedocházelo k jeho zasekávání ani k vytékání nečistot z indikačních kanálků, což nasvědčuje o dobré těsnosti uložení.

5.4.4 Tisk reálného testovacího objektu

Posledním ověřovacím experimentem byl tisk reálného objektu - dutého objektu válcovitého tvaru, tento objekt byl zvolen z důvodu možnosti snadné synchronizace pohybu robotického ramene KUKA KR 30 HA a natáčení trysky nastavením konstantní rychlosti otáčení výstupní trysky využitím Arduina (jednoduché řízení pomocí tlačítek a potenciometru bez nutnosti softwarové synchronizace robot - natáčení). Otáčky šneku tiskové hlavy byly regulovány pomocí frekvenčního měniče Commander C200. Před tiskem samotného objektu bylo na testovacím zařízení odladěno provozní nastavení tiskové hlavy a čerpadla vhodné pro trysku 45 x 28 mm (podle kritéria spojitosti výnosu) odpovídající rychlosti extruze 1,7 $m^3 \cdot h^{-1}$ (k této hodnotě byla dopočítána teoretická rychlost pohybu polohovacího zařízení).

Obr. 5-33 Tisk reálného testovacího objektu

Tisk objektu probíhal v několika iteracích, kdy byly na základě vizuální kontroly tisku (přetékání vrstev - extruze většího množství materiálu) lehce upravována provozní nastavení čerpadla a byl pozorován počet nanesených vrstev do selhání stability tisknutého objektu. Po dokončení tisku (vyprázdnění zásobníku čerpadla) byla vytištěná směs nabrána do nádob a vrácena zpět do zásobníku čerpadla tak, aby mohl být postup zopakován.

Obr. 5-34 Přetékání vrstev (vlevo), odladěný tisk (vpravo)

Finální vytištěný objekt se skládal ze sedmi vrstev materiálu, pro tisk byl použit materiál viz Tab. 4-1. Tisková hlava vykazovala po celou dobu tisku plynulý chod, nebylo pozorováno zasekávání kameniva ve spáře mezi šnekem a tělem tiskové hlavy. Z indikačních kanálků ve velkém ložiskovém domku ani ve výstupní trysce nebylo pozorováno vytékání nečistot, což potvrzuje dobrou těsnost tiskové hlavy.

Obr. 5-35 Finální vytištěný objekt

6 DISKUZE

Tato diplomová práce se zabývala vývojem aktivní tiskové hlavy se šnekovým pohonem a implementovaným systémem natáčení trysky určené pro kontinuální 3D tisk betonových směsí. Práce navazuje na moji bakalářskou práci, ve které byla představena první verze konstrukce aktivní tiskové hlavy, která byla později vyrobena a v rámci diplomové práce byla použita pro měření. Poznatky nabyté při měřeních byly využity pro návrh nové konstrukce tiskové hlavy. Při návrhu nové tiskové hlavy byl kladen důraz na snižování její hmotnosti při současném zachování požadovaných funkčních a provozních parametrů.

Obecně lze principy funkce tiskových hlav pro 3D tisku betonových směsí rozdělit do dvou skupin na pasivní a aktivní tiskové hlavy. Uspořádání hlavních celků tiskové hlavy představené v rámci koncepčního řešení této práce navazuje na rozvržení použité v BP a jedná se o aktivní tiskovou hlavu s vertikálně, letmo uloženým šnekem. Tato koncepce nabízí řadu výhod, mezi něž patří možnost tisku materiálů s obsahem částic o větší frakci, přesnější řízení extruze materiálu – například v místech rohů (zpomalování), možnost přesného přerušování tisku (retrakce materiálu) při přejezdech tiskové hlavy volným prostorem nebo v případě uzpůsobení konstrukce (zajištění dostatečného promísení směsi) i možnost lokální aplikace aditiv přímo do tiskové hlavy.

Tisková hlava se skládá ze tří hlavních celků (tělo tiskové hlavy, uložení šneku a natáčecí mechanismus) spojených pomocí CLAMP objímek. CLAMP objímky umožňují rychlou a snadnou rozebíratelnost jednotlivých celků a tím usnadňují proces čištění tiskové hlavy po ukončení tisku. V případě použití tiskové hlavy v sériové výrobě velkorozměrových dílů do stavebnictví se předpokládá, že tisková hlava bude zabudována do většího stroje (například rámová polohovací konstrukce) s již implementovaným systémem vysokotlakého čištění tiskové hlavy. V okamžiku přerušení tisku zajede tisková hlava do výchozí pozice stroje a bude automaticky očištěna. Při použití tiskové hlavy na robotickém pracovišti – v kusové výrobě, případně pro účely výzkumu, je však situace jiná (automatické vysokotlaké čisticí pracoviště není k dispozici) a je důležité, aby bylo možné tiskovou hlavu v případě potřeby rychle rozebrat a vyčistit. Díky využití CLAMP objímek je možné tiskovou hlavu za několik minut rozebrat, vyčistit a znovu smontovat, čímž je možné předejít zatuhnutí materiálu v hadici, kterou je materiál dopravován od čerpadla.

Při návrhu uložení šneku tiskové hlavy byla snaha tiskovou hlavu navrhnout jako co možná nejuniverzálnější. Z toho důvodu byla pro uložení hřídele zvolena velikostně předimenzovaná ložiska (stejná jako v BP), která v případě požadavku na tisk materiálu se značně horší reologií (nedostatečný výkon pohonu šneku) umožní pouze výměnu hřídele a pohonu tiskové hlavy namísto výroby celého uložení. Univerzálnost tiskové hlavy lze vidět i v možnosti úplného odstranění aktivního šnekového pohonu (uzavření tiskové hlavy komerčně dostupným CLAMP víkem, úspora hmotnosti) a použití tiskové hlavy v pasivním režimu.

Aby mohlo být provedeno dimenzování hlavních prvků tiskové hlavy, bylo nutné zjistit hlavní silové účinky působící v tiskové hlavě. Predikce těchto účinků (krouticí moment potřebný pro pohon šneku) v tiskové hlavě na základě reologie tisknutého materiálu byla shledána za velice obtížnou, z toho důvodu byl zvolen přístup měření silových účinků při reálném provozu tiskové hlavy BP. K tomu, aby taková měření mohla být realizována, bylo nutné zkonstruovat testovací zařízení, které umožňuje ustavení tiskové hlavy v prostoru, měření krouticího momentu potřebného pro pohon šneku a zároveň poskytuje informaci o provozních nastavení (otáčky šneku, nastavení zdroje) tiskové hlavy při extruzi materiálu. Takové zařízení bylo navrženo, vyrobeno, proběhlo ověření jeho funkce a následně samotná naplánovaná měření. Měření probíhala s využitím čerpadla na betonové směsi a tiskové hlavy navržené v rámci BP a měla za úkol simulovat řetězec zajišťující distribuci betonové směsi při 3D tisku, přičemž byl sledován chod tiskové hlavy, měřený krouticí moment a množství dopravovaného materiálu v závislosti na otáčkách šneku. Naměřená data z testovacího zařízení poskytla zásadní informace o krouticím momentu potřebném pro pohon tiskové hlavy, poukázala na problematická místa konstrukce (zasekávání kameniva ve spáře mezi šnekem a tělem tiskové hlavy) a poukázala na nepřesnosti výpočtu dopravovaného množství materiálu z BP.

Na základě získaných informací byl zahájen vývoj nové tiskové hlavy. Naměřené průtoky materiálu tiskovou hlavou byly podstatně větší než průtoky predikované výpočtem v BP, což umožnilo celkové zmenšení šneku a celé tiskové hlavy, při současném zachování požadované rychlosti extruze. Naměřené krouticí momenty v kombinaci s vhodnou volbou vůle mezi šnekem a tělem tiskové hlavy umožnily použití slabšího motoru a s tím související odlehčení dílů přenášejících krouticí moment. Dimenzování pláště tiskové hlavy probíhalo v několika iteracích, kdy byly pomocí MKP výpočtů ověřovány bezpečnosti konstrukce při použití různých polotovarů. Výše zmiňované kroky vedly k požadovanému snížení hmotnosti tiskové hlavy při volbě standardních materiálů.

Snížení hmotnosti tiskové hlavy umožnilo její použití na dostupném robotickém rameni KUKA (nosnost 30 kg), přičemž další vylehčování by ještě mohlo snížit nároky na nosnost robotického ramene (menší pohony – nižší cena) a rozšířit tak možnost použití tiskové hlavy. Bylo by však nutné zvážit, zda by nižší pořizovací cena polohovacího zařízení vyrovnala zvýšení ceny tiskové hlavy spojené s dalším odlehčováním. Dalšího odlehčování tiskové hlavy by bylo možné dosáhnout například volbou alternativních materiálů (kompozity, mechanicky odolné plasty – vysoká cena) nebo využitím automatických optimalizačních metod s cílem snížení hmotnosti při splnění určitého optimalizačního kritéria (to by vedlo na výrobu geometricky složitých součástí – vysoká cena).

Návrh natáčecího mechanismu a geometrie výstupní trysky byl inspirován poznatky získanými v rámci rešeršní části práce. Problematickým uzlem při řešení konstrukce mechanismu bylo těsnění kontaktu statického dílu a otáčející se trysky. Těsnění bylo vyřešeno použitím kombinace nerezového dílu "zúžení pod ložisko" a plastové trysky

(spotřební materiál), přičemž nerezový díl, opatřen těsnícím břitem, si při záběhu trysky (vyrobené s malým přesahem) vytvoří potřebný prostor pro rotaci trysky při současném zachování těsnosti uložení. Volba pohonu pro natáčecí mechanismus probíhala na základě experimentálního ověření funkčnosti plastového prototypu natáčecího mechanismu s využitím dostupného krokového motoru (pozorování chodu mechanismu při různých otáčkách trysky s použitým motorem).

Při volbě pohonu natáčecího mechanismu i pohonu šneku bylo nutné reflektovat prostředí, ve kterém by měly zvolené pohony pracovat. Využití tiskové hlavy na robotickém pracovišti Admas, by předpokládalo provoz tiskové hlavy v suchém, neprašném prostředí bez venkovních vlivů, avšak tisknutý materiál je po vynesení z tiskové hlavy nutné ošetřovat vodou tak, aby nedocházelo ke vzniku prasklin vlivem rychlého vysušení výnosu. Z toho důvodu se předpokládá, že v okolí stavby bude nutné uměle udržovat dostatečnou vlhkost. Ve chvíli, kdy by byla tisková hlava implementována do většího stroje, probíhal by tisk pravděpodobně v prostorách velkého stanu, kde by bylo udržováno stabilní mikroklima využitím zavlažovacího systému. Z toho důvodu bylo při výběru pohonů zvoleno krytí IP66, které zajistí bezpečný chod zařízení i ve zmiňovaných podmínkách.

Výroba navrženého zařízení probíhala částečně ve spolupráci s průmyslovým partnerem VIAALTA a částečně využitím prostředků dostupných na Ústavu konstruování. Většina dílů byla vyrobena konvenčním obráběním, vybrané díly pak z důvodu časové úspory a možnosti využití aditivního designu (částečná úspora hmotnosti) 3D tiskem kovu (SLM) a plastu (FDM). Předpokládá se, že v případě výroby dalších tiskových hlav by byly díly vyrobené metodou SLM nahrazeny za díly konvenčně vyráběné (levnější). Ceny uvedené v Tab. 5-7 odpovídají cenám dílů vyrobených konvenčním způsobem.

Při využití tiskové hlavy na robotickém rameni bylo nutné počítat i s hmotností hadice přivádějící směs od čerpadla. Vzhledem k tomu, že navržená tisková hlava naplněná tisknutým materiálem by měla vážit maximálně 21,2 kg, nepředpokládalo se překročení nosnosti robotického ramene při jeho přídavném zatížení hadicí. Hadice byla k tiskové hlavě přiváděna přes robotické rameno tak, aby došlo k co nejlepšímu rozložení silového působení hmotnosti hadice přes celé tělo robotického ramene. Udávaná nosnost robota (30 kg) je uvažována při plném vyložení ramene a při maximální rychlosti pohybu, přičemž ověřovací tisk probíhal cca při polovičním vyložení a při nízkých rychlostech pohybu (do 350 $mm \cdot s^{-1}$).

Ověřovací experimenty proběhly na robotickém rameni dle plánu, kdy byla ověřována zejména provozuschopnost zařízení a možnosti rozsahu jeho řízení. Tisková hlava splňuje všechny parametry požadované ze zadání a jako zásadní pro budoucí použití tiskové hlavy se jeví zejména nutnost synchronizace pohonu čerpadla tiskové hlavy a robotického ramene.

7 ZÁVĚR

V rámci diplomové práce byla navržena, vyrobena a otestována konstrukce tiskové hlavy určené pro kontinuální 3D tisk betonových směsí, čímž byly všechny hlavní i dílčí cíle práce splněny. Na navrhovanou konstrukci byla kladena řada požadavků, které byly při řešení práce reflektovány.

V rešeršní části práce byl zpracován přehled tiskových hlav a možných přístupů k tvarování betonových směsí. Cíle diplomové práce vycházely částečně z požadavků na úpravu a vylepšení tiskové hlavy navržené v rámci BP a částečně z nových informací o tvarování výnosu získaných z rešerše. Práce koncepčně navazuje na bakalářskou práci, v rámci koncepčního řešení bylo nastíněno rozvržení důležitých prvků tiskové hlavy a byla představena možná řešení natáčecího mechanismu. Vybraná koncepční řešení byla dále na základě provedených měření s tiskovou hlavou BP rozpracována do podoby konstrukce nové tiskové hlavy.

Výsledkem diplomové práce je vyrobené zařízení o rozměrech 415 x 578 x 145 mm. Hmotnost tiskové hlavy navržené v rámci BP činila 23,4, hmotnost nově navržené tiskové hlavy s implementovaným systémem natáčení trysky je 16,4 kg, došlo tedy k redukci hmotnosti cca o 30 %, což splňuje hodnotu požadovanou ze zadání. Hmotnost tiskové hlavy i s tisknutým materiálem je maximálně 21,2 kg, což nepřekračuje limit nosnosti robotického ramene KUKA (30 kg) využitého pro ověřovací experimenty. Na základě provedených experimentů s navrženou tiskovou hlavou byla potvrzena funkčnost celého zařízení a ověřena možnost regulace rychlosti extruze materiálu 0,5–2 $m^3 \cdot h^{-1}$, jediným omezením v dosažení spodní hranice intervalu bylo minimální množství materiálu podávaného čerpadlem, které činilo 0,7 $m^3 \cdot h^{-1}$. Testy probíhaly se směsí bez urychlovače tuhnutí z důvodu prodloužení zpracovatelnosti směsi. Část testů probíhala na testovacím zařízení s cílem stanovit vhodná provozní nastavení a ověřit funkci dílčích celků tiskové hlavy a zbylá část ověřovacích experimentů probíhala s využitím robotického ramene a ověřovala se funkce celého navrženého zařízení při tisku reálného objektu. Tisková hlava splňovala všechny provozní požadavky ze zadání a po celou dobu tisku vykazovala plynulý a bezproblémový chod.

Práce se věnovala návrhu a realizací mechanické části řetězce zajišťujícího dopravu a tvarování betonových směsí a předpokládá se použití navržené tiskové hlavy v rámci většího zařízení určeného pro velkorozměrový 3D tisk objektů do stavebnictví. Další vývoj navrženého zařízení by mohl směřovat směrem k optimalizaci provozních nastavení tiskové hlavy a synchronizaci jednotlivých pohonů tiskové hlavy, čerpadla a polohovacího zařízení (cílené řízení celého stroje na základě vstupní geometrie) . Tato synchronizace se při provedených testech jevila jako zásadní pro dosažení kvalitního tisku, avšak je nad rámec možností řešení diplomové práce.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

[1] BLAAKMEER, Jan. *Weber is sponsoring a research project in 3D-printing at TU Eindhoven, The Netherlands | Weber Global*. 2015 [vid. 21. březen 2019]. Dostupné z: https://wecare.weber/weber-sponsoring-research-project-3d-printing-tu-eindhoven-netherlands

[2] CHEN, Danfang, Steffen HEYER, Suphunnika IBBOTSON, Konstantinos SALONITIS a STEINGRÍMSSON. Direct digital manufacturing: Definition, evolution, and sustainability implications. *Journal of Cleaner Production*. 2015.

[3] LEAL DE SILVA, Wilson Ricardo. *3D Concrete Printing - Technological issues in concrete mix design and extrusion*. 2017 [vid. 20. březen 2019]. Dostupné z: https://www.dti.dk/projects/3d-printed-buildings/36993

[4] COBOD INTERNATIONAL A/S. *BOD2 Specifications - COBOD*. 2019 [vid. 21. březen 2019]. Dostupné z: http://cobod.com/bod2-specifications/

[5] ZHANG, Jing a Behrokh KHOSHNEVIS. Optimal machine operation planning for construction by Contour Crafting. *Automation in Construction*. 2013, roč. 29, s. 50–67. ISSN 09265805.

[6] 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*. 2016, roč. 11, č. 3, s. 209–225 [vid. 21. březen 2019]. ISSN 1745-2759.

[7] MALAEB, Zeina, Adel TOURBAH a Farook HAMZEH. 3D Concrete Printing : Machine and Mix Design 3D CONCRETE PRINTING : MACHINE AND MIX DESIGN. 2015, č. June.

[8] HWANG, Dooil a Behrokh KHOSHNEVIS. CONCRETE WALL FABRICATION BY CONTOUR CRAFTING Dooil Hwang and Behrokh Khoshnevis. *ISARC 2004 21st International Symposium on Automation and Robotics in Construction*. 2004.

[9] HENKE, Klaudius. *3D Printing in concrete - TUM*. 2017 [vid. 21. březen 2019]. Dostupné z: https://www.tum.de/en/about-tum/news/press-releases/detail/article/34334/

[10] CAMILLERI, Francesca, Nadia DOUKHI, Alvaro LOPEZ RODRIGUEZ a Roman STRUKOV. *Fossilized by Amalgamma*. 2015 [vid. 22. březen 2019]. Dostupné z: https://issuu.com/amalgamma/docs/amalgamma_portfolio

[11] ZUZA MIKOLAS. *Vše o tryskách s různým průměrem - Josef Prusa - 3D tisk a tiskárny Josef Prusa – 3D tisk a tiskárny*. 2018 [vid. 23. březen 2019]. Dostupné z: https://josefprusa.cz/vse-o-tryskach-s-ruznym-prumerem/

[12] NADARAJAH, Nithesh. *Development of concrete 3D printing*. B.m., 2018. Aalto University.

[13] XU, Jie a Lieyun DING. Volume - forming 3D concrete printing using a variable - diameter square nozzle. 2018, č. December, s. 104–113.

[14] NERELLA, Venkatesh Naidu, Martin KRAUSE a Viktor MECHTCHERINE. Direct printing test for buildability of 3D-printable concrete considering economic viability. *Automation in Construction*. 2020, roč. 109, č. August 2018, s. 102986.

ISSN 09265805.

[15] KHOSHNEVIS, Behrokh. *Dr. Behrokh Khoshnevis*. 2019 [vid. 23. březen 2019]. Dostupné z: http://www.bkhoshnevis.com/

[16] NYLUND, J.; JÄRF, A.; KEKÄLE, K.; RÖNNSKOG, J.; AL-NESHAWY, F.; KIVILUOMA, P. & KUOSMANEN, P. Implementation of a contour crafting system to a 3-dimensional concrete printer. *10th International DAAAM Baltic Conference*. 2015, č. May.

[17] HAMBACH, Manuel a Dirk VOLKMER. Properties of 3D-printed fiber-reinforced Portland cement paste. *Cement and Concrete Composites*. 2017, roč. 79, s. 62–70. ISSN 09589465.

[18] BOS, Freek P., Zeeshan Y. AHMED, Evgeniy R. JUTINOV a Theo A.M. SALET. Experimental exploration of metal cable as reinforcement in 3D printed concrete. *Materials*. 2017, roč. 10, č. 11. ISSN 19961944.

[19] LIM, Jian Hui, Biranchi PANDA a Quang Cuong PHAM. Improving flexural characteristics of 3D printed geopolymer composites with in-process steel cable reinforcement. *Construction and Building Materials*. 2018, roč. 178, s. 32–41. ISSN 09500618.

[20] MA, Guowei, Zhijian LI, Li WANG a Gang BAI. Micro-cable reinforced geopolymer composite for extrusion-based 3D printing. *Materials Letters*. 2019, roč. 235, s. 144–147. ISSN 18734979.

[21] PAUL, Suvash Chandra, Gideon P.A.G. VAN ZIJL a Ian GIBSON. A review of 3D concrete printing systems and materials properties: current status and future research prospects. *Rapid Prototyping Journal*. 2018, roč. 24, č. 4, s. 784–798. ISSN 13552546.

[22] APIS COR, we print buildings. *Apis Cor robotics in construction*. 2019 [vid. 24. březen 2019]. Dostupné z: https://www.apis-cor.com/

[23] 3D PRINTING NEWS. *BetAbram to release 3D house printer for €12,000 in July*. 2014 [vid. 24. březen 2019]. Dostupné z: https://www.3ders.org/articles/20140526-betabram-to-release-3d-house-printer-in-july-august-2014.html

[24] ZAGANELLI VIALE, Massa Lombarda. *Giant 3d printer | BigDelta WASP 12MT Stampanti 3D | WASP*. 2019 [vid. 24. březen 2019]. Dostupné z: https://www.3dwasp.com/en/giant-3d-printer-bigdelta-wasp-12mt/

[25] PFT WALES. *PFT Zp3M Plastering Pump - Conveying pump or renders PFT Wales uk*. 2019 [vid. 7. červen 2019]. Dostupné z: https://www.pftplasteringmachines.com/product/pft-zp3m-conveying-pump/

[26] TONSTAV SERVICE. *BRINKMANN, EstrichBoy FE 400*. 2018 [vid. 7. červen 2019]. Dostupné z: http://www.brinkmann.cz/pumpy-na-lite-podlahy/estrichboy-fe-400-novinka/

[27] CIFA. *Stacionární čerpadla betonu – betonářská technika CIFA*. 2019 [vid. 7. červen 2019]. Dostupné z: https://www.cifa.cz/betonarska-technika/stacionarni-cerpadla-betonu/

[28] TONSTAV SERVICE. *Dopravní hadice, trubky - e-shop TONSTAV-SERVICE s.r.o.* 2019 [vid. 7. červen 2019]. Dostupné z: https://www.tonstav-shop.cz/stavebni-technika/pumpy-na-beton/prislusenstvi-pump-na-beton/dopravni-hadice-trubky-

c187818919854081

[29] KONEKT HADICE A PRYŽ. *Rychlospojky Kamlok (mosaz) | Konekt-HK*. [vid. 7. červen 2019]. Dostupné z: http://www.konekt-hk.cz/rychlospojky-kamlok-mosaz-809/

[30] HELA, Rudolf. *Technologie betonu I* . Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. 2005, s. 110.

[31] DUSÍKOVÁ, M. *BETON - Příručka technologa*. Českomoravský beton, a.s. 2005, s. 16–19.

[32] PEŘINA, Tomáš. *VLIV KOLÍSÁNÍ SLOŽENÍ CEMENTŮ NA VZNIK BLEEDINGU A ZPRACOVATELNOSTI MALT V ČASE*. B.m., nedatováno. VUT Brno.

[33] HOLUBOVÁ, Renata. *ZÁKLADY REOLOGIE A REOMETRIE KAPALIN*. 2014. ISBN 9788024441788.

[34] HEGROVÁ, Michaela. *REOLOGICKÉ VLASTNOSTI STAVEBNÍCH POJIV V ČERSTVÉM STAVU*. B.m., nedatováno. b.n.

[35] AUSTIN, S. A., S. LIM, A. BUSHWELL, A.G. GIBB a T. THORPE. *Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete*. 2012.

[36] SLAVÍČEK, J. *Konstrukce tiskové hlavy pro 3D tisk velkorozměrových dílů z betonové směsi*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 2018, č. 74 s. vedoucí bakalářské práce doc. Ing. David Paloušek Ph.D.

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

Použité zkratky:

ABS	akrylonitrilbutaduienstyren
BP	bakalářská práce
ČVUT	České vysoké učení technické v Praze
DP	diplomová práce
FDM	fused deposition modeling
MKP	metoda konečných prvků
MSP	mezní stav pružnosti
SLM	selective laser melting
3DCP	3D tisk betonových směsí

Použité veličiny:

F_{snimac}	N	síla na snímači
M_{klic}	N·m	maximální naměřený moment
r_{paka}	mm	délka přepákování na snímač
V_m	m^3	naměřený objem materiálu
d_v	m	šířka výnosu
h_v	m	výška výnosu
l_v	m	délka výnosu
v_p	$m \cdot s^{-1}$	rychlost pohybu polohovacího zařízení
t_m	s	časový interval měření objemu materiálu
$V_{ú}$	m^3	účinný objem šneku
$d_š$	m	vnější průměr šneku
$s_š$	m	stoupání šneku
$V_{hš}$	m^3	objem hřídele a šnekovnice na jednu otáčku šneku

$n_{š}$	h^{-1}	otáčky šneku
Q_h	$m^3 \cdot h^{-1}$	množství dopravovaného materiálu
τ_k	MPa	mez kluzu ve smyku
σ_k	MPa	mez kluzu
W_k	mm^3	modul průřezu v krutu
M_k	N·m	kroutící moment
d	m	průměr hřídele
$\alpha_{\tau 1}$	[-]	součinitel tvaru pro osazení
$\alpha_{\tau 2}$	[-]	součinitel tvaru pro drážku
$\tau_{\max 1}$	MPa	napětí v místě osazení
$\tau_{\max 2}$	MPa	napětí v místě drážky pro pero
k_{k_1}	[-]	bezpečnost v místě osazení k MSP
k_{k_2}	[-]	bezpečnost v místě drážky pro pero k MSP
F	N	obvodová síla na povrchu hřídele
M_k	N·m	kroutící moment
p_D	MPa	dovolený tlak na bocích drážky
p_0	MPa	základní hodnota tlaku
t_1	mm	zasunutí pera do náboje převodovky
l	mm	délka pera
b	mm	šířka pera
l_t	mm	délka trajektorie pohybu polohovacího zařízení
r_t	mm	poloměr zaoblení trajektorie
t_t	s	doba průjezdu trajektorie (jedné vrstvy)
ω_t	$rad \cdot s^{-1}$	úhlová rychlost natáčení trysky
φ_t	rad	úhel natočení (plný kruh = 2π)
i	-	převodový poměr řemenového převodu
n_1	$ot \cdot min^{-1}$	rychlost otáčení výstupní hřídele (menší řemen. kolo)
n_2	$ot \cdot min^{-1}$	rychlost otáčení trysky (větší řemenové kolo)
d_1	mm	roztečný průměr menšího řemenového kola

d_2	mm	roztečný průměr většího řemenového kola
A	mm	vzdálenost os řemenových kol
$Lp´$	mm	teoretická délka řemene
α	°	úhel alfa
γ	°	úhel gama

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 1-1 3D tisk betonových směsí TU Eindhoven [1] 13

Obr. 2-1 Schéma zařízení realizujících 3DCMP (upraveno) [3] 14

Obr. 2-2 Pasivní tisková hlava (upraveno) [6] 15

Obr. 2-3 Aktivní tisková hlava s pístovým pohonem - Ing. Arnošt Vespalec 16

Obr. 2-4 Aktivní tisková hlava s pístovým pohonem CC (upraveno) [8] 17

Obr. 2-5 Tisková hlava se šnekovým pohonem TUM [9] 18

Obr. 2-6 Tisková hlava technologie Amalgamma (upraveno) [9] 19

Obr. 2-7 Aktivní tisková hlava se šnekovým pohonem COBOD (upraveno) [4] 19

Obr. 2-8 Rozlišení vs. rychlost tisku (upraveno) [12] 20

Obr. 2-9 Výnosy pro trysky, (a) 10 mm; (b) 15 mm; (c) 20 mm; (d) 24 mm [13] 21

Obr. 2-10 Vystavitelnost betonových směsí Nerella a spol. 22

Obr. 2-11 Tvary trysek, natáčení trysky (upraveno) [3, 4] 23

Obr. 2-12 Contour Crafting - Aalto University (upraveno) [16] 24

Obr. 2-13 Tisková hlava metoda Contour Crafting (upraveno) [5] 24

Obr. 2-14 Podavač ocelového lanka [19, 20] 25

Obr. 2-15 Výsuvné otočné rameno Apis Cor (upraveno) [22] 26

Obr. 2-16 Rámová konstrukce - vlevo COBOD [4], vpravo TU Eindhoven [6] 27

Obr. 2-17 Portálová konstrukce - vlevo Bet Abram [23], vpravo CC [5] 27

Obr. 2-18 BigDelta společnosti WASP (upraveno) [24] 28

Obr. 2-19 Elektrické šnekové čerpadlo (vpravo) [25], dieselové (vlevo) [26] 29

Obr. 2-20 Pístové čerpadlo na beton CIFA [27] 30

Obr. 2-21 Hadice pro dopravu betonu [28], spojky KAMLOK [29] 30

Obr. 2-22 Složení betonových směsí 31

Obr. 2-23 Tokové a viskózní charakteristiky kapalin 34

Obr. 2-24 Vystavitelnost - a) vrstvení výnosů, b) zborcená stavba [14] 36

Obr. 4-1 Myšlenková mapa řešení DP 40

Obr. 4-2 Tisková hlava BP 41

Obr. 4-3 Koncepční uspořádání celku tiskové hlavy 42

Obr. 4-4 Varianta s jedním ložiskem ... 43
Obr. 4-5 Varianta s dvojicí ložisek ... 44
Obr. 5-1 Parametry ovlivňující konstrukci ... 45
Obr. 5-2 Hlavní silové účinky působící v tiskové hlavě ... 46
Obr. 5-3 Varianta testovacího zařízení č. 1 ... 47
Obr. 5-4 Varianta testovacího zařízení č. 2 ... 48
Obr. 5-5 Test s momentovým klíčem ... 49
Obr. 5-6 Plnění tiskové hlavy ... 50
Obr. 5-7 Testovací zařízení ... 51
Obr. 5-8 Statická a modální analýza rámu ... 52
Obr. 5-9 Nástavba zařízení s uložením a snímači ... 53
Obr. 5-10 Umístění snímačů na testovacím zařízení ... 55
Obr. 5-11 Kalibrace testovacího zařízení ... 56
Obr. 5-12 Měřicí systém - měření Mk ... 57
Obr. 5-13 Spojitý výnos (vlevo) a nespojitý výnos (vpravo) ... 58
Obr. 5-14 Grafy síly na snímači ... 60
Obr. 5-15 Hlavní sestava tiskové hlavy ... 63
Obr. 5-16 Rozpad tiskové hlavy na montážní celky ... 64
Obr. 5-17 Tělo tiskové hlavy ... 65
Obr. 5-18 Zjednodušení MKP modelu ... 66
Obr. 5-19 Kvalita meshe MKP tiskové hlavy ... 67
Obr. 5-20 Deformace tiskové hlavy ... 68
Obr. 5-21 Zatěžování tiskové hlavy ... 68
Obr. 5-22 Napětí (Equivalent von-Mises Stress) ... 69
Obr. 5-23 Uložení šneku ... 70
Obr. 5-24 Uložení hřídel ... 74
Obr. 5-25 Hřídel ... 75
Obr. 5-26 Natáčecí mechanismus ... 77
Obr. 5-27 Natáčecí mechanismus řez ... 78
Obr. 5-28 Možnosti tvarování výnosu ... 79

Obr. 5-29 Plastový prototyp natáčecího mechanismu 82
Obr. 5-30 Geometrie trysky..... 83
Obr. 5-31 Sestavená tisková hlava 85
Obr. 5-32 Testovací zařízení - finální testy..... 86
Obr. 5-33 Tisk reálného testovacího objektu 87
Obr. 5-34 Přetékání vrstev (vlevo), odladěný tisk (vpravo) 88
Obr. 5-35 Finální vytištěný objekt..... 88

11 SEZNAM TABULEK

Tab. 2-1 Procesní parametry 21

Tab. 2-2 Frakce kameniva 32

Tab. 2-3 Reologie cementových směsí [34] 34

Tab. 4-1 Složení tisknuté směsi 41

Tab. 5-1 Kalibrace tenzometrického snímače na testovacím zařízení 55

Tab. 5-2 Poměr přísad směsi na 100 kg 59

Tab. 5-3 Nastavení tiskové hlavy, průtok, krouticí moment - Směs bez urychlovače 60

Tab. 5-4 Rychlosti tisku 62

Tab. 5-5 Výpočet dopravovaného množství 71

Tab. 5-6 Parametry zvoleného pohonu 73

Tab. 5-7 Cenová rozvaha 84

12 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 - Laboratorní protokol č. 1

Příloha 2 - Laboratorní protokol č. 2

Příloha 3 - Laboratorní protokol č. 3

Příloha 4 - Rendery

Příloha 5 - Fotodokumentace

Externí přílohy:

Příloha 6 - Výkres sestavení

Laboratorní protokol č. 1:

Měření krouticího momentu momentovým klíčem

Vypracoval: Jakub Slavíček

Datum měření: 29. 5. 2019

ÚVOD

Potřeba snížení hmotnosti stávajícího řešení testované tiskové hlavy vede k nutnosti zjištění sil působících v rámci této hlavy. Dominantním silovým účinkem v tiskové hlavě je krouticí moment potřebný k protočení šnekovnice uvnitř těla hlavy naplněné danou betonovou směsí. Předmětem tohoto protokolu je měření přibližných hodnot zmiňovaného krouticího momentu, na základě kterých bude dimenzováno testovací zařízení, na kterém budou později realizovány důkladnější měření a testy tiskové hlavy.

POUŽITÉ VYBAVENÍ

Měření bylo provedeno na tiskové hlavě navržené v rámci mé bakalářské práce. Jedinou úpravou této tiskové hlavy byla demontáž motoru se šnekovou převodovkou nutná z důvodu nahrazení pohonu motorem za pohon momentovým klíčem. Stabilní poloha tiskové hlavy byla zajištěna použitím rámu testovacího zařízení navrženého pro tyto účely. K převedení momentu z momentového klíče na výstupní hřídel tiskové hlavy byla navržena a vyrobena plastová redukce. Pro měření byly využity momentové klíče s rozsahem 1-25 N·m a 30-100 N·m. K měření hmotnosti jednotlivých složek byly využity dvě laboratorní váhy, jedna s rozsahem 0-120 kg a druhá s rozsahem 0-0,5 kg.

Obr. 1 Použité vybavení

POSTUP MĚŘENÍ

Tento protokol se zabývá měřením krouticího momentu potřebného k protočení šnekovnice uvnitř těla tiskové hlavy naplněné tisknutým materiálem. Měření probíhalo tak, že v prvním kroku došlo k demontáži uložení šnekovnice a ložiskových domků a tělo tiskové hlavy bylo naplněno příslušnou směsí. Ústí trysky bylo při plnění tiskové hlavy uzavřeno pomocí víčka. Dále bylo uložení se šnekovnicí zasunuto do čerstvé směsi uvnitř těla hlavy a poloha uložení byla zajištěna trojicí šroubů. V dalším kroku již následovalo odejmutí krycího víčka a samotné měření krouticího momentu momentovým klíčem.

Měření probíhalo tak, že na momentový klíč byla nastavena malá hodnota krouticího momentu např. 2 N·m a na momentový klíč byla vyvinuta síla, která měla roztočit šnekovnice. Pokud došlo ke „cvaknutí“ v momentovém klíči, pak je moment k protočení šnekovnice vyšší a je nutné ho korigovat. Poté byla na momentovém klíči nastavena vyšší hodnota a postup byl zopakován. K opakování tohoto postupu docházelo až do doby, kdy bylo momentovým klíčem točeno, aniž by došlo ke „cvaknutí“. První nastavená hodnota, při níž nedošlo ke „cvaknutí“ v klíči, je hledaná hodnota krouticího momentu.

PODMÍNKY MĚŘENÍ

Tab. 1 Vlhkost a teplota složek betonové směsi

	Kamenivo	Metakaolín	Písek	Cement
Vlhkost % rH	52,125	40,615	95,325	42,175
Teplota °C	22,46	23,11	20,1	23,15

Tab. 2 Hmotnostní poměr obsahu složek směsi

	Plná dávka (kg)	Směs 1 (kg)	Směs 2 (kg)
Cement	400	1	1,3
Voda	275	0,6875	0,8938
Písek	1130	2,825	3,6725
Kamenivo	300	0,75	0,975
Metakaolín	100	0,25	0,325
Urychlovač	3	0,0075	0,0098

Výsledná směs se skládala ze složek dle poměru uvedeného v tabulce vyjma urychlovače tuhnutí. Ten byl z důvodu zkrácení časového intervalu pro měření vynechán.

VÝSLEDKY MĚŘENÍ

1. Měření krouticího momentu v suché směsi

Materiál použitý pro první měření byl zvolen jako suchá směs písku a kameniva zamísená dle poměru Směs 2 viz Tab. 2. Směs se tedy skládá pouze z 3,67 kg písku a 0,975 kg kameniva. V průběhu měření došlo k několika nutným úpravám postupu měření. Ve chvíli, kdy bylo otevřeno víčko, došlo k samovolnému vysypání směsi z tiskové hlavy, tudíž měření nebylo možné provést. Měření tedy proběhlo s uzavřeným víčkem, kdy však docházelo ke znatelnému zasekávání částic kameniva ve spáře mezi šnekovnicí a tělem tiskové hlavy. Chod zařízení nebyl plynulý a nebylo možné získat relevantní hodnoty s dostatečnou opakovatelností.

2. Měření krouticího momentu v zavlhčené směsi bez cementu

Materiál použitý pro druhé měření byl zvolen jako zavlhčená směs písku a kameniva zamísená dle poměru Směs 2 viz Tab. 2. Směs se tedy skládá z 3,67 kg písku, 0,975 kg kameniva a 0,894 kg vody. Reologie zamíseného materiálu však neodpovídala směsi, pro kterou je zařízení určeno, navíc docházelo k vylučování vody ze směsi při plnění tiskové hlavy. Měření bylo i přes problémy provedeno. Plynulost chodu tiskové hlavy byla opět velice špatná a docházelo k zasekávání materiálu v ústí trysky. Měřený krouticí moment byl tedy zaznamenáván pouze ve chvíli, kdy se chod zařízení podařilo. Z důvodu naměření většího momentu, než bylo očekáváno, nastávaly problémy s praskáním plastové redukce. Naměřené hodnoty momentů jsou zobrazeny v Tab. 3. Při měření nebyla zajištěna dostatečná opakovatelnost a měření bylo nutné opakovat s plnohodnotnou směsí.

Tab. 3 Měření krouticího momentu zavlhčené směsi bez cementu

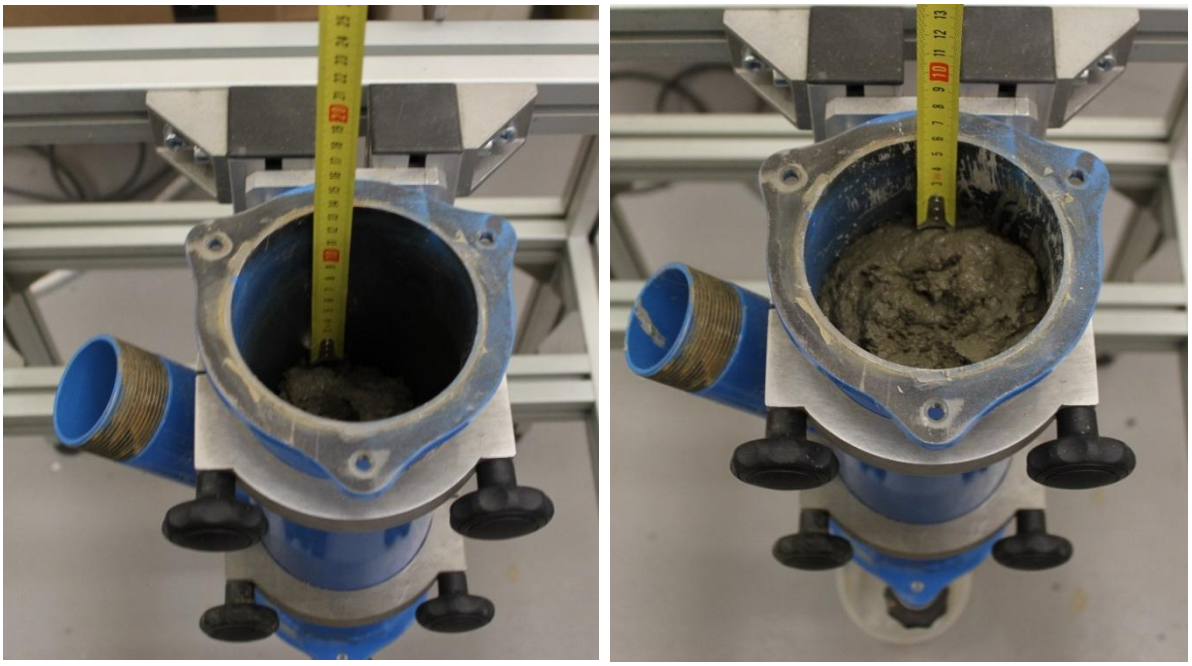
Měření 1	Měření 2	Měření 3	Měření 4
36 Nm	18 Nm	28 Nm	15 Nm

3. Měření krouticího momentu ve výsledné směsi

Třetí měření již probíhalo se směsí, se kterou bude zařízení reálně pracovat. Směsi byly připraveny podle hmotnostních poměrů v Tab. 3. Jediným rozdílem od směsi, kterou bude zařízení reálně tisknout, je vynechání urychlovače tuhnutí. Bez přidání urychlovače tuhnutí by cementová směs po dobu 40 minut neměla zaznamenat výrazné změny v reologických vlastnostech. Na základě tohoto faktu je tedy možné použít namíchanou směs opakovaně.

Pro měření krouticího momentu ve výsledné směsi byly postupně namíchány dvě směsi se stejným hmotnostním poměrem složek, ale jiným množstvím. Rozdílem v podmínkách při měření u Směsi 1 a Směsi 2, uvedenými v Tab. 2, je výška, do které byla tisková hlava naplněna materiálem. U Směsi 1 je tisková hlava naplněna do výšky 14 cm od vrchní příruby tiskové hlavy, u Směsi 2 pak do výšky 6 cm od vrchní příruby tiskové hlavy.

Rozdíl v množství materiálu zmiňovaný v předešlém odstavci je znázorněn na Obr.2. Na obrázku vlevo odpovídá naplnění tiskové hlavy materiálem po vrchní hranu přívodní příruby, na obrázku vpravo pak plné naplnění tiskové hlavy materiálem v případě, že šnekovnice nebude odvádět materiál z tiskové hlavy dostatečnou rychlostí a materiál se bude vracet do oblasti nad přívodní přírubu.



Obr. 2 Naplnění tiskové hlavy materiálem

Tab. 4 Výsledky měření krouticího momentu s použitím Směsi 1

Měření číslo	Krouticí moment (N·m)	Čas od zamísení (min)
1	7	5
2	8	10
3	10	17
4	9	25
5	11	35

Tab. 5 Výsledky měření krouticího momentu s použitím Směsi 2

Měření číslo	Krouticí moment (Nm)	Čas od zamísení (min)
1	10	5
2	11	18
3	13	25
4	14	30
5	13	39

ZÁVĚR

Z provedených měření vyplývá, že použití suché směsi, případně zavlhčené směsi kameniva a písku pro stanovení krouticího momentu potřebného k protočení šnekovnice uvnitř těla tiskové hlavy naplněné tisknutým materiálem není vhodné. Měření se suchou směsí nebylo možné za stanovených podmínek provést a u zavlhčené směsi byly problémy s plynulostí chodu a odlučováním vody z tisknuté směsi.

Znatelné zlepšení chodu zařízení a možnost měření konkrétních hodnot krouticího momentu bylo zaznamenáno při použití směsi určené pro výsledný tisk. Byly použity 2 různé množství směsi, přičemž při využití Směsi 1, tedy menšího objemu materiálu, je moment cca o 2 N·m nižší, než při využití Směsi 2. Průměrný krouticí moment pro měření Směsi 1 je 9 N·m a pro měření Směsi 2 je průměrný krouticí moment 12,2 N·m. Tyto hodnoty již považuji za reálné a dále budou zohledněny při návrhu testovacího zařízení.

Laboratorní protokol č. 2:

Měření krouticího momentu na testovacím zařízení

Vypracoval: Jakub Slavíček

Datum měření: 10. 12. 2019

ÚVOD

Snižování hmotnosti stávajícího řešení tiskové hlavy vede k nutnosti zjištění hlavních silových účinků působících v rámci této hlavy. Dominantním silovým účinkem v tiskové hlavě je krouticí moment potřebný k protočení šnekovnice uvnitř těla hlavy naplněné danou betonovou směsí. Předmětem tohoto laboratorního protokolu je měření krouticího momentu a procesních parametrů stávající tiskové hlavy na navrženém testovacím zařízení.

POUŽITÉ VYBAVENÍ

Použité vybavení lze rozdělit do dvou skupin: vybavení spojené s přípravou a měřením množství připravovaného materiálu a vybavení potřebné ke zprovoznění řetězce pro dopravu betonové směsi s měřicími senzory.

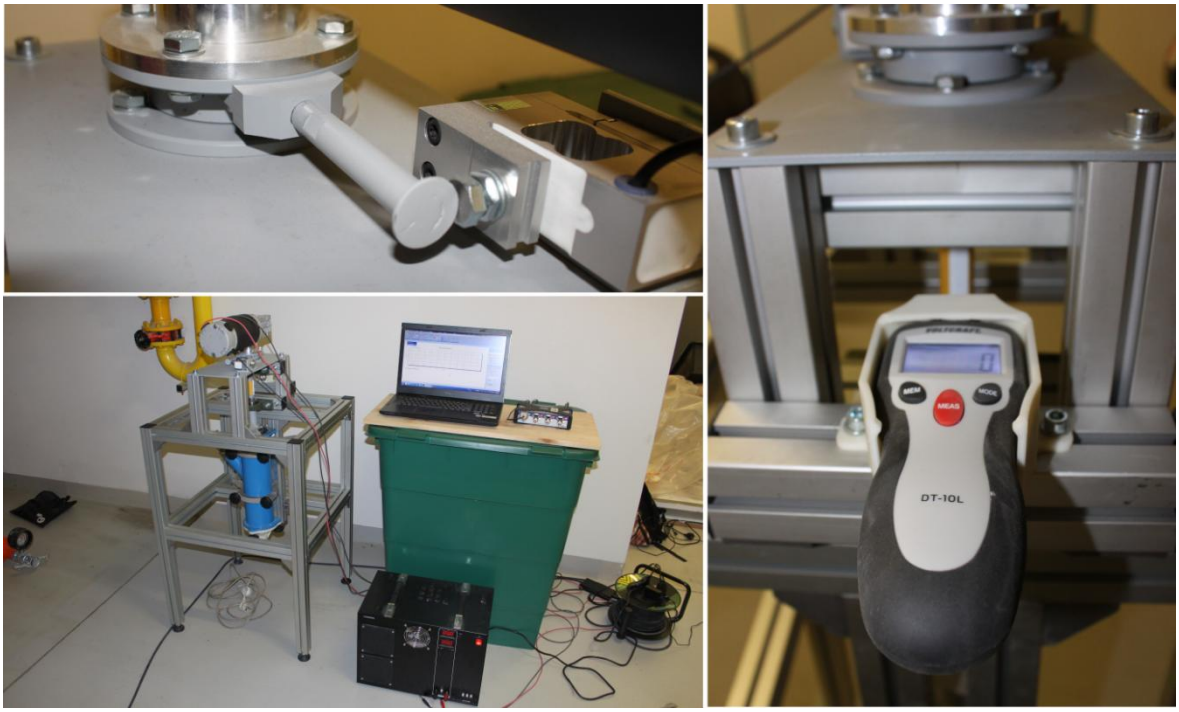
Mezi zařízení pro přípravu tisknuté směsi patří míchačka na betonové směsi a laboratorní váha, pomocí které bylo měřeno množství jednotlivých složek směsi.

Obr. 1 Míchačka na betonové směsi a laboratorní váha

Řetězec pro dopravu betonové směsi se skládá z čerpadla na betonové směsi PFT ZP3M, které disponuje pracovním tlakem až 20 bar a možností regulace čerpaného množství směsi v rozsahu 8 - 33 $l \cdot min^{-1}$, pomocí ohebné hadice je čerpadlo na beton propojeno s tiskovou hlavou upnutou v testovacím zařízení. Jedná se o tiskovou hlavu se šnekovým pohonem navrženou v rámci mé bakalářské práce, pohon tiskové hlavy je realizován kartáčovým DC motorem o výkonu 800 W a řízení otáček je zajištěno využitím zdroje Diametral M130R50D, který poskytuje regulovatelné výstupní napětí 0 -30 V při proudovém rozsahu 0,1 - 40 A.

Obr. 2 Tisková hlava, laboratorní zdroj

Posledním použitým zařízením je testovací zařízení, navržené pro účely měření krouticího momentu potřebného k pohonu tiskové hlavy při extruzi tisknutého materiálu. Testovací zařízení je osazeno tenzometrickým snímačem HBM S2M/200N tahové a tlakové síly o rozsahu 0 - 200 N, sběr dat z tenzometrického snímače je realizován pomocí měřicí karty QUANTUMx - MX410 a notebooku se softwarem Catman Easy. K přesnému měření otáček hřídele je k testovacímu zařízení implementován otáčkoměr Voltcraft DT-10L. Konstrukce testovacího zařízení je podrobněji popsána v hlavním dokumentu diplomové práce.



Obr. 3 Testovací zařízení

PODMÍNKY MĚŘENÍ

Naměřená vlhkost a teplota jednotlivých složek směsi viz Tab. 1 byly měřeny v rámci protokolu č. 1, jednotlivé složky směsi byly skladovány ve stejných okolních podmínkách. Teplota místnosti, kde probíhala měření byla cca 20°C.

Tab. 1 Vlhkost a teplota složek betonové směsi

	Kamenivo	Metakaolín	Písek	Cement
Vlhkost % rH	52,125	40,615	95,325	42,175
Teplota °C	22,46	23,11	20,1	23,15

Tab. 2 Hmotnostní poměr obsahu složek směsi

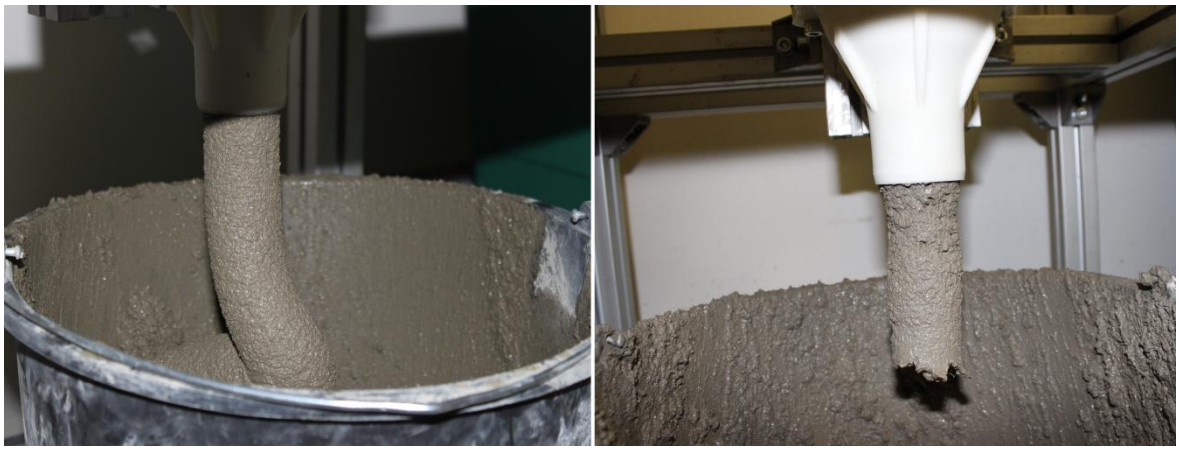
Přísada	Plná směs	Směs 1 - bez urychlovače	Směs 2 - bez kameniva a urychlovače
Cement	18,18	18,18	21,05
Voda	12,50	12,50	14,47
Písek	51,36	51,36	59,47
Kamenivo	13,64	13,64	0,00
Metakaolín	4,55	4,55	5,26
Urychlovač	0,14	0,00	0,00

Všechna provedená měření probíhala s využitím směsí sestavených z jednotlivých složek dle poměru uvedeného v tabulce.

POSTUP MĚŘENÍ

Měření zpracovaná v rámci tohoto protokolu se zabývala zejména stanovením krouticího momentu potřebného pro pohon tiskové hlavy při jejím provozu, tedy při extruzi betonové směsi z tiskové hlavy. Před samotným měřením krouticího momentu bylo nutné provést sadu měření zaměřených na stanovení vhodných procesních parametrů při tisku s použitím různých směsí a tvarů výstupní trysky.

Prvním krokem před každým měřením bylo protlačení betonové směsi pomocí čerpadla skrz dopravní hadici k tiskové hlavě. Stanovení procesních parametrů probíhalo tak, že na tiskové hlavě byly nastaveny otáčky znatelně vyšší, než otáčky potřebné pro extruzi spojitého výnosu. Poté byly postupně zvyšovány otáčky šnekovnice čerpadla na beton a byla pozorována spojitost výnosu na výstupu trysky.



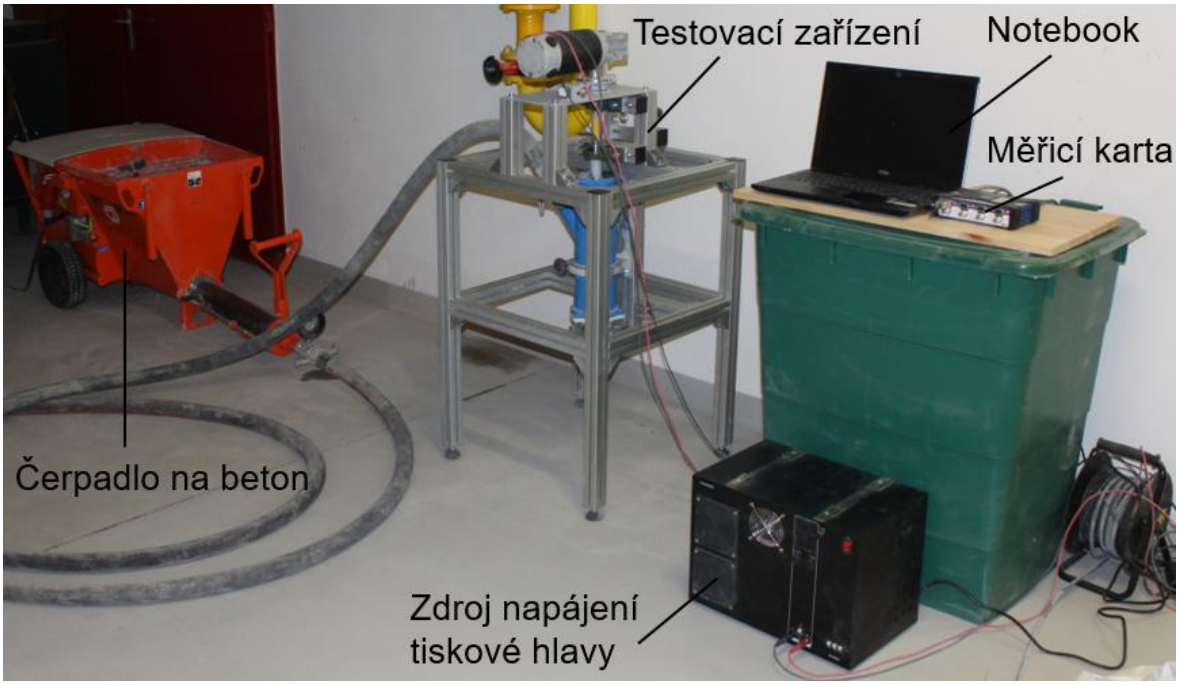
Obr. 4 Spojitost výnosu - spojitý výnos (vlevo), nespojitý výnos (vpravo)

Po dosažení spojitého výnosu byly zaznamenány hodnoty nastavení čerpadla na beton a dále byly nastavovány odpovídající hodnoty otáček šnekovnice tiskové hlavy tak, že bylo postupně snižováno napětí na zdroji. Na zdroji byla nastavena vždy stejná hodnota proudu 5,7 A, změnou napětí v rozsahu 6,6 8,1 V pak byly měněny otáčky motoru a tak i šnekovnice. Při snižování těchto otáček byla pozorována odkrytá horní část tiskové hlavy, otáčky byly postupně snižovány až do doby, kdy začalo docházet k přeplňování tiskové hlavy betonovou směsí, což se projevilo vytékáním směsi nad připojovací přírubu hřídele testovacího zařízení viz Obr. 5. Ve chvíli, kdy začalo k přeplňování docházet, bylo na zdroji nastaveno poslední předchozí napětí, při němž k přeplňování nedocházelo a hodnoty nastavení byly zaznamenány do tabulky procesních parametrů.

Obr. 5 Přeplňování tiskové hlavy betonovou směsí

Po zjištění vhodného nastavení zdroje pro tisk s daným materiálem a tryskou byly dále změřeny otáčky šnekovnice (naprázdno a při extruzi betonové směsi) pomocí laserového otáčkoměru implementovaném k testovacímu zařízení.

Po zjištění vhodných procesních parametrů pro danou trysku a tisknutou směs mohlo proběhnout samotné měření krouticího momentu potřebného pro pohon tiskové hlavy. Na testovacím zařízení nebyl měřen přímo krouticí moment, nýbrž tlaková síla na tah-tlakovém tenzometrickém snímači. Tato síla byla poté ze známé délky přepákování přepočtena na zjišťovaný krouticí moment. Síla na tenzometrický snímač byla přenášena pomocí přepákování připevněného k otočnému uložení převodovky a motoru testovacího zařízení. Měření probíhalo vždy cca v půlminutovém intervalu, kdy byla tiskovou hlavou protlačována betonová směs. Sběr dat byl zahájen vždy dříve než byl spuštěn samotný proces extruze a vypnut byl po úplném vyprázdnění tiskové hlavy.



Obr. 6 Měřicí systém testovacího zařízení

Posledním měřením bylo měření objemového průtoku betonové směsi tiskovou hlavou pro dané procesní parametry jednotlivých trysek a tisknutých materiálů. Měření probíhalo v časovém intervalu 20 s. Po tuto dobu probíhala extruze betonové směsi do připravené nádoby, obsah této nádoby byl po ukončení měření zvážen a ze známé hustoty byl dopočítán objemový průtok za 20 s.

Celý postup měření popisovaný v této kapitole byl vždy stejně opakován pro každou měřenou trysku a materiál. Proběhla měření pro 4 různé trysky a to pro 3 s kruhovým průřezem o průměrech 50, 40 a 35 mm a jednu s průřezem obdélníkovým s rozměry 40 x 24 mm. Dále proběhla měření pro 2 různé betonové směsi viz Tab. 2.

VÝSLEDKY MĚŘENÍ

1. Naměřená provozní nastavení

Tab. 3 Naměřená provozní nastavení se Směsí 1 (s kamenivem)

Měření procesních parametrů		Rozměr trysky			
		Tryska 50	Tryska 40	Tryska 35	Tryska 40x24
Nastavení tiskové hlavy	Napětí u [V]	8,1	7,1	6,6	6,6
	Proud I_1 [A]*	5,7	5,8	5,7	5,7
	Proud I_2 [A]*	7,4	7,6	7,2	7,2
	Otáčky N_1 (min^{-1})*	67,6	57,2	53,4	53,5
	Otáčky N_2 (min^{-1})*	66,1	55,4	52,1	52,3
Nastavení čerpadla (poloha)		6	4	3,25	3,25

*I1 - Proud bez zátěže, I2 - Proud se zátěží, N1 - Otáčky bez zátěže, N2 - Otáčky se zátěží

Tab. 4 Naměřená provozní nastavení se Směsí 2 (bez kamenivea)

Měření procesních parametrů		Tryska 40
Nastavení tiskové hlavy	Napětí u [V]	7
	Proud I_1 [A]*	5,8
	Proud I_2 [A]*	8,5
	Otáčky N_1 (min^{-1})*	56,9
	Otáčky N_2 (min^{-1})*	54,5
Nastavení čerpadla (poloha)		4

*I1 - Proud bez zátěže, I2 - Proud se zátěží, N1 - Otáčky bez zátěže, N2 - Otáčky se zátěží

2. Naměřené průtoky

Tab. 5 Naměřená průtoky materiálu se Směsí 1 (s kamenivem)

Měření procesních parametrů		Rozměr trysky			
		Tryska 50	Tryska 40	Tryska 35	Tryska 40x24
Množství materiálu za 20 s [kg]	Měření 1	29,4	23,1	19,6	19,8
	Měření 2	29,1	23,4	21,8	21,7
	Měření 3	28,9	22,7	20	20,1
	Průměrná hodnota	29,1	23,1	20,5	20,5

Tab. 6 Naměřená průtoky materiálu se Směsí 2 (bez kameniva)

Měření procesních parametrů		Tryska 40
Množství materiálu za 20 s [kg]	Měření 1	20,3
	Měření 2	20,5
	Měření 3	20,9
	Průměrná hodnota	20,6

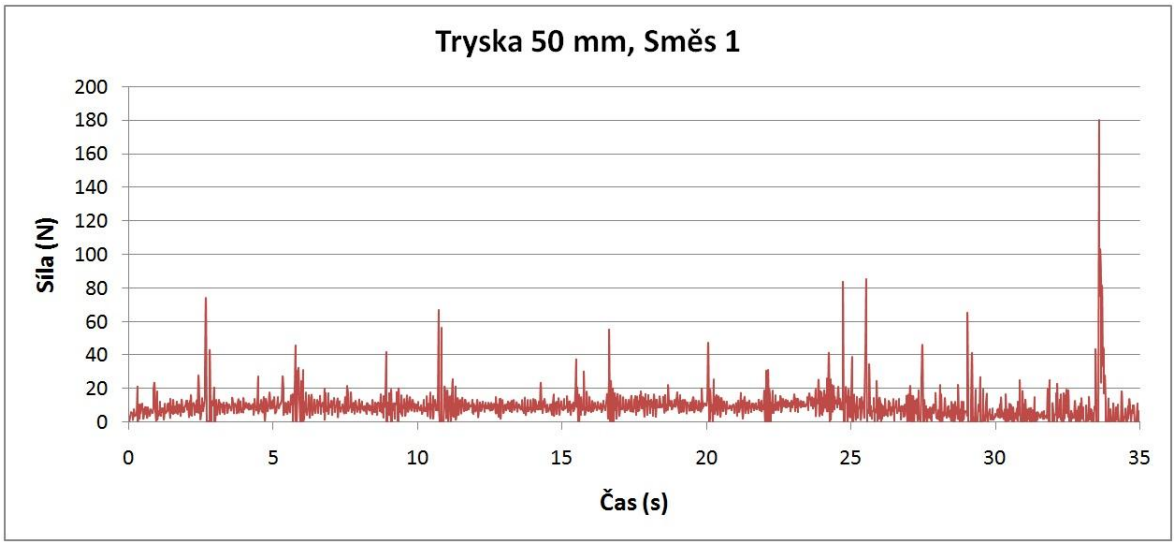
Měření probíhala dle výše popisovaných postupů měření. Pro materiál označený Směs 1 byla provedena měření pro 4 různé rozměry trysek. Z důvodu náročnosti měření na spotřebu materiálu byl se Směsí 2 proveden test pouze pro trysku s průměrem 40 mm. Zpracovatelnost směsi bez přidaného urychlovače tuhnutí s použitím portlandského cementu je 40 minut (od smísení do počátku prvních změn v reologických vlastnostech směsi). V tomto časovém intervalu bylo možné změřit vlastnosti max. dvou různých trysek, ve chvíli kdy nedocházelo ke komplikacím v čerpatelnosti směsi.

Naměřené hodnoty proudu označené I_1 značí proud, který ukazoval zdroj při provozu tiskové hlavy naprázdno, tedy bez extruze materiálu. Hodnoty značené I_2 naopak proud zobrazený na zdroji při zátěži tiskové hlavy extrudovaným materiálem. Stejný princip značení platí i pro otáčky hřídele měřené pomocí otáčkoměru N_1 - bez zátěže a N_2 - se zátěží.

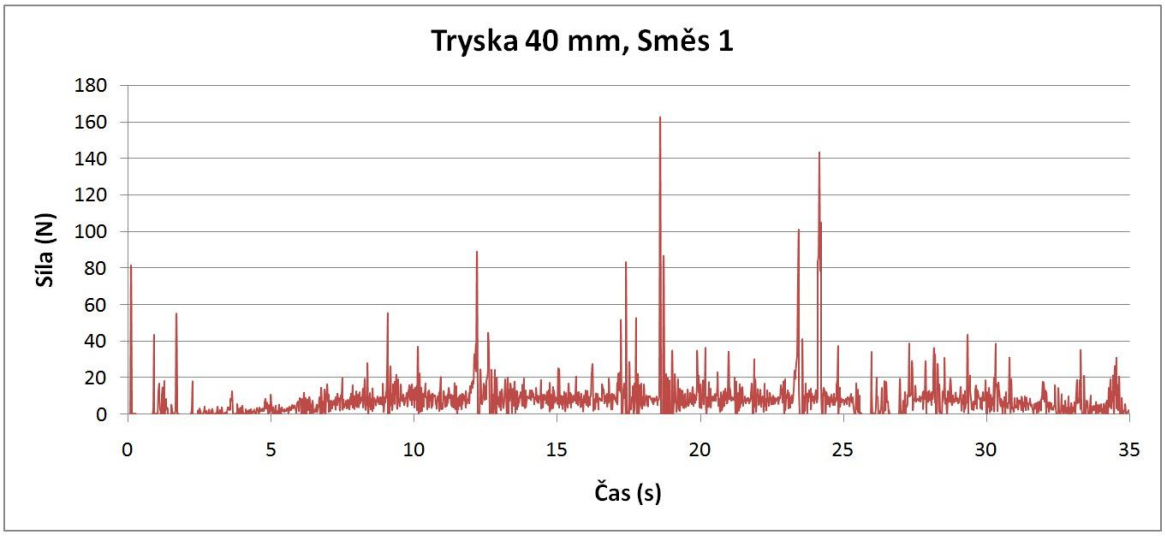
Průtok materiálu tiskovou hlavou byl měřen třikrát z důvodu nepřesností vznikajících nedokonalým systémem vypínání pohonu tiskové hlavy a to ruční vypínání zároveň čerpadla a zdroje tiskové hlavy. Z těchto hodnot byla dále vypočítána hodnota průměrná.

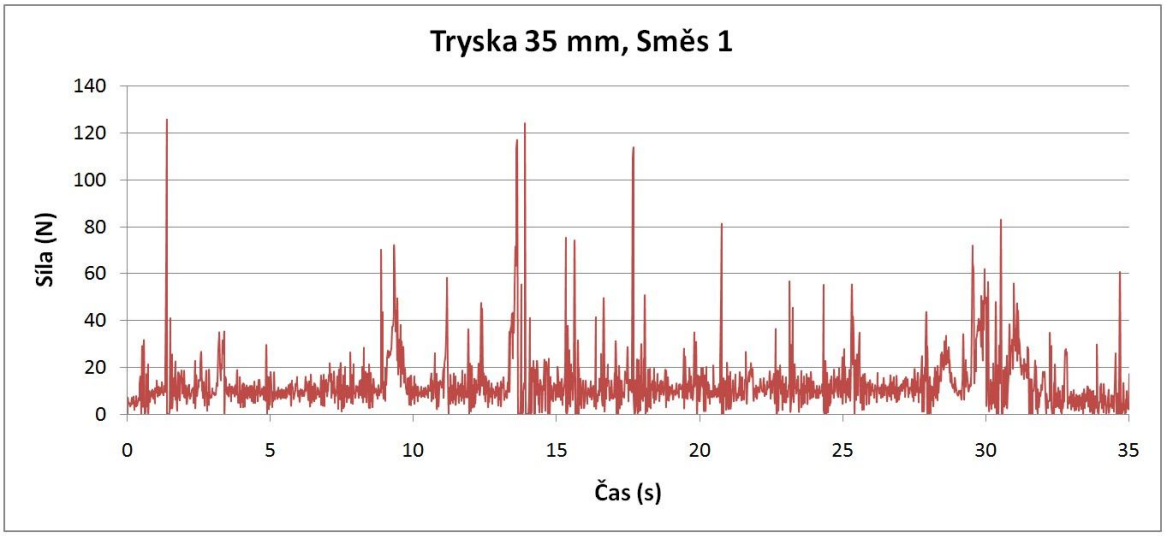
3. Měření krouticího momentu - Směs 1

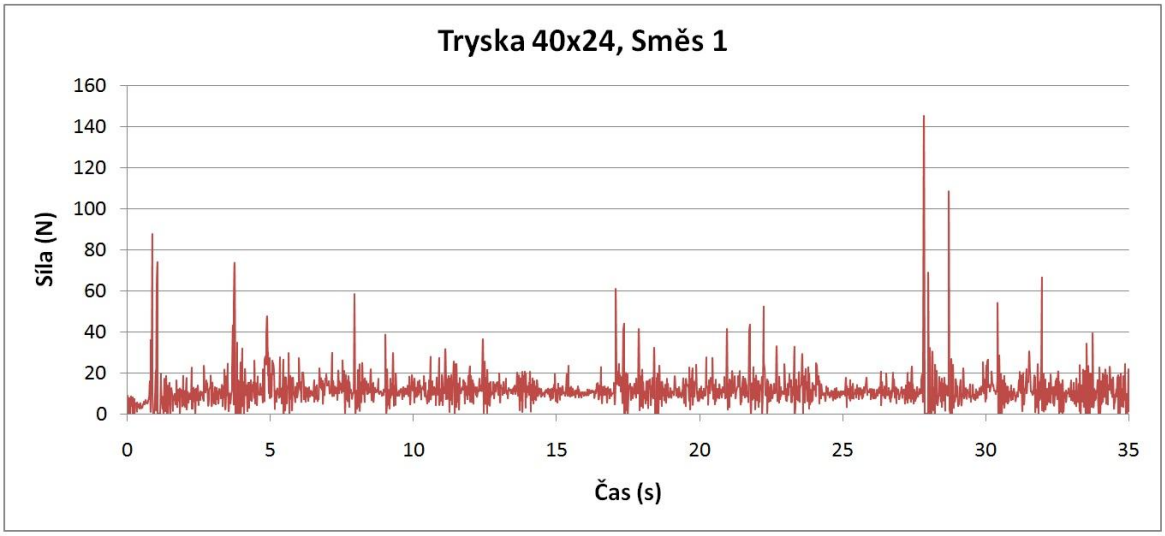
Následující grafy zobrazují časovou závislost síly na tenzometrickém snímači. Délka přepákování, které způsobovalo tlakovou sílu na snímači je 150 mm. Výsledný krouticí moment byl získán pronásobením hodnot naměřené síly délkou přepákování. Data byla měřena pro všechny trysky a použité směsi na časovém intervalu cca 1 min, z těchto dat byl poté vybrán reprezentativní vzorek 35 s. Byly oříznuty zejména hodnoty síly při náběhu materiálu do tiskové hlavy a hodnoty při vyprazdňování tiskové hlavy.



Obr. 7 Tryska 50 mm, Směs 1 (s kamenivem)





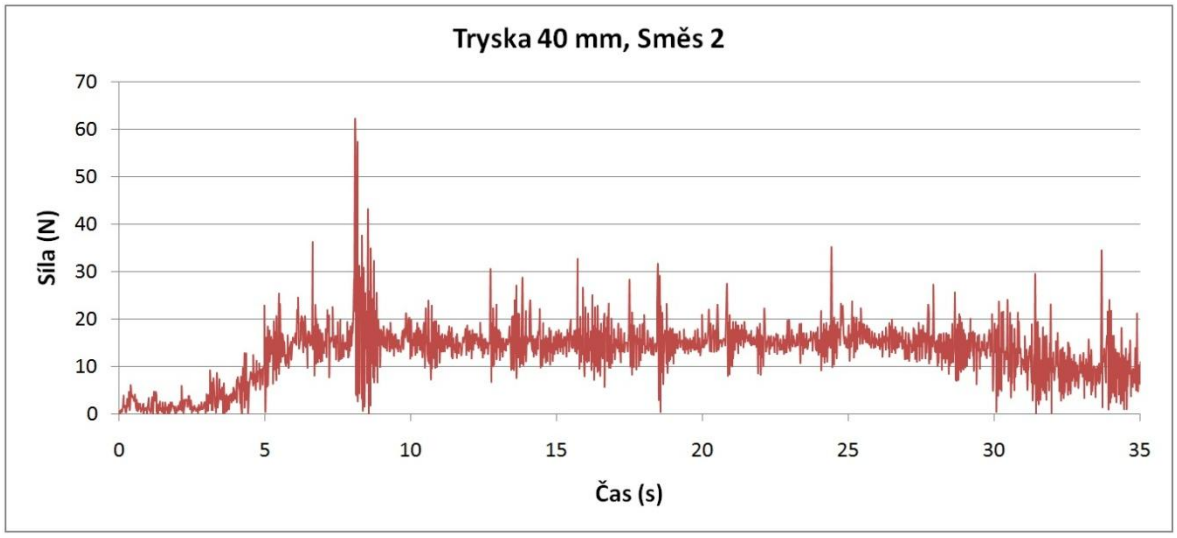


Obr. 8 Tryska 40, 35 a 40x24 mm, Směs 1 (s kamenivem)

Tab. 7 Hodnoty sil a momentů Směs 1 (s kamenivem)

Veličina	Tryska 50	Tryska 40	Tryska 35	Tryska 40x24
Průměrná síla Fp (N)	9,54	10,06	13,04	11,99
Maximální síla Fmax (N)	179,41	162,67	124,48	145,29
Průměrný moment Mp (Nm)	1,43	1,18	1,96	1,78
Maximální moment Mmax (Nm)	26,91	24,4	18,67	21,79

4. Měření krouticího momentu - Směs 2



Obr. 9 Tryska 40 mm, Směs 2 (bez kameniva)

Tab. 8 Hodnoty sil a momentů Směs 2 (bez kameniva)

Veličina	Tryska 40
Průměrná síla Fp (N)	15,62
Maximální síla Fmax (N)	61,58
Průměrný moment Mp (Nm)	1,95
Maximální moment Mmax (Nm)	9,24

ZÁVĚR

Měření provedená v rámci tohoto protokolu lze rozdělit do tří hlavních celků a to na stanovování vhodných procesních parametrů, měření průtoku materiálu tiskovou hlavou a měření krouticího momentu.

Byly stanoveny vhodné procesní parametry pro Směs 1 (s kamenivem) v kombinaci se čtyřmi různými tryskami 50, 40, 35 a 40 x 24 mm, dále pak procesní parametry pro Směs 2 (bez kameniva) v kombinaci s tryskou 40 mm.

Naměřené hodnoty průtoku se u Směsi 1 pohybují v rozmezí hodnot 20,5 - 29,1 kg materiálu za 20 s. Největší průtok byl naměřen u největší trysky o průměru 50 mm a nejmenší průtok u trysek o průměru 35 mm a trysky 40 x 24 mm (mají stejný obsah), což byl předpokládaný trend. Naměřená hodnota průtoku se Směsí 2 a tryskou o průměru 40 mm byla 20,6 kg za 20 s. Tato hodnota je výrazně menší než při měření průtoku stejnou tryskou pro materiál Směs 1 (zde hodnota průtoku odpovídala 23,1 kg za 20 s), a blíží se více průtoku tryskou 35 mm se Směsí 1. Tuto skutečnost si lze vysvětlit tím, že materiál bez kameniva (Směs 2) tvoří lépe spojitý výnos a tudíž není potřeba protlačovat výstupní tryskou tak velké množství materiálu aby spojitosti výnosu bylo dosaženo.

Poslední část měření se zabývala měřením krouticího momentu potřebného k pohonu šnekovnice tiskové hlavy. Krouticí moment byl přepočten ze síly změřené na tenzometrickém snímači. U měření se Směsí 1 se hodnoty průměrné síly pohybovaly v rozmezí 9,54–13,04 N, maximální změřené síly však dosahovaly hodnot mnohonásobně vyšších 124,48–179,41 N. Z grafů je patrné, že vznik těchto špičkových sil je nahodilý a je spojen se zasekáváním kameniva ve spáře mezi šnekovnicí a tělem tiskové hlavy. Při měření byl pozorován efekt vzniku špičkových hodnot sil na snímači, který byl provázen zvukovým efektem a vznikem chvění tiskové hlavy a na základě tohoto pozorování byl vznik špičkových sil přisouzen právě zasekávání kameniva ve spáře mezi šnekovnicí a tělem tiskové hlavy. U měření se Směsí 2, tedy se směsí bez kameniva byla získána hodnota průměrné síly na snímači 15,62 N, což je hodnota větší než u měření se Směsí 1, ale při měření se Směsí 2 nedocházelo k efektu zasekávání kameniva a hodnota maximální naměřené síly je 61,58 N. Po přepočtení naměřených sil na zjišťovaný potřebný krouticí moment byly získány hodnoty maximálních potřebných krouticích momentů pro Směs 1 v intervalu 18,67–26,91 N·m a pro Směs 2 9,24 N·m.

Laboratorní protokol č. 3:

Ověření funkčnosti navržené tiskové hlavy

Vypracoval: Jakub Slavíček

Datum měření: 15. 6. 2020

ÚVOD

Předmětem měření popisovaných v tomto laboratorním protokolu je ověření funkce nově navržené tiskové hlavy, jejích částí a funkce celku tiskové hlavy při tisku reálného objektu.

POUŽITÉ VYBAVENÍ

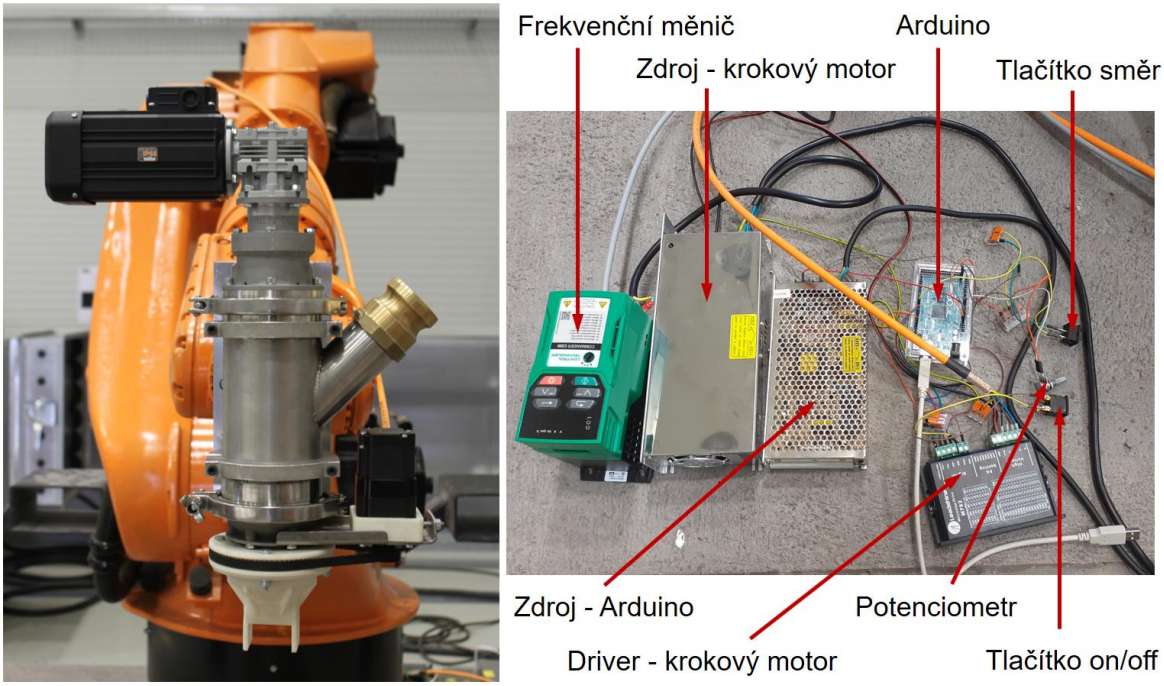
Použité vybavení lze rozdělit do dvou skupin: vybavení spojené s přípravou a měřením množství připravovaného materiálu a vybavení potřebné ke zprovoznění řetězce pro dopravu betonové směsi a k polohování tiskové hlavy v prostoru.

Mezi zařízení pro přípravu tisknuté směsi patří míchačka na betonové směsi a laboratorní váha, pomocí které bylo měřeno množství jednotlivých složek směsi.

Obr. 1 Míchačka na betonové směsi a laboratorní váha

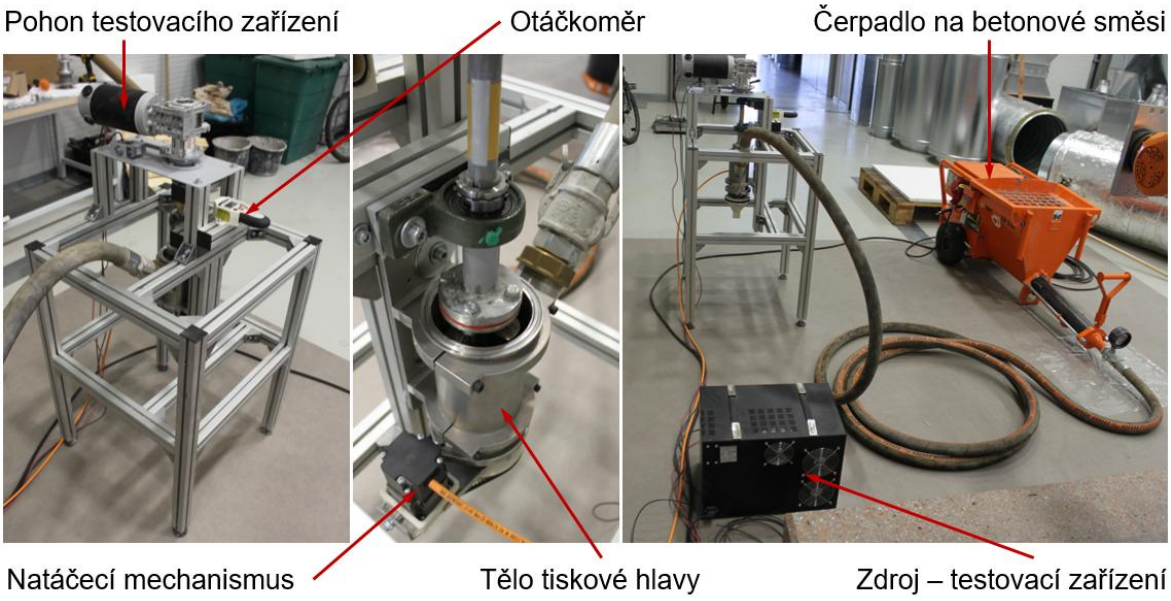
Řetězec pro dopravu betonové směsi se skládá z čerpadla na betonové směsi PFT ZP3M, které disponuje pracovním tlakem až 20 bar a možností regulace čerpaného množství směsi v rozsahu 8 - 33 $l \cdot min^{-1}$ (0,48 - 1,98 $m^3 \cdot h^{-1}$), pomocí ohebné hadice je čerpadlo na beton propojeno s tiskovou hlavou.

Testovaná tisková hlava je aktivní tisková hlava se šnekovým pohonem a integrovaným systémem natáčení výstupní trysky. Pohon šneku je realizován asynchronním motorem Transtecno 0,18 kW, řízeným pomocí frekvenčního měniče Commander C200-01-2-00017-A-0,25kW. Natáčecí mechanismus je poháněn krokovým motorem B&R 80MPF1.500S114-01 a řízení krokového motoru je realizováno pomocí vývojové desky Arduino (pomocí tlačítek a potenciometru), napájení krokového motoru je zajištěno průmyslovým spínaným zdrojem RPS608 (60V, 400W) a driverem krokového motoru M752 (75 V, 5,2 A). Rozměry výstupní trysky použité pro experimenty jsou 45 x 28 mm.



Obr. 2 Tisková hlava + zapojení

K polohování tiskové hlavy v prostoru bylo použito robotické rameno KUKA KR 30 HA. Posledním použitým zařízením je testovací zařízení. Pohon testovacího zařízení je realizován kartáčovým DC motorem o výkonu 800 W a řízení otáček je zajištěno použitím zdroje Diametral M130R50D, který poskytuje regulovatelné výstupní napětí 0 -30 V při proudovém rozsahu 0,1 - 40 A. K přesnému měření otáček hřídele (šneku) je k testovacímu zařízení implementován otáčkoměr Voltcraft DT-10L. Konstrukce testovacího zařízení a tiskové hlavy je podrobněji popsána v hlavním dokumentu diplomové práce.



Obr. 3 Měřicí zařízení

PODMÍNKY MĚŘENÍ

Naměřená vlhkost a teplota jednotlivých složek směsi viz Tab. 1 byly měřeny v rámci protokolu č. 1, jednotlivé složky směsi byly skladovány ve stejných okolních podmínkách. Teplota místnosti, kde probíhala měření byla cca 23°C.

Tab. 1 Vlhkost a teplota složek betonové směsi

	Kamenivo	Metakaolín	Písek	Cement
Vlhkost % rH	52,125	40,615	95,325	42,175
Teplota °C	22,46	23,11	20,1	23,15

Tab. 2 Hmotnostní poměr obsahu složek směsi na 100 kg směsi

Přísada	Plná směs	Směs 1 - bez urychlovače	Směs 2 - bez kameniva a urychlovače
Cement	18,18	18,18	21,05
Voda	12,50	12,50	14,47
Písek	51,36	51,36	59,47
Kamenivo	13,64	13,64	0,00
Metakaolín	4,55	4,55	5,26
Urychlovač	0,14	0,00	0,00

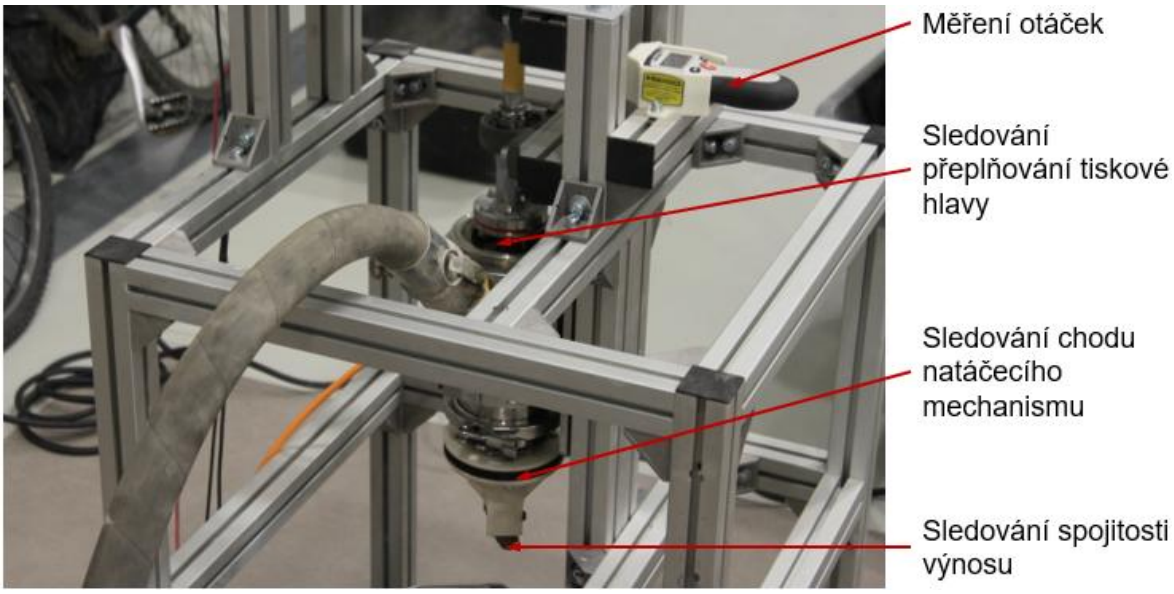
Všechna provedená měření probíhala s využitím směsí sestavených z jednotlivých složek dle poměru uvedeného v tabulce.

POSTUP MĚŘENÍ

Postup měření lze rozdělit do 3 hlavních celků podle ověřované funkce tiskové hlavy. První experiment se zabýval ověřením tisku objemového množství materiálu požadovaného ze zadání (0,5 - 2 $m^3 \cdot h^{-1}$), v dalším kroku byla ověřována funkčnost natáčecího mechanismu při různých otáčkách výstupní trysky a poslední experiment spočíval v ověření funkčnosti celku tiskové hlavy při tisku reálného objektu.

Prvním krokem v postupu měření bylo protlačení betonové směsi (Směs 2 - z důvodu problematického středění šneku na testovacím zařízení - možnost zasekávání kameniva) pomocí čerpadla skrz dopravní hadici k tiskové hlavě (připevněná k testovacímu zařízení). Následně byly na tiskové hlavě nastaveny otáčky znatelně vyšší, než otáčky potřebné pro extruzi množství materiálu dopravovaného čerpadlem k tiskové hlavě. Poté byly na čerpadle nastavovány různé rychlosti čerpání směsi tak, aby se hodnoty dopravovaného množství rovnaly hodnotám ze zadání 2 a 0,5 $m^3 \cdot h^{-1}$. Průtok materiálu tiskovou hlavou byl měřen tak, že byla směs dopravovaná čerpadlem po dobu 20 s vytlačována z tiskové hlavy do připravené nádoby a následně bylo množství dopravené směsi v nádobě zváženo a přepočteno na množství odpovídající hodinovému průtoku.

Po dosažení požadovaného množství dopravovaného materiálu byly zaznamenány hodnoty nastavení čerpadla na beton a dále byly nastavovány odpovídající hodnoty otáček šneku tiskové hlavy tak, že bylo postupně snižováno napětí na zdroji. Na zdroji byla nastavena hodnota proudu a změnou napětí pak byly měněny otáčky motoru a tak i šneku. Při snižování těchto otáček byla pozorována odkrytá horní část tiskové hlavy, otáčky byly postupně snižovány až do doby, kdy začalo docházet k přeplňování tiskové hlavy betonovou směsí, což se projevilo vytékáním směsi nad připojovací přírubu hřídele testovacího zařízení. Ve chvíli, kdy začalo k přeplňování docházet, bylo na zdroji nastaveno poslední předchozí napětí, při němž k přeplňování nedocházelo a hodnoty nastavení byly zaznamenány do tabulky provozních nastavení.



Obr. 4 Pozorované oblasti tiskové hlavy

Stejný princip měření a získání provozních nastavení, jako pro maximální (2 $m^3 \cdot h^{-1}$) a minimální (0,5 $m^3 \cdot h^{-1}$) požadované hodnoty dopravovaného množství ze zadání, byl použit i pro získání vhodného nastavení pro trysku 45 x 28 mm použitou pro další experimenty. Potřebné dopravované množství materiálu bylo stanovováno ze spojitosti výnosu stejně jako v protokolu 2, po dosažení vhodných provozních nastavení byly opět zapsány všechny parametry měřené na testovacím zařízení a naměřené otáčky byly později použity při nastavování rychlosti otáčení šneku (nastavení měniče řídícího pohon tiskové hlavy).

Obr. 5 Spojitost výnosu - spojitý (vlevo), nespojitý (vpravo)

Ověření funkčnosti natáčecího mechanismu probíhalo tak, že na čerpadle a tiskové hlavě byly nastaveny provozní parametry pro maximální dopravované množství 2 $m^3 \cdot h^{-1}$ a tiskovou hlavou byla dopravována směs do připravené nádoby. Zároveň byl spuštěn natáčecí mechanismus a pomocí potenciometru a tlačítka připojeného k Arduinu byl nastavován různý směr a rychlost otáčení výstupní trysky (0– 2 s^{-1}), přičemž byl pozorován chod zařízení.

Po dokončení experimentů na testovacím zařízení byly hlavní celky tiskové hlavy sestaveny do původní podoby, a byly nastaveny vhodné provozní parametry tiskové hlavy pro výstupní trysku 40 x 28 mm - otáčky šneku byly nastaveny za pomoci frekvenčního měniče a otáčkoměru a na čerpadle byla nastavena odpovídající hodnota rychlosti podávání.

Obr. 6 Nastavení otáček tiskové hlavy

Po nastavení otáček šneku byla tisková hlava zkompletována a připevněna k platformě robotického ramene. Následně byla "na sucho" odladěna trajektorie pro ověřovací tisk. Pro ověřovací tisk byl zvolen dutý objekt válcovitého tvaru o průměru 700 mm. Válcovitý objekt byl zvolen z důvodu možnosti nastavení konstantní rychlosti otáčení výstupní trysky, jejíž rychlost byla k rychlosti posuvu tiskové hlavy (350 mm/s) nastavována pomocí potenciometru.

Posledním krokem v měření byla příprava Směsi 1 (s kamenivem), pozorování chodu celku tiskové hlavy a tisk popisovaného testovacího objektu. Tisk připraveného objektu probíhal v několika iteracích, kdy docházelo k lehké úpravě provozního nastavení čerpadla, ve chvíli kdy docházelo k extruzi většího množství materiálu než požadovaného pro danou vrstvu a docházelo tak k přetékání vrstev.

Obr. 7 Extruze materiálu

VÝSLEDKY MĚŘENÍ

1. Test množství dopravovaného materiálu

Naměřená data provozních nastavení v Tab. 3 byla získána dle výše popisovaného postupu.

Tab. 3 Provozní nastavení tiskové hlavy

Použitá tryska		45 x 28 mm		
Požadované množství materiálu		0,5	2	1,7
Nastavení testovacího zařízení	Napětí u (V)	5,1	13,1	9,6
	Proud I (A)	4,8	6,3	5,8
	Otáčky bez zátěže ($ot \cdot min^{-1}$)	42,2	115,1	82,8
	Otáčky se zátěží ($ot \cdot min^{-1}$)	41,8	114,5	82,3
	Nastavení čerpadla	0	5,75	4
Měření průtoku	Měření 1 (kg/20s)	9,3	26,5	20,6
	Měření 2 (kg/20s)	9,2	26,9	20,5
	Měření 3 (kg/20s)	9,1	26,7	20,8
	Průměrná hodnota (kg/20s)	9,2	26,70	20,6
	Množství ($kg \cdot h^{-1}$)	1656	4806	3714
	Objemové množství ($m^3 \cdot h^{-1}$)	0,69	2,0	1,6
Korekce na čerpadle	-	-	-	3,25
Nastavení měniče	-	-	-	41,07

Maximálního požadovaného množství tisknutého materiálu bylo dosaženo s provozními nastaveními viz Tab. 3, minimálního požadovaného množství tisknutého materiálu 0,5 $m^3 \cdot h^{-1}$ se nepodařilo dosáhnout z důvodu omezené regulace čerpadla. Množství cca 0,7 $m^3 \cdot h^{-1}$ bylo minimální množství, které zvládne použité čerpadlo reálně dopravovat. K zajištění spojitého výnosu tryskou 45 x 28 mm je vhodné použít nastavení pro množství tisknutého materiálu cca 1,7 $m^3 \cdot h^{-1}$, tato hodnota byla však při tisku výsledného objektu o něco snížena.

2. Test natáčecího mechanismu

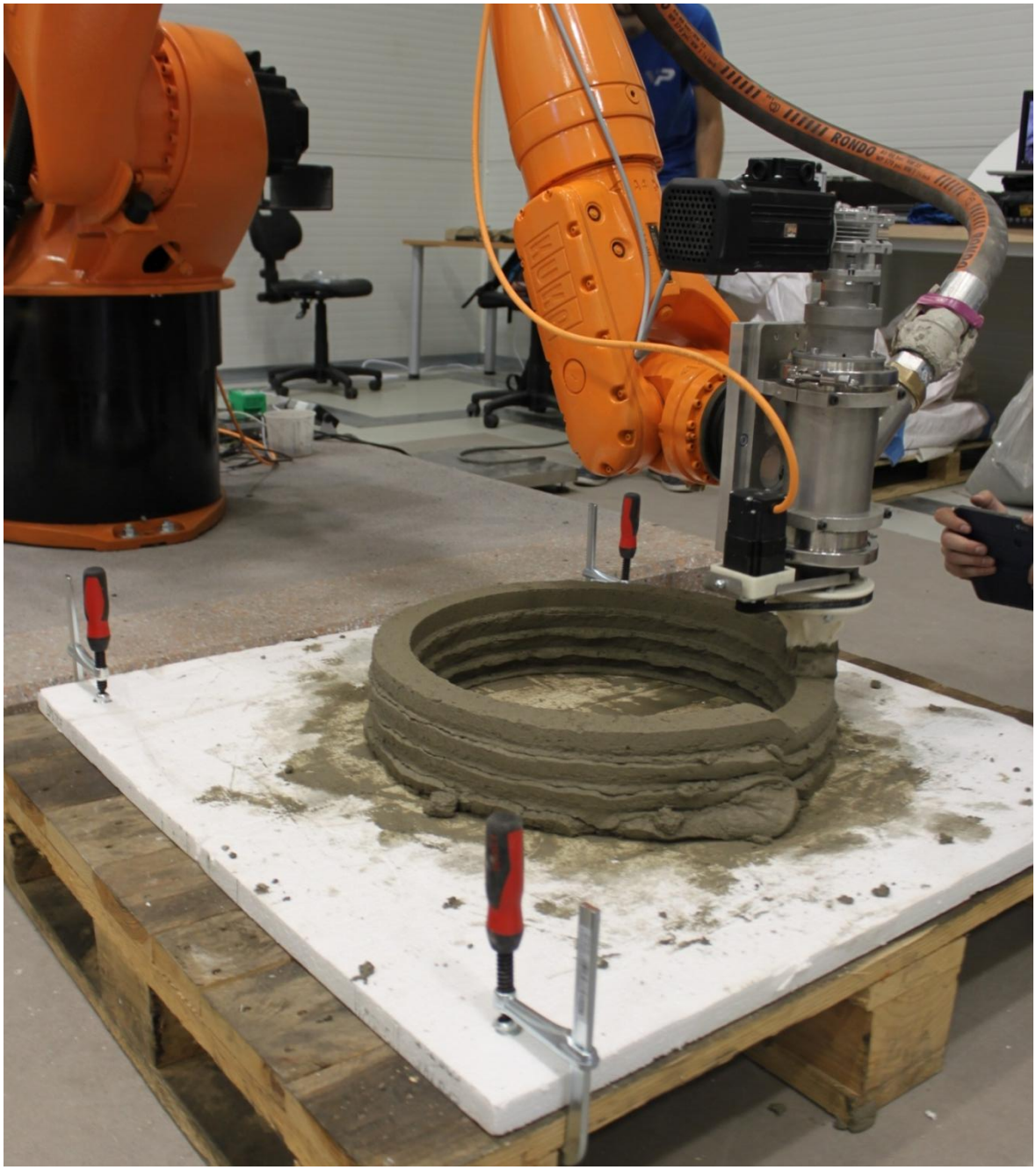
Funkčnost natáčecího mechanismu byla ověřována při rychlostech otáčení výstupní trysky 0 - 2 $ot \cdot s^{-1}$, přičemž množství dopravovaného materiálu tiskovou hlavou bylo 2 $m^3 \cdot h^{-1}$. Na celém testovaném intervalu vykazoval natáčecí mechanismus plynulý chod, nebylo zaznamenáno žádné zasekávání zařízení či přeskakování kroků motoru. Z indikačních děr ve výstupní trysce nevytékaly žádné nečistoty, což dokazuje, že navržený způsob těsnění kontaktu trysky a dílu zúžení pod ložisko je funkční a dostatečné.

3. Tisk reálného objektu

Při tisku Směsi 1 (s kamenivem) byla nejprve tisková hlava s robotickým ramenem umístěna nad zásobník čerpadla na betonové směsi a materiál byl několik minut čerpán dokola, přičemž byl sledován chod tiskové hlavy a případné vznikající rázy (způsobené zasekáváním kameniva ve spáře mezi šnekem a tělem tiskové hlavy viz Příloha 2). Chod šneku tiskové hlavy byl plynulý stejně jako chod natáčecího mechanismu, žádné rázy pozorovány nebyly.

Obr. 8 Pozorování chodu tiskové hlavy

Tisk válcovitého testovacího objektu probíhal v několika krocích, kdy byl postupně pomalu snižován průtok materiálu na čerpadle (extruze většího množství materiálu než potřebného pro danou trysku a rychlost pohybu tiskové hlavy) a byl pozorován počet nanesených vrstev do zborcení testovaného objektu. Vytištěný objekt byl po ukončení tisku (vyprázdnění zásobníku čerpadla) nabrán do nádob a vrácen do zásobníku čerpadla a tisk byl opakován.



Obr. 9 Tisková hlava při nanášení vrstev

Obr. 10 Testovací objekt (příliš velké množství vynášeného materiálu na danou rychlost pohybu hlavy)

Obr. 11 Zbořená stavba testovacího objektu (9 vrstev)

Obr. 12 Detail spojení vrstev - velké množství dopravovaného materiálu (vlevo), povedený tisk (vpravo)

Obr. 13 Finální vytištěný testovací objekt (6 vrstev)

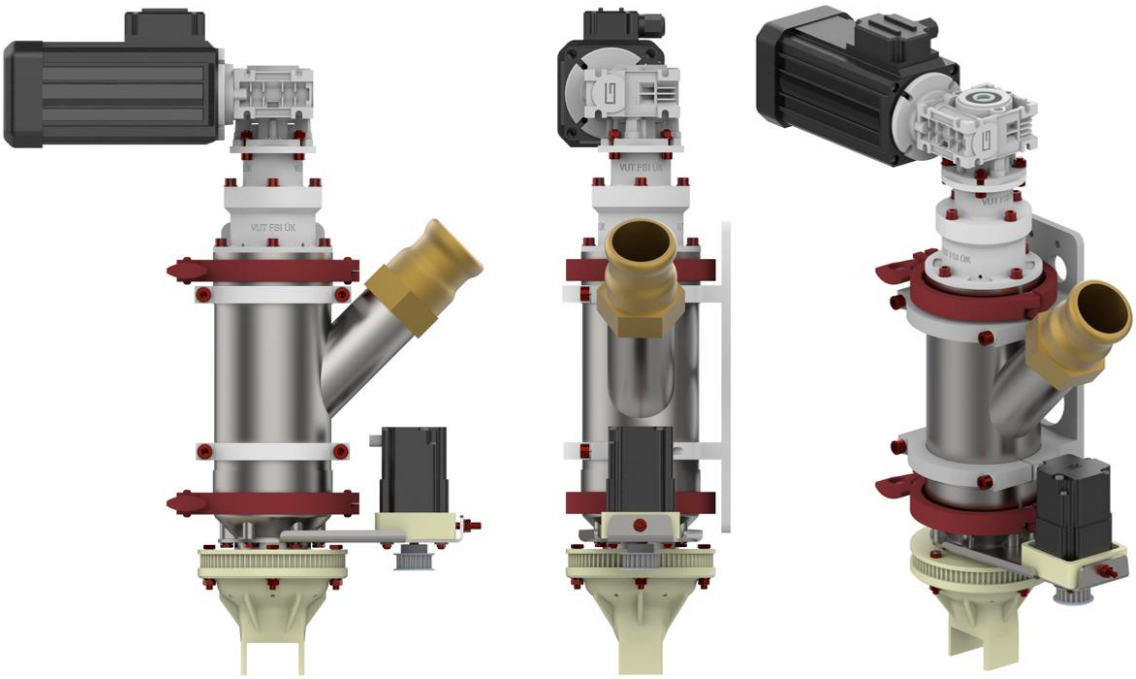
ZÁVĚR

Hlavním cílem tohoto laboratorního protokolu bylo ověřit funkčnost navržené tiskové hlavy určené pro dopravu betonové směsi (Plná směs viz Tab. 2). Pro potřeby měření provedených v rámci tohoto protokolu byla Plná směs upravena a vznikly 2 substituční směsi pojmenované Směs 1 (bez urychlovače tuhnutí) a Směs 2 (bez urychlovače tuhnutí a kameniva). Urychlovač tuhnutí byl ze směsi vynechán z důvodu prodloužení zpracovatelnosti směsi a kamenivo bylo při ladění provozních nastavení tiskové hlavy vynecháno z důvodu možného zasekávání kameniva vlivem nedokonalého středění šneku v testovacím zařízení.

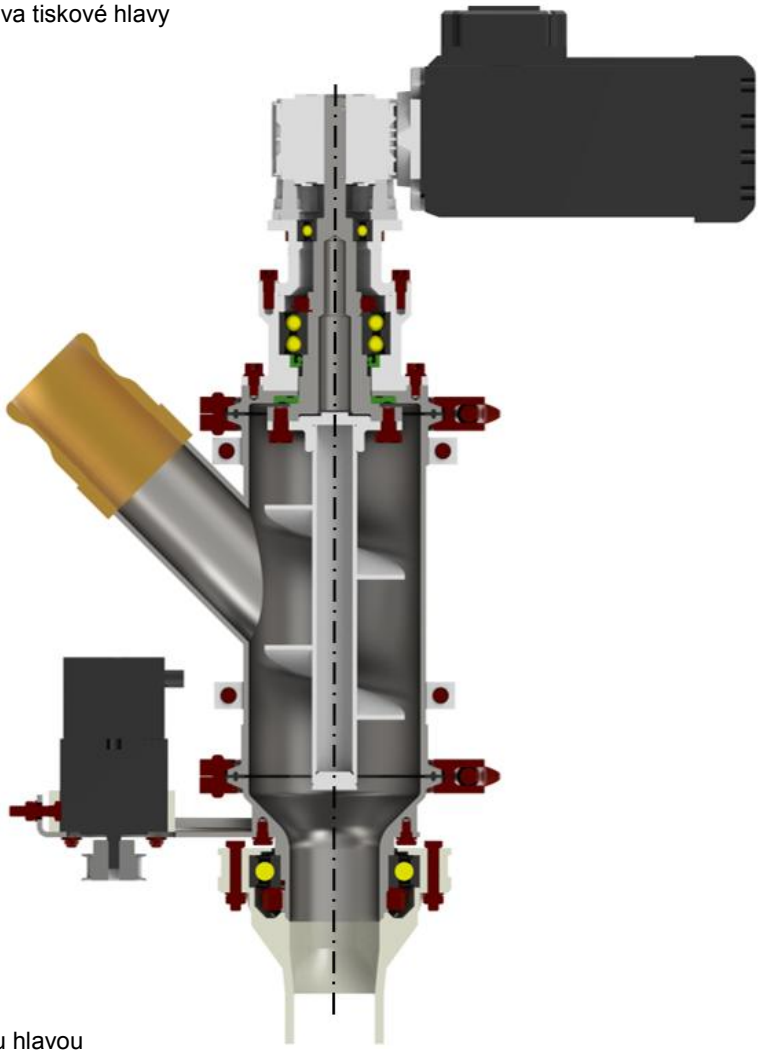
První test byl zaměřen na schopnost zařízení tisknout množství dopravovaného materiálu v intervalu (0,5– 2 $m^3 \cdot h^{-1}$). Tisková hlava disponovala dostatečným rozsahem otáček šneku pro tisk požadovaného množství materiálu, limitem bylo pouze použité čerpadlo na beton. Z důvodu možnosti nastavení nejnižšího možného množství materiálu podávaného čerpadlem na hodnotu cca 0,7 $m^3 \cdot h^{-1}$, nebylo možné stanovit vhodné provozní nastavení tiskové hlavy pro hodnotu 0,5 $m^3 \cdot h^{-1}$.

Ověření funkčnosti natáčecího mechanismu proběhlo při konstantním nastavení množství dopravovaného materiálu na hodnotu 2 $m^3 \cdot h^{-1}$, přičemž otáčky výstupní trysky byly regulovány v intervalu (0–2 s^{-1}) a byl pozorován chod mechanismu. V průběhu měření nebyly pozorovány žádné viditelné vady navrženého zařízení.

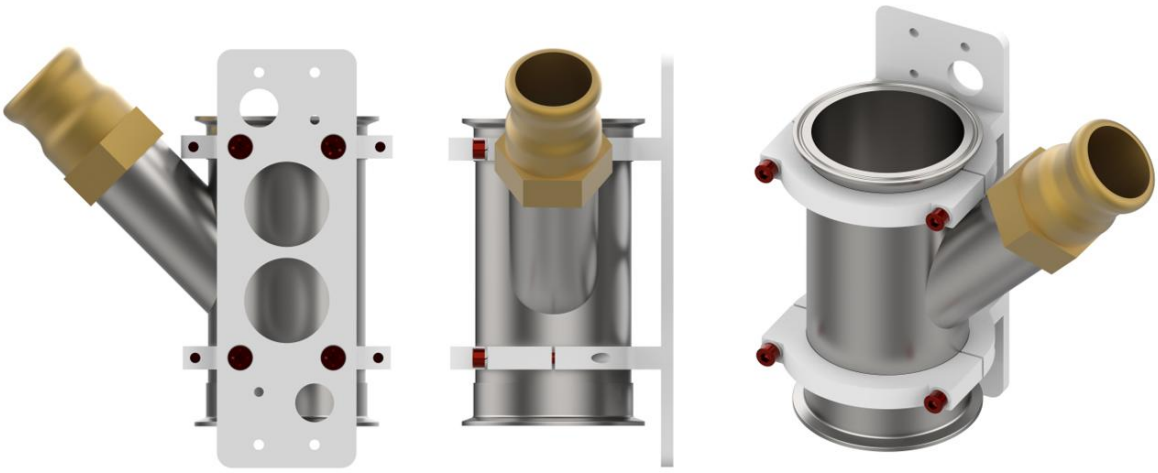
Poslední provedený test byl zaměřen na tisk reálného objektu. Pomocí tiskové hlavy byly postupně vrstveny jednotlivé výnosy na sebe a byl pozorován chod zařízení a stabilita tisknutého objektu. Tisková hlava opět vykazovala bezproblémový chod, při tisku testovacího objektu bylo pouze sníženo množství tisknutého materiálu (vůči předpokládanému, vypočtenému z dat naměřených v Protokolu 2) z hodnoty nastavení čerpadla 4 na 3,25 z důvodu přetékání vrstev. Stabilita tisknutého objektu se Směsí 1 selhávala při tisku sedmé až osmé vrstvy. Finální objekt je tvořen šesti vrstvami materiálu.



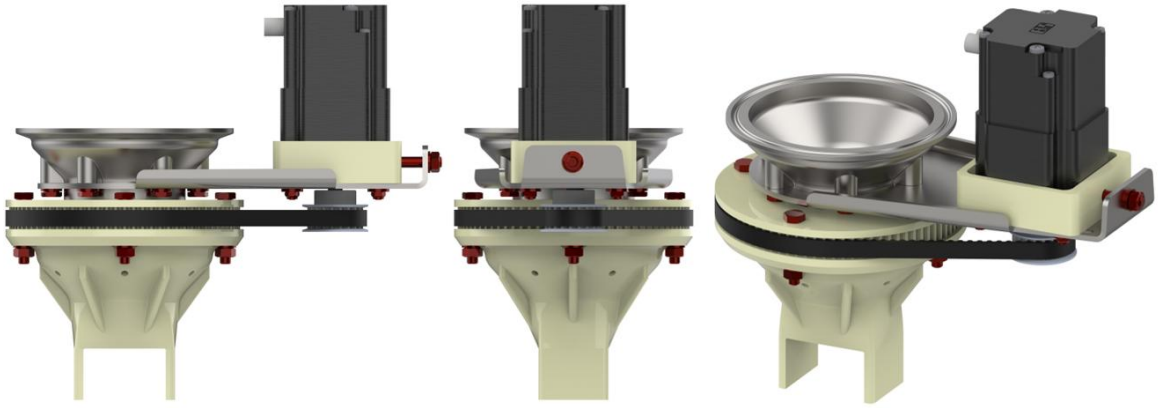
Obr. 1 Hlavní sestava tiskové hlavy



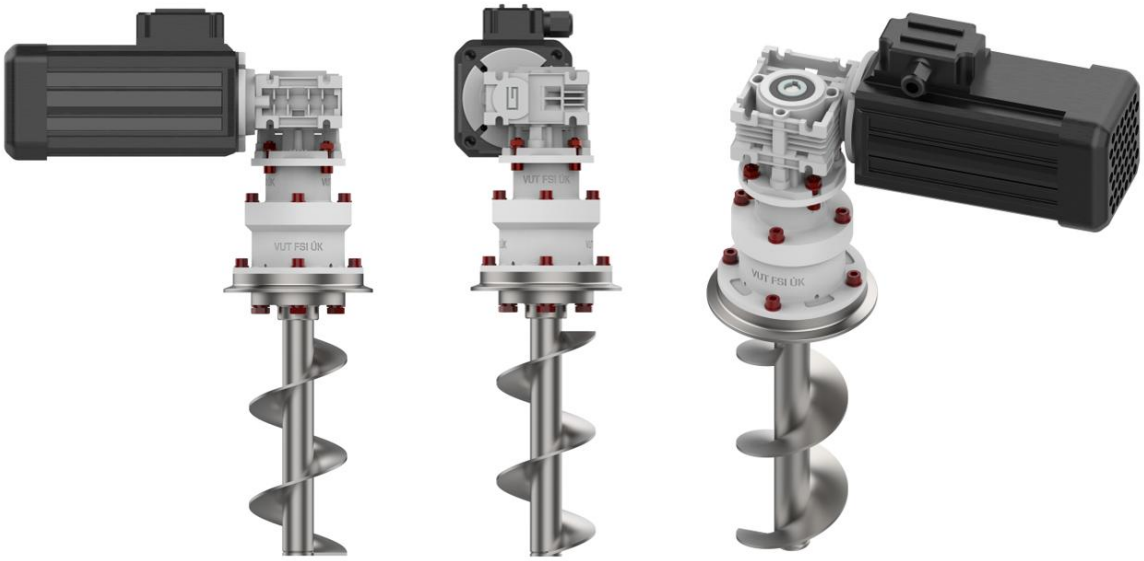
Obr. 2 Řez tiskovou hlavou



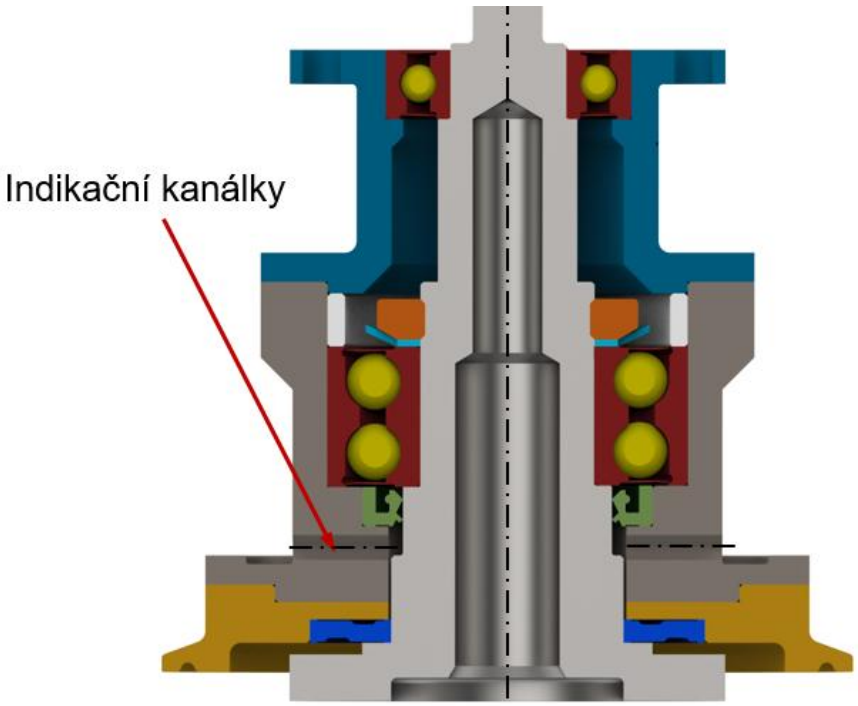
Obr. 3 Tělo tiskové hlavy



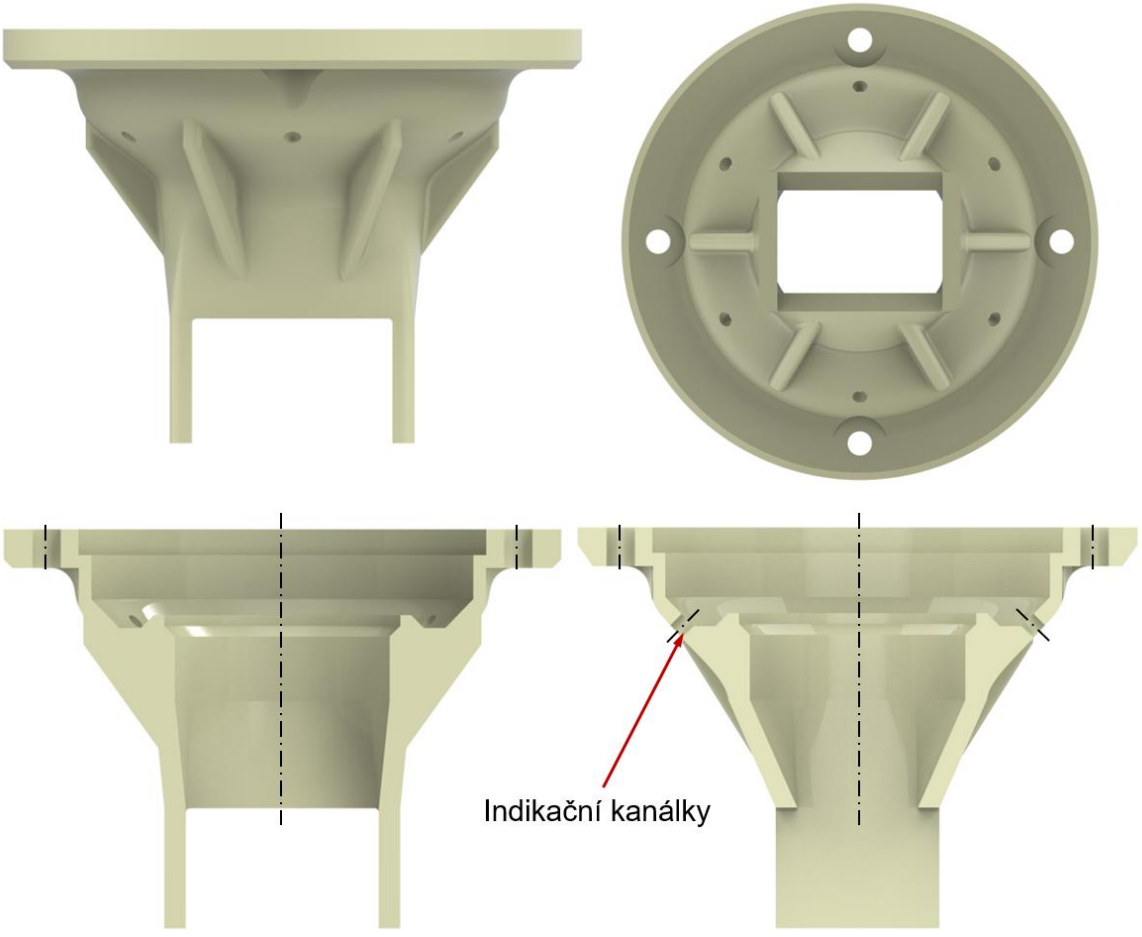
Obr. 4 Natáčecí mechanismus



Obr. 5 Uložení šneku

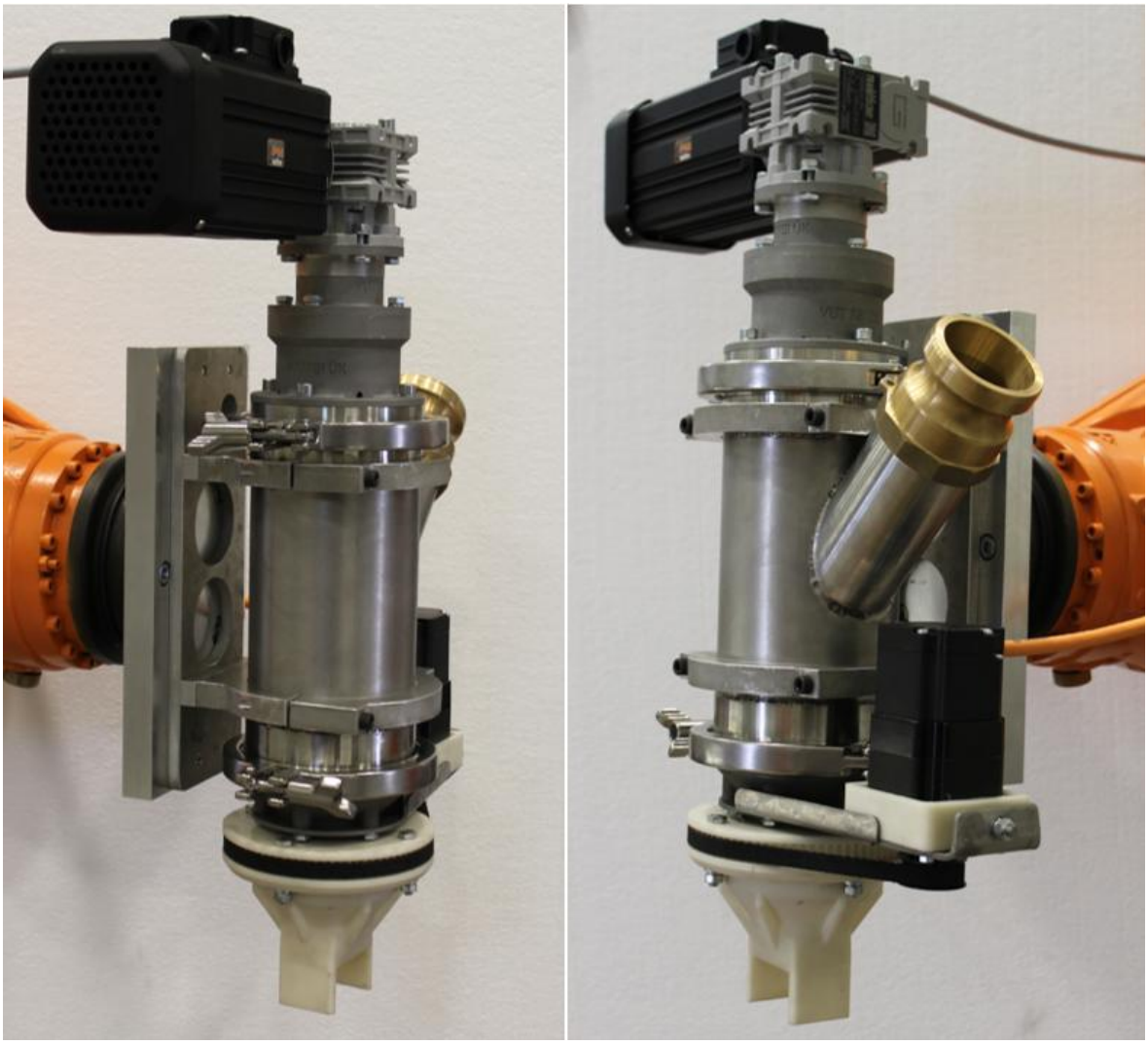


Obr. 6 Řez uložením - indikační kanálky

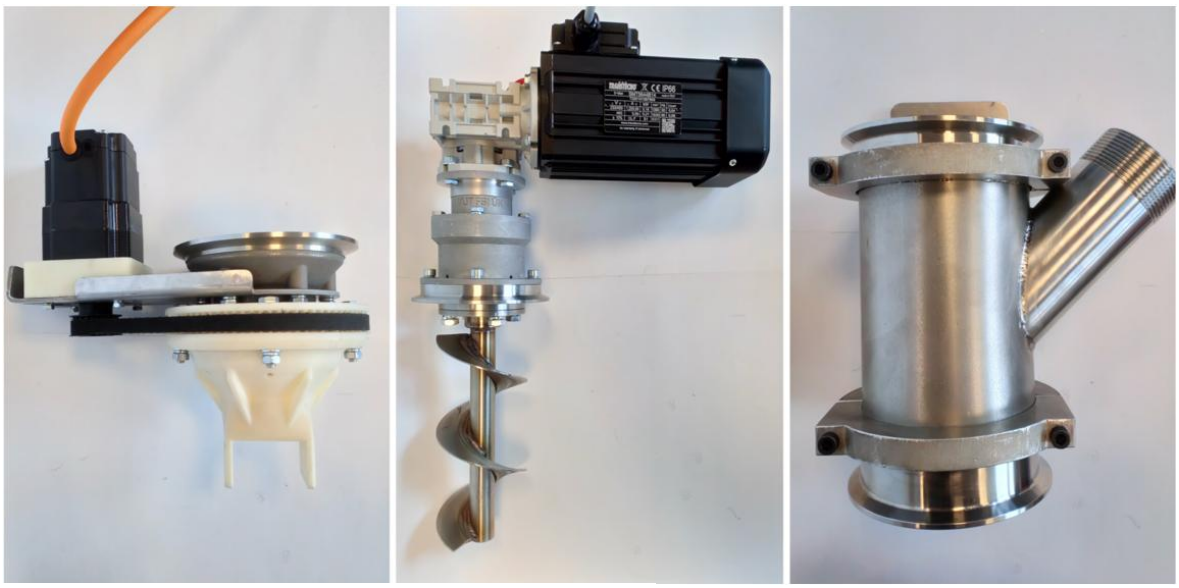


Obr. 7 Tryska 40x28 mm - indikační kanálky

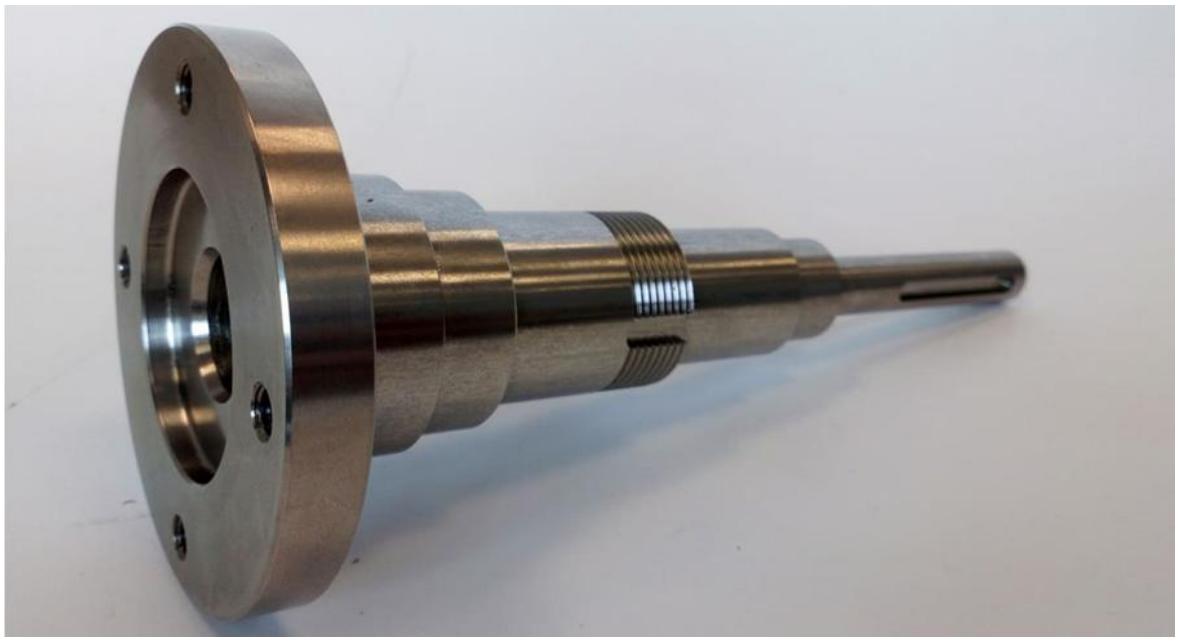
Příloha 5 - Fotodokumentace tiskové hlavy



Obr. 1 Sestavená tisková hlava



Obr. 2 Hlavní montážní celky tiskové hlavy

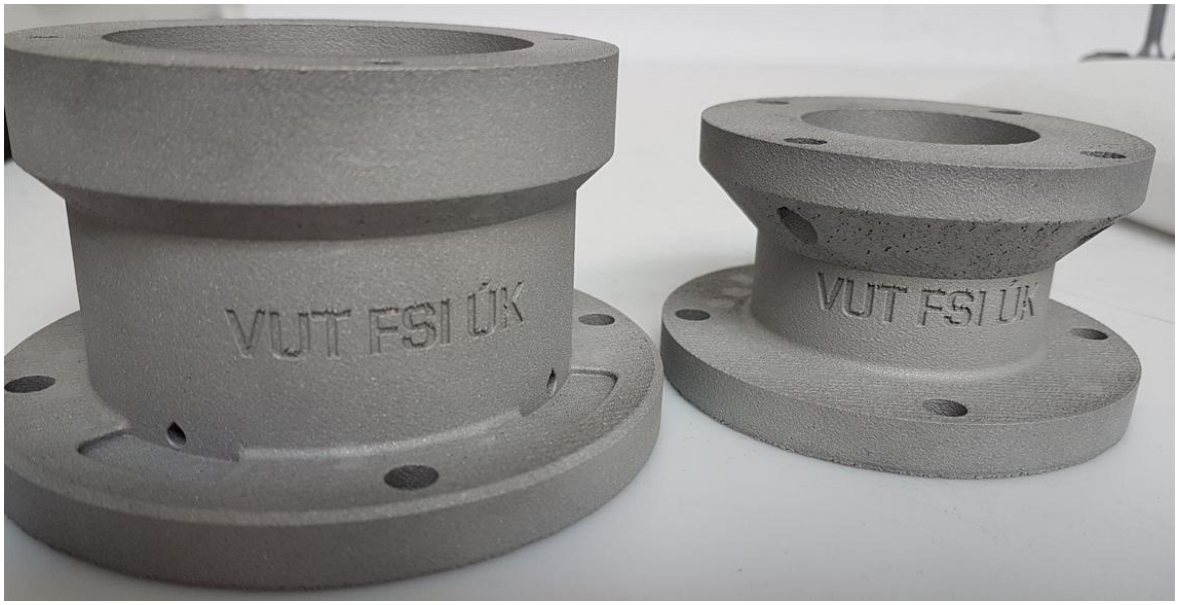


Obr. 3 Hřídel

Obr. 4 Víko s CLAMP přírubou

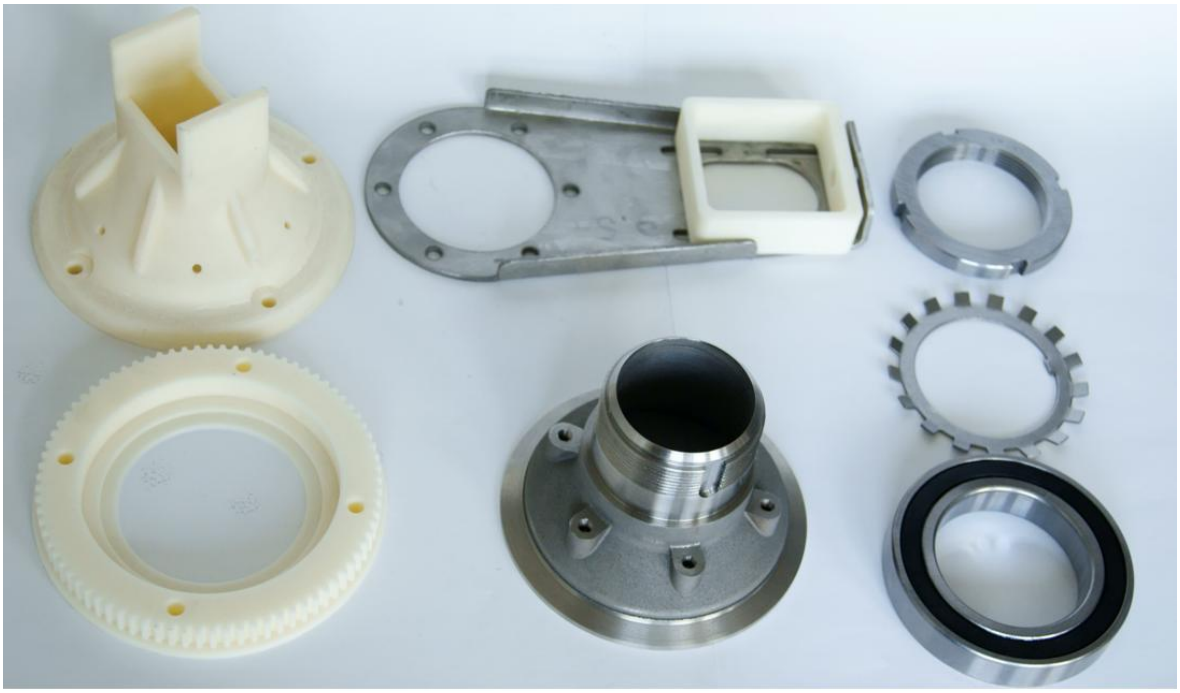
Obr. 5 Víko s CLAMP přírubou

Obr. 6 Tělo tiskové hlavy + šnek

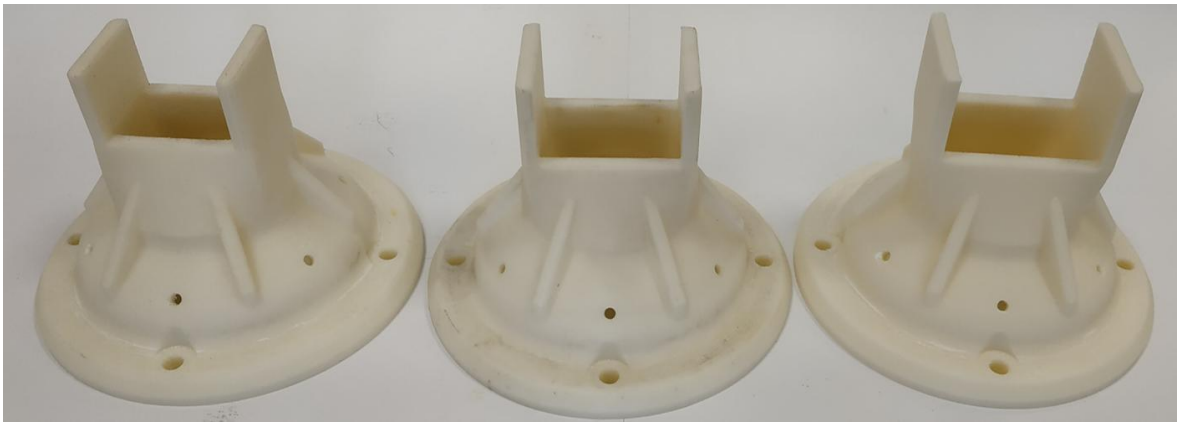


Obr. 7 Ložiskové domky

Obr. 8 Zúžení pod ložisko



Obr. 9 Díly natáčecí mechanismus



Obr. 10 Trysky 40x24, 45x28 a 50x30 mm