

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 VELKOROZMĚROVÝCH DÍLŮ Z BETONOVÉ SMĚSI

MECHANICAL DESIGN OF 3D PRINTER HEAD FOR MANUFACTURING OF CONCRETE PARTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jakub Slavíček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. David Paloušek, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Jakub Slavíček**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. David Paloušek, Ph.D.**
Akademický rok: 2017/18

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 bakalářské práce:

Konstrukce tiskové hlavy pro 3D tisk velkorozměrových dílů z betonové směsi

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

3D tisk se začíná uplatňovat i v odvětvích jako jsou architektura a stavební průmysl. Stavba domů aditivním způsobem je již realizována několika firmami v Číně, Rusku nebo USA. Konstrukci tiskové hlavy určené pro stavební hmoty předurčuje způsob stavby a postup práce se stavebním materiálem. Při konstrukci tiskové hlavy je nutné zohlednit zejména časově závislé materiálové vlastnosti tisknuté směsi a objem materiálu, který musí být doručen na požadované místo v určitém časovém intervalu.

Typ práce: vývojová – konstrukční

Cíle bakalářské práce:

Hlavním cílem práce je navrhnout konstrukci experimentální tiskové hlavy pro kontinuální 3D tisk velkorozměrných betonových dílců s těmito parametry: konstrukce hlavy modulární, minimální rychlost vytlačování 0,5 m³·h⁻¹, průměr trysky 50 mm, systém pro aplikaci aditiv, zajištění promíchání směsi v hlavě.

Dílčí cíle bakalářské práce:

1. Rešerše současných řešení,
2. Návrh dvou konstrukčních variant,
3. 3D model a dokumentace sestavy 3D tiskové hlavy

Požadované výstupy: průvodní zpráva, výkres sestavení.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2018.pdf

Seznam doporučené literatury:

KLOSKI, Liza Wallach a Nick KLOSKI. Začínáme s 3D tiskem. Brno: Computer Press, 2017, 211 stran : ilustrace. ISBN 978-80-251-4876-1.

LIPSON, Hod a Melba KURMAN. Fabricated: the new world of 3D printing ; [the promise and peril of a machine that can make (almost) anything]. Indianapolis: Wiley, 2013, xiv, 302 s., [8] obr.příl. : il., ; 22 cm. ISBN 978-1-118-35063-8.

BRENT STUCKER. Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing. Springer Verlag, 2010. ISBN 1441911197.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá konstrukčním návrhem modulární tiskové hlavy určené pro 3D tisk cementových směsí. Tisková hlava je určena pro kontinuální tisk cementové směsi s obsahem kameniva a příměsí urychlovače tuhnutí. Hlavní funkcí tiskové hlavy je extruze výsledné směsi při určených parametrech tisku. V práci je provedena rešerše zabývající se existujícími řešeními 3D tisku betonu, možnostmi dopravy betonu a vlastnostmi betonových směsí. V druhé kapitole je provedena analýza poznatků z rešeršní části práce a stanovení faktorů ovlivňujících výslednou extruzi betonu. Praktická část práce se pak zabývá stanovením základních parametrů tisku a možných řešení tiskové hlavy a následně konstrukčním řešením zvoleného koncepčního návrhu včetně kontrolních výpočtů.

KLÍČOVÁ SLOVA

3D tisk betonu, aktivní tisková hlava se šnekovým pohonem, aditivní technologie

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with a structural design of modular printer head used for 3D print of cementitious mixture. Printer head is designed for continuous printing of cementitious mixture with added crushed stone and accelerator. The main function of printer head is extrusion of the final mixture with established print parameters. In the thesis, the research was conducted into existing 3D concrete printing methods, possibilities of concrete transportation and material characteristics. The analysis is carried out in the second chapter, where the knowledge from the first chapter is evaluated and factors influencing the extrusion of concrete are defined. The design part of thesis specifies basic printing parameters and contains different alternatives of solution. The chosen conceptual solution is elaborated in detail and construction solution includes verifying calculations.

KEY WORDS

3D concrete print, active printer head with screw drive, additive manufacturing



BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

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



PODĚKOVÁNÍ

Touto cestou bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Davidu Palouškovi, Ph.D. za odborné vedení práce a cenné rady. Dále děkuji Ing. Arnoštovi Vespalcovi za spolupráci a v neposlední řadě bych chtěl poděkovat rodině a přítelkyni za trpělivost a podporu.

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci na téma *Konstrukce tiskové hlavy pro 3D tisk velkorozměrových dílů z betonové směsi* vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Davida Palouška, Ph.D. a použil při tom pramenů uvedených v seznamu použitých zdrojů.

V Brně 17. května 2018

.....
Jakub Slavíček



OBSAH

1 ÚVOD	13
2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	14
2.1 Tisková hlava	14
2.1.1 Aktivní tisková hlava	14
2.1.2 Pasivní tisková hlava	16
2.1.3 Metoda Contour Crafting	16
2.2 Třídídimenzionální systém polohování tiskové hlavy	17
2.2.1 Rámové řešení	17
2.2.2 Výsuvné otočné rameno	18
2.2.3 Portálový systém	19
2.2.4 Robotické rameno KUKA	20
2.3 Doprava betonových směsí	20
2.3.1 Pístová čerpadla	20
2.3.2 Šneková čerpadla	21
2.3.3 Peristaltická čerpadla	21
2.4 Cementové směsi určené pro tisk	22
2.4.1 Základní složky betonu	22
2.4.5 Rychlost tvrdnutí a tuhnutí betonu	23
2.5 Patenty v oblasti 3D tisku betonu	28
2.5.1 Tisková hlava	28
2.5.2 Třídídimenzionální systém polohování tiskové hlavy	32
2.5.3 Doprava betonových směsí	35
2.5.4 Urychlovače tuhnutí	36
3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	37
3.1 Analýza problému	37
3.2 Cíl práce	37
4 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ	38
4.1 Volba mezi aktivní a pasivní tiskovou hlavou, výběr pohonu	38
4.1. Množství tisknutého materiálu	38
4.1.1 Základní rozvaha	38
4.1.2 Výpočet vertikálního šnekového dopravníku	41
4.4 Uložení šnekového pohonu	45
4.5 Výsledné koncepční návrhy	46
4.5.1 Tisková hlava s míchacím zařízením	46
4.5.2 Tisková hlava bez míchacího zařízení	47
4.6 Uložení hřídele	48
4.6.1 Uložení hřídele č. 1	48
4.6.2 Uložení hřídele č. 2	48
4.7 Zvolená řešení	49
5 Konstrukční řešení	50
5.1 Tělo tiskové hlavy	51
5.2 Uložení hřídele	51
5.2.4 Volba motoru	52
5.2.1 Těsnění	54
5.2.3 Volba ložisek	55
5.2.5 Kontrola hřídele	58

5.3 Tryska	62
6 DISKUZE	63
7 ZÁVĚR	64
8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	65
9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	69
10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	71
11 SEZNAM TABULEK	73
12 SEZNAM PŘÍLOH	74

1 ÚVOD

Aditivní technologie představují dynamicky se rozvíjející odvětví průmyslu, které nabízí řadu nových technologických možností. Novým odvětvím je i 3D tisk cementových směsí. Stavba domů aditivním způsobem by do budoucna mohla představovat alternativu ke klasickým stavebním postupům a již nyní je realizována několika firmami v Rusku, Číně nebo USA. Tento způsob stavby domů nabízí značné snížení nákladů na stavbu a urychlení výstavby. Využitím aditivního způsobu stavby domů odpadají přidružené práce, jako je stavba bednění, přeprava stavebních hmot v rámci stavby nebo neustálé měření. Při současném trendu rychlého růstu populace bude do budoucna nutností redukovat spotřebu stavebních materiálů a urychlit proces výstavby domů, což by právě tato technologie mohla umožnit. Další oblastí využití 3D tisku betonu může být umělecká tvorba.

Tato práce se zabývá konstrukčním návrhem modulární tiskové hlavy určené pro kontinuální tisk cementové směsi s obsahem kameniva. Tisk betonové směsi za použití této tiskové hlavy bude probíhat bez přerušení, materiál k tiskové hlavě bude dopravován čerpadlem na beton. Tisková hlava je určena pro tisk velkorozměrových betonových dílů, jejich velikost bude omezena velikostí polohovacího zařízení, které bude tiskovou hlavu unášet.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Tisková hlava

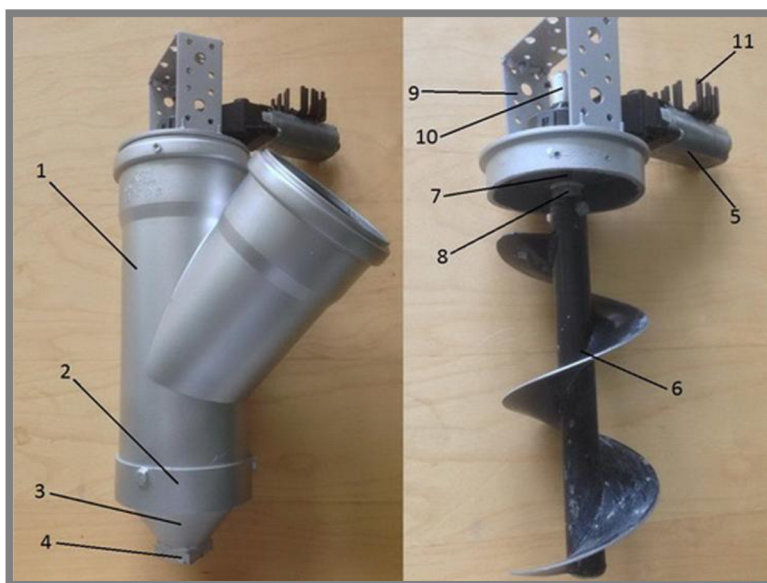
Tisková hlava je zařízení určené k nanášení betonu při definované rychlosti vytlačování na určené místo. Polohování tiskové hlavy zajišťuje externí zařízení v podobě robotického ramene nebo např. pohyblivé rámové konstrukce, ke které je tisková hlava připevněna. Tisková hlava se obecně skládá z trysky, těla tiskové hlavy, příruby, ke které je připojena přívodní hadice a popřípadě pohonné jednotky a hnacího zařízení. Koncová tryska tvaruje beton nanášený do stavěcího prostoru. Tryska může mít jednoduchý kruhový průřez nebo může beton tvarovat do speciálních tvarů. K dosažení specifických tvarů se buď využívá přímo tvaru koncové trysky, nebo se beton tvaruje pomocí přídavných "hladítek", viz contour crafting. Tiskové hlavy můžeme rozdělit do dvou základních skupin na aktivní a pasivní. [1] Pojem aktivní znamená, že tisková hlava obsahuje svůj vlastní mechanismus pro dávkování betonu a dále pak mechanismus pro jeho tvarování. Pasivní tisková hlava má pak za úkol pouze tvarovat přivedený beton do specifické podoby a jeho přiváděné množství je plně závislé na externím zařízení v podobě pumpy na beton.

2.1.1 Aktivní tisková hlava

Aktivní tisková hlava obsahuje mechanismus, který upravuje množství materiálu protlačovaného tryskou. Tento mechanismus může být založen na systému pístového nebo šnekového dávkování betonu, nesmí být prostorově a hmotnostně náročný, protože celá tato konstrukce bude připevněna k nosnému zařízení, které má své limity.

Aktivní tisková hlava se šnekovým pohonem

Šnekové řešení dávkování betonu disponuje jednoduchou konstrukcí, je snadno ovládatelné regulací otáček a je vhodné i pro dopravu nehomogenních materiálů. [2]



Obr. 2-1 Aktivní tisková hlava se šnekovým pohonem [2]

Aktivní tisková hlava na Obr. 2-2 byla vyvinuta skupinou studentů z Barlett School of Architectur za účelem tvorby nových struktur v architektuře. Slouží jako nástroj k tvorbě uměleckých děl nebo různých bytových doplňků. Tato tisková hlava kombinuje klasický 3D tisk betonových směsí s nanášením podpor, které slouží jako nosná podpěra pro další nanášené vrstvy betonu. Tisková hlava obsahuje šnekové zařízení, které dávkuje tisknutou směs a dále pak systém aplikace tmele, který má za úkol držet jednotlivé částice granulového podpůrného materiálu pohromadě. Po skončení tisku je podpůrný granulový materiál odstraněn a zůstane pouze betonový objekt. Výsledkem tohoto systému 3D tisku betonu pak mohou být struktury obsahující různé dutiny a výčnělky do prostoru. [3]



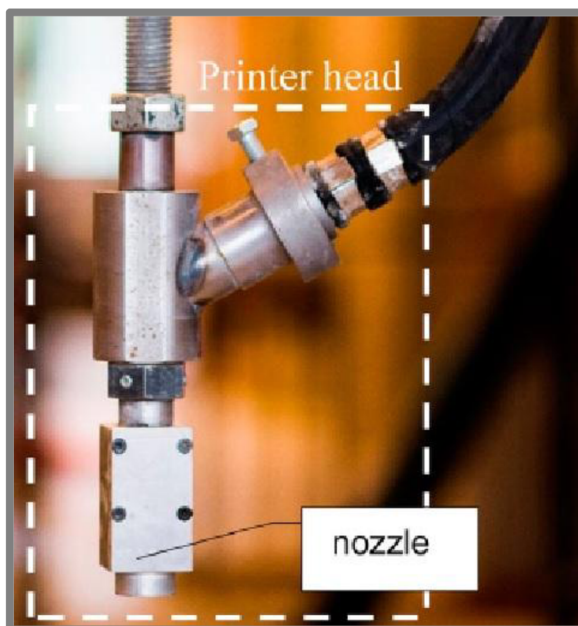
Obr. 2-2 Aktivní tisková hlava, tisk s podporami [3]

Aktivní tisková hlava s pístovým pohonem

Pístové řešení je prostorově a hmotnostně náročnější zejména z důvodu hmotnosti materiálu obsaženého v pístu tiskové hlavy. Aktivní tisková hlava s pístovým pohonem není vhodná pro tisk dílů s velkým objemem materiálu z důvodu přerušování tisku vlivem plnění válce, avšak díky jednoduchosti konstrukce je vhodným řešením pro experimentální tiskové hlavy určené ke zkoumání chování materiálu protlačovaného tryskou o určitém průřezu. Takováto tisková hlava byla odzkoušena na robotickém pracovišti NETME Center VUT, kde bylo provedeno několik experimentů zabývajících se vlastnostmi tisknutého materiálu při průchodu výstupní tryskou a jeho geometrií po vynesení na podložku.

2.1.2 Pasivní tisková hlava

Hlavní funkcí pasivní tiskové hlavy je tvarovat tisknutý beton. V podstatě se jedná pouze o trysku spojenou s přívodní hadicí. Tryska může být kruhového průřezu, tudíž není nutné otáčet tiskovou hlavou v průběhu extruze betonu (ve všech směrech tisku bude mít výnos stejný tvar), nebo může mít specifický tvar, poté je nutné opatřit tiskovou hlavu zařízením, které bude natáčet tiskovou hlavu tak, aby bylo dosaženo požadovaného tvaru tisknutého betonu. Tato tisková hlava tedy zajišťuje pouze tvarování přichozícího množství betonu. Z toho vyplývá, že 3D tiskárna opatřená pasivní tiskovou hlavou musí nutně mít externí zařízení - pumpu na beton, která bude doručovat beton k trysce a bude určovat množství betonu tryskou protlačeného. Za pasivní tiskovou hlavu můžeme považovat i tisk metodou contour crafting. [4]



Obr. 2-3 Pasivní tisková hlava [4]

2.1.3 Metoda Contour Crafting

Za vynálezce metody contour crafting je považován profesor vyučující na University of Southern California Behrokh Khosnevis, který je držitelem více než 100 patentů v oblasti robotiky, automatizace a výrobních technologií. [5] Technologie CC byla technologie původně určená pro výrobu prefabrikovaných betonových dílů, později pak upravena na rychlou výstavbu celých domů. Je to technologie založená na počítačem řízeném procesu extruze materiálu, který je z tiskové hlavy vytlačován na místo určené v trojrozměrném prostoru pomocí systému polohování. Tisková hlava metody contour crafting má oproti jednoduché konstrukci aktivní nebo pasivní tiskové hlavy navíc přídatná "hladítka", která tvarují betonovou směs při extruzi, což umožňuje tisknout velké množství materiálu při zachování vysoké geometrické přesnosti výnosu. Beton je k tiskové hlavě přiváděn pomocí externí pumpy na beton, která řídí množství vytlačovaného betonu. [6] Metodou CC je možné tisknout stěny, které jsou skloněny pod určitým úhlem, je možné vytvářet plynulá zaoblení, nebo různé další tvary výnosu. Tato metoda je využívána zejména pro tisk

velkorozměrových objektů, přičemž je možné dávkovat velké množství materiálu najednou v rámci jednoho výnosu. Tato metoda se využívá u sériového tisku bloků, příček nebo celých domů.



Obr. 2-4 Tisková hlava - metoda contour crafting [6]

2.2 Třídímnzionalní systém polohování tiskové hlavy

2.2

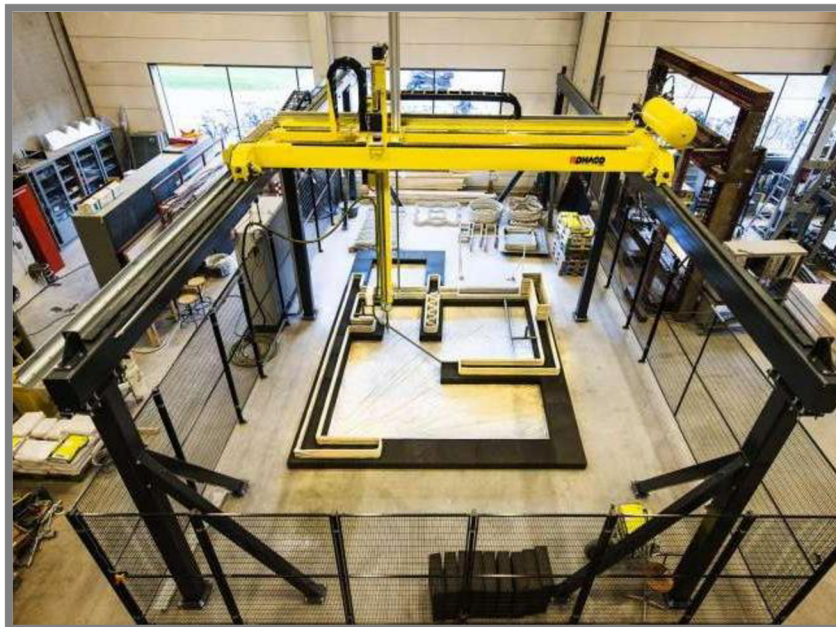
Polohování tiskové hlavy můžeme rozdělit do dvou skupin podle použitého souřadnicového systému, ve kterém tiskárna pracuje. Buď je to kartézský souřadnicový systém nebo polární souřadnicový systém. Většina velkorozměrných zařízení určených pro tisk betonu pak využívá kartézského souřadného systému z důvodu větší velikosti a únosnosti konstrukcí.

2.2.1 Rámové řešení

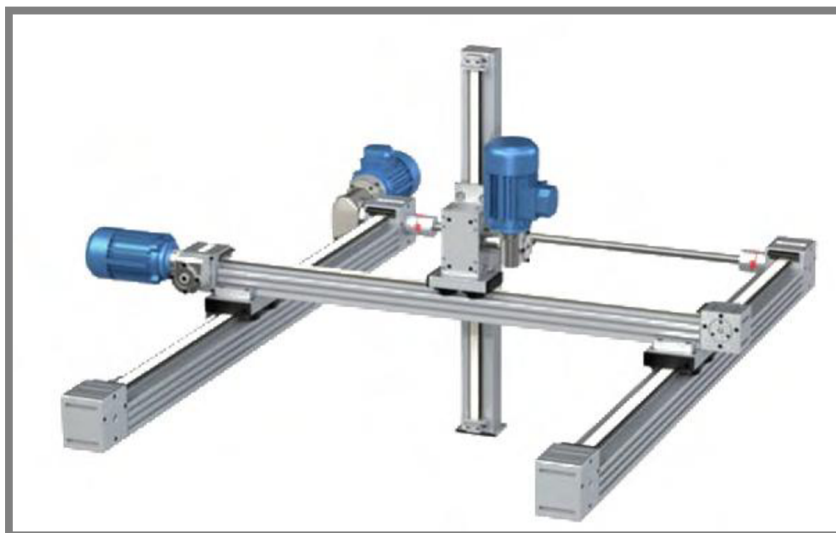
2.2.1

Jedním z možných řešení třídímnzionalního polohování tiskové hlavy je rámová koncepce. Principem tohoto modelu je, že prostor určený pro tisk je uvnitř svařeného nebo smontovaného rámu, po němž se pohybuje tisknoucí hlava za pomoci soustavy lineárních vedení poháněných počítačově řízenými krokovými motory. Rám může být tvořen svařovanou konstrukcí z různých ocelových profilů nebo příhradovou konstrukcí. Pohyb tiskové hlavy je zajištěn pomocí systému lineárních vedení, která jsou k rámu připevněna. [7] Výhodou tohoto řešení je možnost nadímnzování rámu tak, aby unesl potřebné zatížení od tiskové hlavy a zásobníku na beton. Hlavní nevýhody jsou prostorová objemnost a jednoúčelovost zařízení. Rámová konstrukce

je vhodná pro tisk objemnějších objektů, u kterých je potřeba větší množství přiváděného betonu jako například prefabrikované stěny nebo jiné velkorozměrové tvarové prvky. Nevhodná je pro stavbu domů z důvodu špatné mobility celé konstrukce a velikosti nosných prvků.



Obr. 2-5 Rámová konstrukce tiskárny na beton [7]



Obr. 2-6 Princip funkce rámové konstrukce [8]

2.2.2 Výsuvné otočné rameno

Dalším možným řešením je polohování tiskové hlavy pomocí konstrukce výsuvného ramene. Toto konstrukční řešení využívá systému polárních souřadnic, přičemž konstrukce ramene je umístěna doprostřed stavěcího prostoru a výsuvné rameno je schopno pomocí vysunování a otáčení ramena kolem své základny polohovat

tiskovou hlavu v rozsahu 360°. [9] Výhodou tohoto řešení je úsporná velikost celé konstrukce a jednoduchá instalace zařízení na místo tisku. Problém při tisku betonu s výsuvným ramenem je potřebné místo pro základnu stroje uvnitř stavěcího prostoru, neschopnost stroje tisknout v těsné vzdálenosti od jeho základny a požadovaná malá hmotnost tiskové hlavy.



Obr. 2-7 Výsuvné otočné rameno [9]

2.2.3 Portálový systém

2.2.3

Pro velkoobjemové stavěcí prostory existuje řešení využívající systém dvou rovnoběžných kolejí. Po těchto kolejích se pohybují dva sloupky, čímž se vymezuje pohyb osy x. Mezi těmito sloupky se svisle pohybuje příčník, tímto pohybem je vymezena osa z. Poslední osa y je vymezena podél příčníku. Tyto 3 osy plně definují prostorový pohyb tisknoucí hlavy. Pohyblivost celé konstrukce je stejně jako u rámové konstrukce zajištěna systémem lineárních vedení. Výhodou oproti rámové konstrukci je jednodušší manipulovatelnost při přemísťování tiskárny a úspora místa. Toto řešení by mohlo být v budoucnosti využíváno pro sériový tisk domů, již dnes ho využívá metoda contour crafting. [6]



Obr. 2-8 Portálový systém [6]

2.2.4 Robotické rameno KUKA

Robotické rameno KUKA je zařízení obecně využíváno k manipulaci s hmotnými objekty v trojrozměrném prostoru. Robotické rameno však může nahradit jiný z již jmenovaných systémů pouze z části. Robot KUKA KR60HA má maximální tisknutelný prostor 2033 x 2230 x 2429 mm a je zde hmotnostní omezení přenášeného objektu. Nosnost robota je udávána 60kg při poloze poblíž jeho základny a pouhých 30kg v poloze maximální vzdálenosti od základny robota. [10] Tento typ robota je dostupný v NETME centre v areálu VUT a bylo by na něm možné odzkoušet funkčnost navrhnuté tiskové hlavy před konstrukcí nějakého jiného systému polohování. Pro experimentální odzkoušení tiskové hlavy je využití robotického ramene vhodné, avšak pro velkorozměrný tisk je toto řešení nedostačující zejména z důvodu malé nosnosti a malého stavěcího prostoru.

2.3 Doprava betonových směsí

Doprava betonové směsi k tiskové hlavě je dalším důležitým aspektem při 3D tisku betonových směsí. Nejpoužívanější čerpadla na beton jsou pístová čerpadla, dále existují čerpadla se šnekovým pohonem nebo čerpadla peristaltická. Existuje velké množství komerčně vyráběných čerpadel na betonové směsi, které se liší především výkonem a druhem čerpaného materiálu.

2.3.1 Pístová čerpadla

Pístová čerpadla dělíme podle druhu pohonné jednotky na dieselová a elektrická, přičemž oba druhy pístových čerpadel se vyrábějí o různých výkonech a velikostech. Základním stavebním prvkem jsou dva válce uloženy vedle sebe s rovnoběžnými osami. Ve válcích se pohybují písty, přičemž první píst materiál podtlakem nasává ze zásobníkové komory a současně druhý materiál vytlačuje do přepravního potrubí. Po vytlačení materiálu z pístu (dosažení horní úvrati) dochází k přemístění pohyblivého kolene přepravního potrubí k druhému válci, který je plný materiálu (nachází se v dolní úvrati) a proces se opakuje. [11] Výhodou těchto čerpadel je možnost nastavení rychlosti čerpání materiálu a stálý průtok materiálu výstupním otvorem.



Obr. 2-9 Dieselové pístové čerpadlo betonu [12]

2.3.2 Šneková čerpadla

Stejně jako pístová i šneková čerpadla mohou být poháněna diesellovým nebo elektrickým motorem o různých výkonech. Princip přepravy betonu je však odlišný. Šnekové čerpadlo na beton nezajišťuje pohyb betonu pohybem pístů ve válcích, ale otáčením šneku uloženého ve žlabu, který se zpravidla nachází pod zásobníkem betonu. Snižováním a zvyšováním otáček šneku můžeme měnit rychlost přepravy materiálu. Dopravované množství bývá menší než u pístových čerpadel, jeho hodnoty se liší podle typu čerpadla. Dopravované množství materiálu se u šnekového čerpadla SP11BHF (Obr. 2-10) pohybuje v intervalu 0 až $15 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. [13]



Obr. 2-10 Šnekové, diesellové čerpadlo na beton SP 11BHF [13]

2.3.3 Peristaltická čerpadla

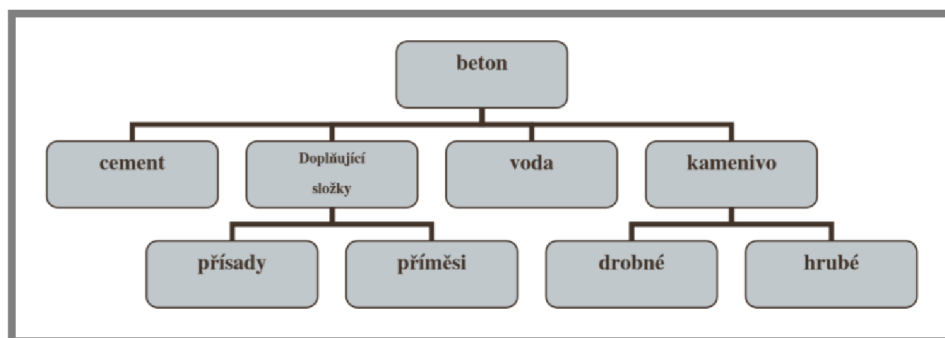
Peristaltické čerpadlo někdy nazýváno též hadicové, je čerpadlo určené pro čerpání různých druhů kapalných látek s možným obsahem pevných částic. Peristaltické čerpadlo je složeno ze speciální pružné hadice a otáčejících se kladek, které mají za úkol hadici proti stěně čerpadla stlačit a posunovat tak materiál umístěný uvnitř hadice. Materiál hadice je podle potřeby přizpůsobován přepravovanému médiu. [14] Peristaltická čerpadla nejsou vhodná pro přepravu betonu s obsahem kameniva z důvodu poškození hadice ostrými výčnělky kameniva.



Obr. 2-11 Peristaltické čerpadlo na beton P 65 [15]

2.4 Cementové směsi určené pro tisk

Pro zajištění správné funkce tiskové hlavy je nutné seznámit se s materiálem, který bude hlava dávkovat. Pro naše účely to bude zejména stavební beton s příměsí kameniva a chemických urychlovačů tuhnutí a tvrdnutí. Beton je kompozitní materiál, jehož základními složkami je voda, cement, kamenivo a doplňující složky. [16] Pro naše účely však bude nutné směs podrobněji charakterizovat a upravit tak, abychom dostali směs, která bude dosahovat uspokojivých mechanických vlastností v horizontu prvních několika hodin a zároveň bude mít dobrou zpracovatelnost. Touto problematikou se zabývá mnoho odborníků, kteří pracují na optimalizaci vlastností betonu na základě požadavků z praxe a neustále přinášejí nová řešení na bázi chemických nebo mechanických vylepšení betonových směsí.



Obr. 2-12 Složení betonu [16]

2.4.1 Základní složky betonu

Základní složky betonu jsou cement, kamenivo, voda a doplňující složky. Abychom získali směs s požadovanými specifickými vlastnostmi, je důležité znát vliv jednotlivých složek na výslednou směs a dodržet jejich poměr při mísení.

Cement

Cement je jemně mletá anorganická látka, jejíž důležitou vlastností je schopnost hydraulického tuhnutí jakožto důsledek hydratace vápenatých silikátů. Cement je tedy pojivo, které po smíšení s vodou postupně tuhne a tvrdne i pod vodou a tím získává své stálé mechanické vlastnosti zejména pevnost. [17] Složení cementu je upravováno normou ENV 197-1, která jasně předepisuje poměrné zastoupení jednotlivých složek cementu. Mezi základní složky cementu patří CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 a další. Podle jejich obsahu ve výsledné směsi se cementy rozdělují do několika skupin, z nichž nejpoužívanější je cement portlandský, dále jsou to cementy vysokopecní, pucolánové, hlinitanové nebo bílé cementy. [16]

Kamenivo

Kamenivo je zrnitý, sypký materiál většinou anorganického původu, který zaujímá 75-80% celkového objemu betonové směsi. Hlavním úkolem kameniva je vytvořit v betonu pevnou kostru s minimálními mezerami mezi jednotlivými částicemi kameniva. Kamenivo můžeme dělit podle různých kritérií jako např. podle frakce,

původu nebo podle objemové hmotnosti. [17] Kamenivo do betonu je definováno normou ČSN EN 12620, která předepisuje požadované vlastnosti.

Voda

Z technologického hlediska dělíme betonářskou vodu na vodu ošetřovací a záměsovou. Ošetřovací voda se používá k ošetření tuhého betonu při jeho tvrdnutí. Beton se po dobu několika dní musí zvlhčovat, aby nedošlo k vyschnutí betonu a přerušení hydratace cementu, čímž by beton ztratil své pevnostní vlastnosti. Voda záměsová je jednou ze základních složek betonu a je dávkována do betonové směsi při jejím mísení. Záměsová voda v betonu plní funkci hydratační a reologickou. Hydratační funkce spočívá v hydrataci cementu, který představuje pojivo betonové směsi. Smísením záměsově vody s cementem dochází k tuhnutí a tvrdnutí směsi. Množství přidané záměsově vody pak výrazně ovlivňuje reologické vlastnosti čerstvého betonu a pevnost betonu po ztvrdnutí. Mezi reologické vlastnosti betonu zahrnujeme vlastnosti týkající se tečení materiálu, vztahy mezi napětím, přetvořením a časem, závislost viskozity na čase. [17]

Přísady a příměsi

Přísady do betonu jsou chemické sloučeniny přidávané za účelem změny specifických mechanických vlastností betonové směsi. Přidávají se do betonu při jeho mísení často jako roztok s vodou. Dávkování těchto přísad zpravidla nepřesahuje 5% hmotnosti přidaného cementu. [17] Přísady dělíme podle specifických vlastností na:

- plastifikátory a superplastifikátory
- urychlovače tuhnutí a tvrdnutí
- provzdušňující přísady
- retardační přísady
- hydrofobizační přísady

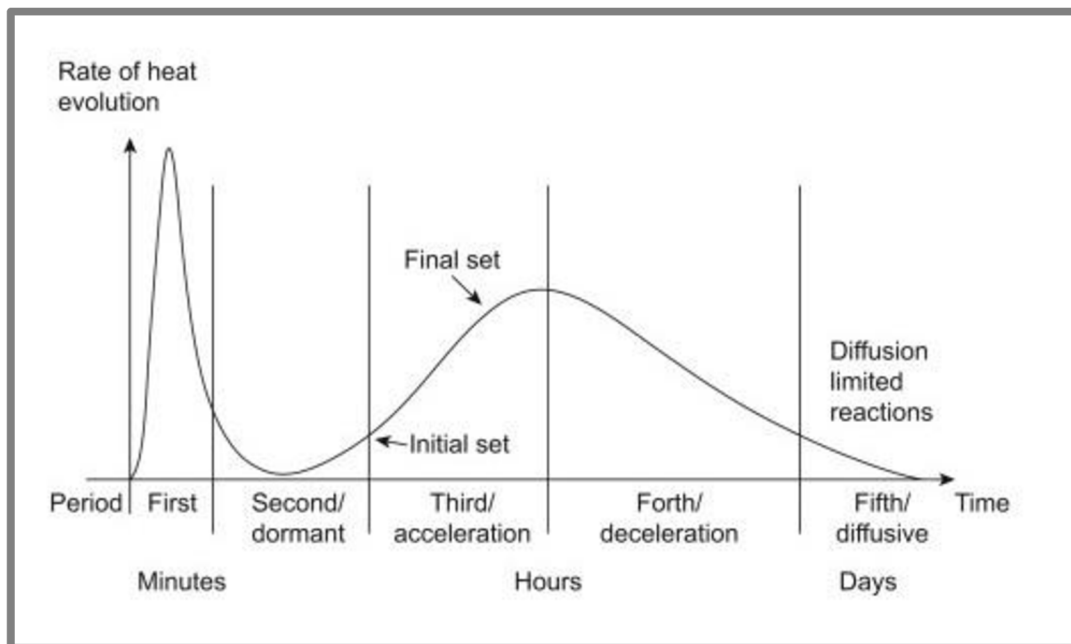
Příměsi jsou na rozdíl od přísad většinou vyráběny ve formě prášku. Tento prášek je přidáván do čerstvé betonové směsi za účelem zlepšení některých mechanických vlastností. [16]

2.4.5 Rychlost tvrdnutí a tuhnutí betonu

Závislost mechanických vlastností tisknuté směsi na čase je jedna z hlavních charakteristik, které je nutné znát pro zajištění správné funkce tiskové hlavy. Tvrdnutí a tuhnutí jsou dvě základní mechanické vlastnosti, které nás u směsi budou zajímat. Rychlost tuhnutí je doba přechodu čerstvého betonu z plastického stavu na stav tuhý a rychlost tvrdnutí je rychlost vývoje počátečních pevností betonu. [16] Vhodná směs by měla ideálně vykazovat dobrou zpracovatelnost při její extruzi na požadované místo a následně by měla rychle tuhnout, aby na ni bylo možné co nejdříve nanést další vrstvu směsi, aniž by došlo ke zborcení vrstvy předchozí. Rychlost tuhnutí směsi je závislá na rychlosti hydratace cementu a lze ovlivnit

základními parametry, jako je výběr použitého cementu, množství přidané vody nebo teplota okolního prostředí. Dále jsou zde další metody zaměřené speciálně na rychlost tuhnutí a to jsou metody proteplování betonu nebo přidávání chemických činidel do betonové směsi.

Závislost hydratačního tepla na čase (Obr. 2-13) charakterizuje kinetiku tepelných změn v betonové směsi po smíchání jeho základních složek. Tato závislost se získává kalorimetrickým měřením vzorků čerstvého betonu. Hydratace cementu se dělí do pěti základních period: počáteční reakce, nečinná perioda, akcelerační perioda, perioda zpomalení a perioda difuzní. První perioda, perioda počáteční reakce, je charakteristická prudkou chemickou reakcí, ke které dochází v prvních několika minutách po zvlhčení cementu. V této fázi dochází k chemické reakci C_3S a vody. [19] Následuje fáze nečinná, ve které dochází k poklesu hydratačního tepla, délka této fáze charakterizuje dobu zpracovatelnosti betonové směsi. Při přechodu z druhé do třetí fáze začíná beton tuhnout. Dochází k opětovnému nárůstu hydratačního tepla vlivem nukleace hydrátu křemičitanu vápenatého CSH a materiál přechází z plastické na tuhou fázi. Ve čtvrté fázi dochází k opětovnému zpomalení reakce, snižování počtu nehydratovaných částic a reakce se pomalu přeměňuje z chemické na difuzní, roste pevnost. Pátá perioda je pak pouze difuzní. Tato perioda probíhá, dokud je k dispozici ve struktuře betonu voda a zbytky nehydratovaných částic cementu. [18]

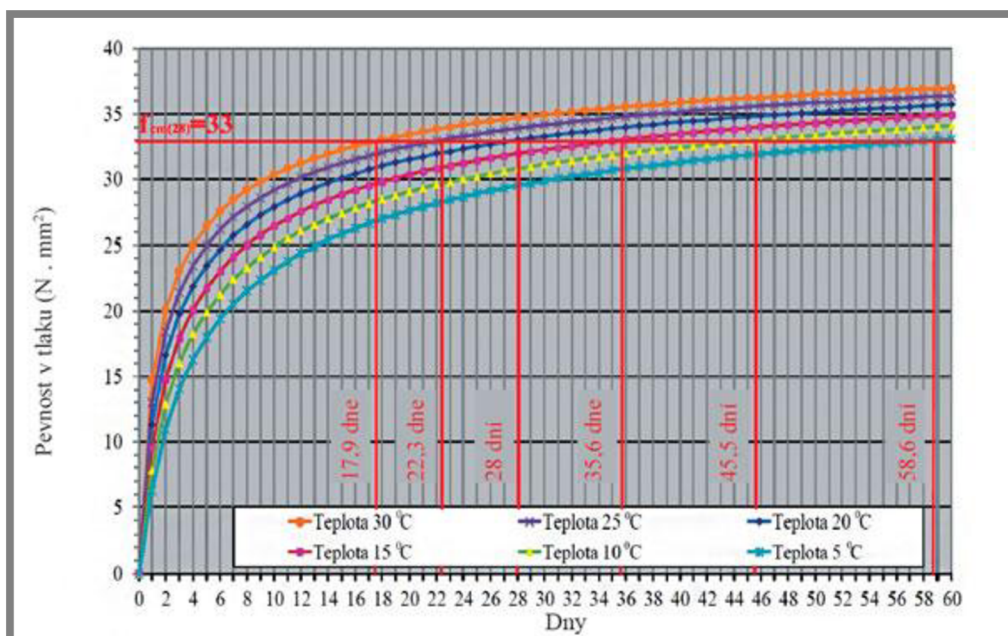


Obr. 2-13 Fáze hydratace cementu [18]

Základní metody urychlování tuhnutí

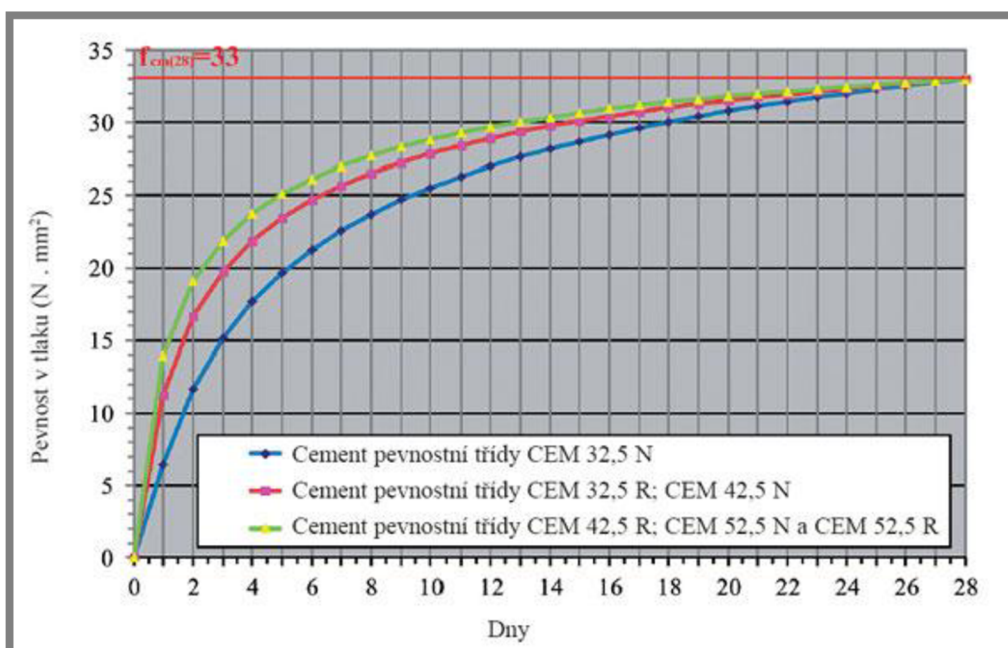
Volba vhodného pojiva je jeden z prvních parametrů při sestavování ideální směsi. U cementu má zásadní dopad na rychlost tuhnutí měrný povrch jeho zrn. Čím větší mají cementová zrna měrný povrch, tím je reaktivnější a rychleji tvrdne. Po výběru druhu cementu lze dále měrný povrch zvýšit také zařazením aktivačního míchání do

technologie zpracování směsi. Aktivační míchání je míchání směsi cementu a kameniva v míchačce při vysokých rychlostech, kdy dochází k rozemílání zrn cementu a tím ke zvyšování měrného povrchu. [20]



Obr. 2-14 Vliv druhu cementu na pevnost v tlaku [21]

Teplota okolního prostředí a teplota vlastní směsi jsou další parametry, které značně ovlivňují rychlost tuhnutí a tvrdnutí betonové směsi. Teplota okolního prostředí hraje velkou roli zejména při betonování ve venkovních prostorech, kde se teplota může znatelně měnit. [21]



Obr. 2-15 Vliv teploty okolí na pevnost v tlaku [21]

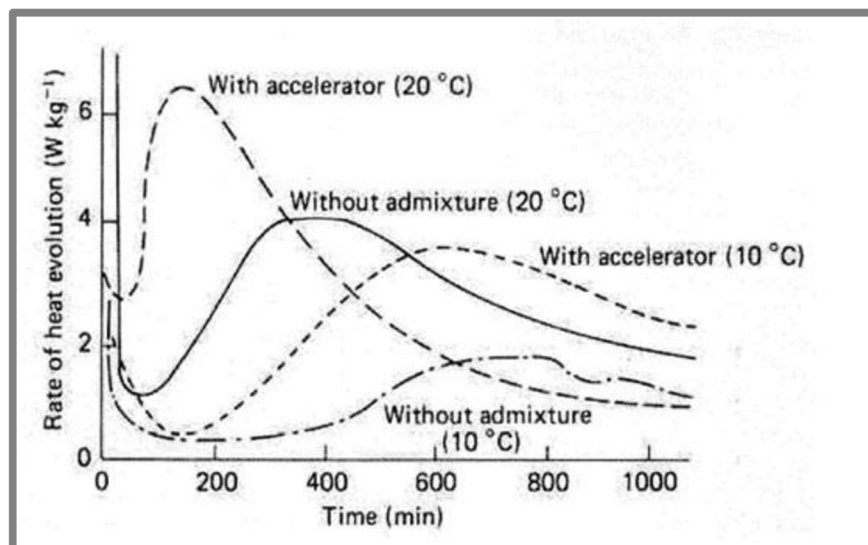
Proteplování betonu

Proteplování betonu je založené na základním principu urychlení chemické reakce zahříváním směsi. Samotné zahřátí betonu uloženého na místě, kde má ztuhnout, však vede k rychlému odpaření vody, což negativně působí na jeho mechanické vlastnosti po vyzrání. Proto se užívá metoda tzv. propařování, což je zahřívání betonu párou, která do betonu dodává potřebnou vlhkost. Tato metoda urychlení tvrdnutí betonu je však velice energeticky náročná a proto se využívá jen zřídka a je nahrazována jinými metodami. [20]

Chemické urychlovače tuhnutí

V dnešní době je použití chemických příměsí nejčastěji užívaná metoda urychlení tuhnutí a tvrdnutí betonu. Do základní betonové směsi se přidá roztok chemického urychlovače s vodou podle předepsaných hodnot výrobcem. Tato směs se kvalitně promíchá a v co nejkratším časovém intervalu se beton dopraví na místo určení z důvodu rychlé změny viskózních vlastností směsi. Dříve hodně využívanou látkou urychlující hydrataci cementu byl chlorid vápenatý. Přidávání chloridu vápenatého do betonu je v dnešní době velice omezeno z důvodu zvýšení koroze ocelových armatur v betonu jeho působením. V dnešní době se proto k hydrataci cementu používají jiná činidla, jako např. vodní sklo, uhličitan sodný, uhličitan draselný, dusitany sodné, alkalické sloučeniny a další. [16] Chemických urychlovačů existuje několik druhů s odlišnými vlastnostmi a způsoby aplikace, které uvádí výrobce podrobněji na obalu výrobku.

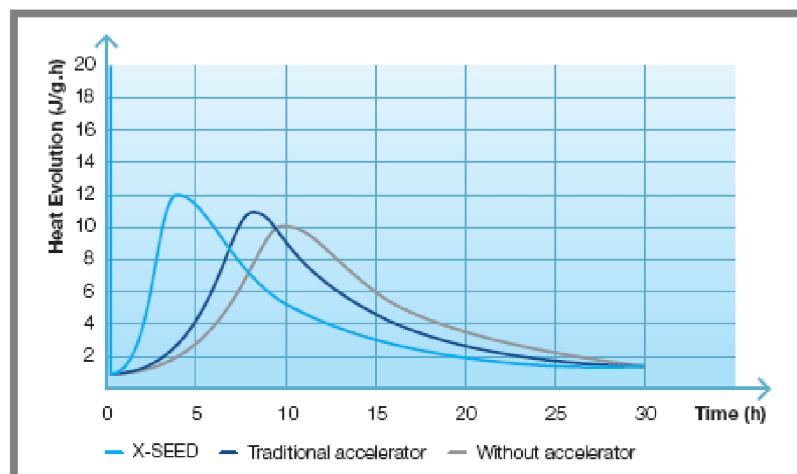
Zvyšování rychlosti tuhnutí směsi je úzce spjato se zvyšováním hydratačního tepla. Hydratace cementu je příčinou tuhnutí a tvrdnutí směsi. Chemickou reakcí slínekových minerálů obsažených v cementu s vodou dochází k tvorbě tuhé struktury cementového kamene. Hlavní složka portlandského cementu C_3S reaguje s vodou a vzniká tak krystalický portlandit a amorfni kalcium hydrosilikát. [16] Tato reakce je doprovázena nárůstem hydratačního tepla a zároveň se zvyšuje tuhost a tvrdost materiálu. V následujícím grafu je vyobrazena závislost nárůstu hydratačního tepla na čase ovlivněna teplotou okolí a použitím přísad urychlujících tuhnutí.



Obr. 2-16 Závislost hydratačního tepla na čase, použití urychlovače tuhnutí. [22]

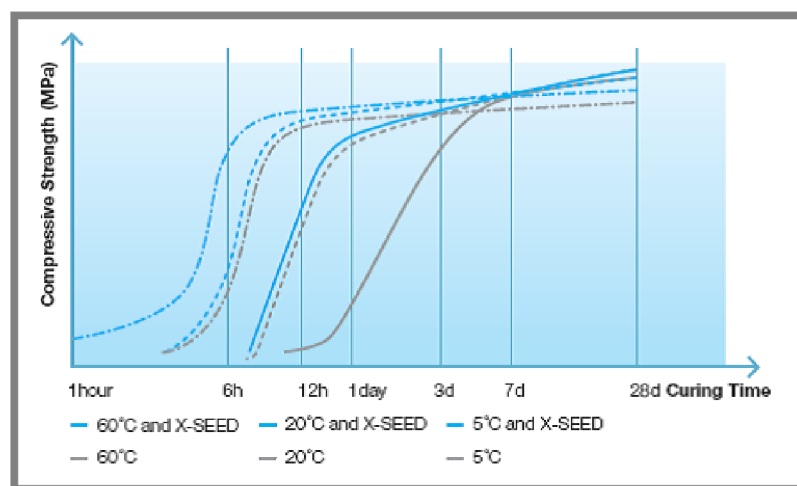
Některé vlastnosti chemických urychlovačů tuhnutí jsou předepsány normou ČSN EN 934-2 + A1. Norma definuje 3 základní parametry, které musí beton obsahující urychlovač tuhnutí splňovat. Beton o složení podle EN 480-1 při 20°C musí začít tuhnout po více než 30 minutách od smíšení. Dále pevnost v tlaku zkušební směsi po 28 dnech musí být větší než 80% pevnosti v tlaku kontrolní směsi. Poslední kritérium, které norma udává, reguluje obsah vzduchu v čerstvém betonu. Objem vzduchu ve zkušební směsi může být nejvýše o 2% větší než ve směsi kontrolní. [23]

Přířada do betonu X-SPEED patentovaná firmou BASF využívá principu vnášení nukleačních jader do betonové směsi, čímž dochází k rychlejší hydrataci cementu a k urychlení tuhnutí a tvrdnutí. Vnesení většího počtu nukleačních jader do směsi vede k tomu, že látka začne krystalizovat z většího počtu krystalizačních zárodků a proces tuhnutí je rychlejší. Výhodou této metody urychlování tuhnutí je nižší energetická náročnost a jednoduchá aplikace v praxi. [24]



Obr. 2-17 Vliv akcelérátoru X-SPEED na vývoj hydratace [24]

V technické praxi se využívá kombinace základních metod urychlení tuhnutí s metodami chemickými. Tímto postupem jsem schopni dostat nejlepší výsledky požadovaného procesu tuhnutí a tvrdnutí betonu.



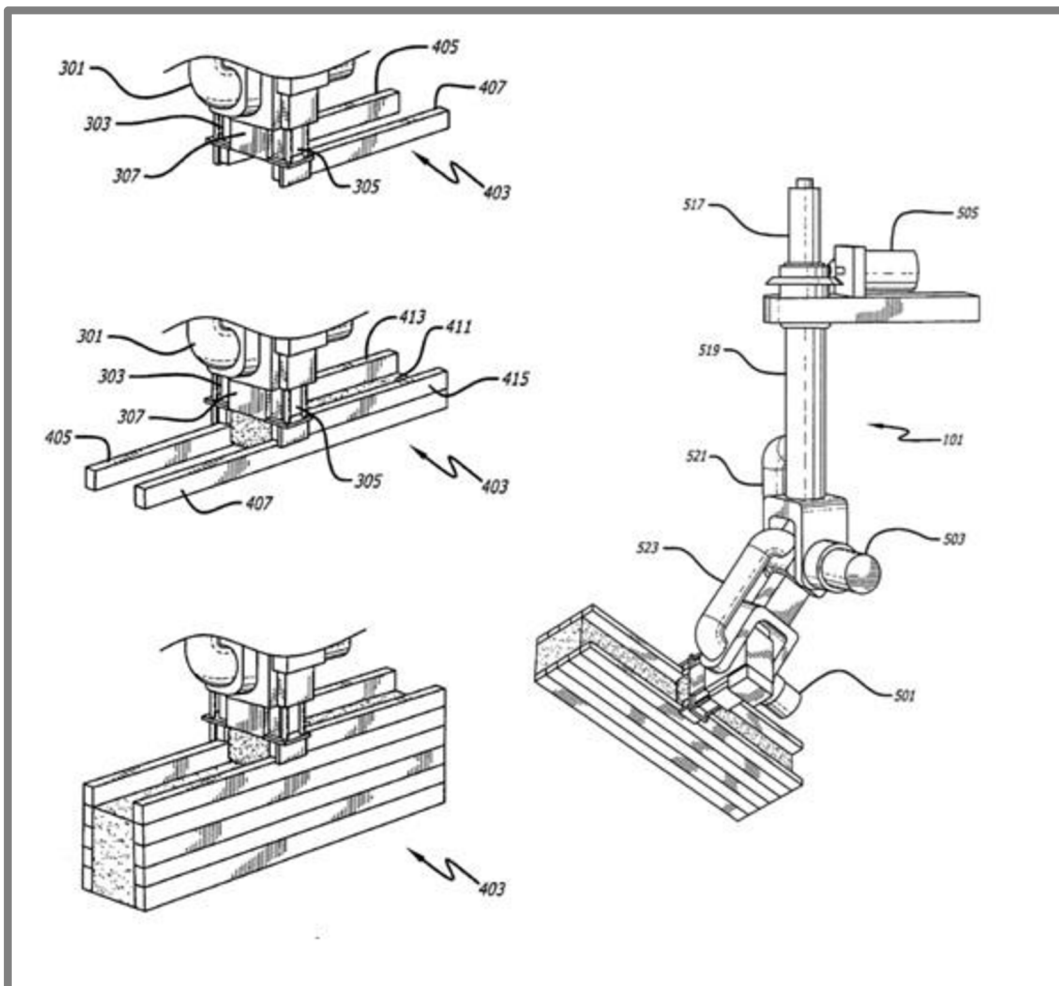
Obr. 2-18 Vliv X-SPEED na pevnost v tlaku při různých teplotách [24]

2.5 Patenty v oblasti 3D tisku betonu

2.5.1 Tisková hlava

Patent US7641461B2

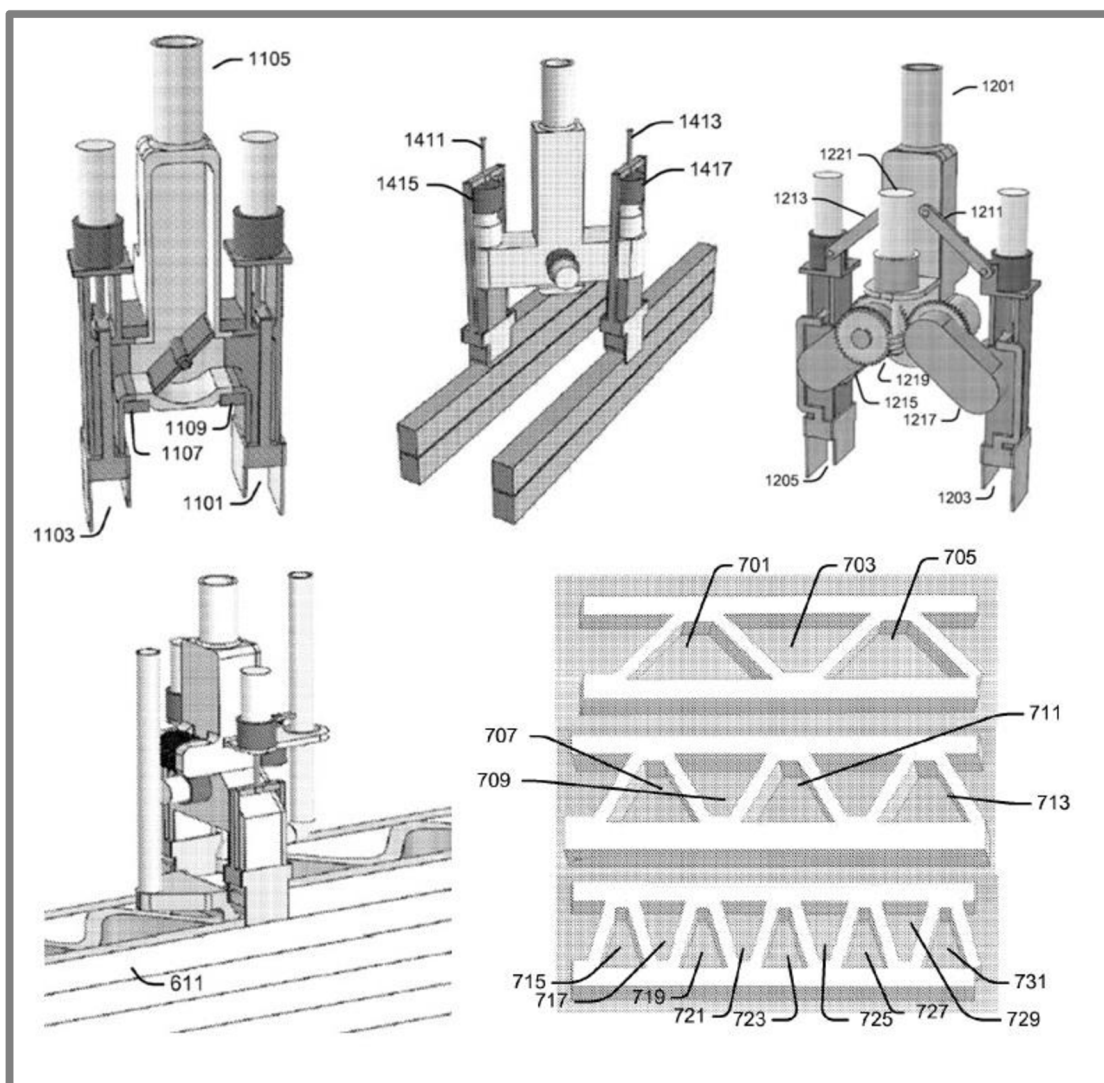
Jedná se o velice rozsáhlý patent zabývající se 3D tiskem betonu, registraci patentu provedla University of Southern California v roce 2010, autorem je Behrokh Khoshnevis. Tento patent byl rozdělen na dvě části. První část týkající se tiskové hlavy a druhou, která se zabývá jejím polohováním. První část popisuje tiskovou hlavu zaměřenou na tisk zejména stěn domů. Tisková hlava se skládá ze dvou bočních trysek opatřených "hladítky" pro tvarování betonu a jedné prostřední trysky, která vyplňuje dutinu vzniklou mezi prvními dvěma tryskami. Patent dále obsahuje systém naklápění trysek vhodný pro tisk zešikmených stěn nebo hlídání polohy tiskové hlavy pomocí laseru. [25]



Obr. 2-19 Tisková hlava US7641461B2 (upraveno) [25]

Patent US7874825B2

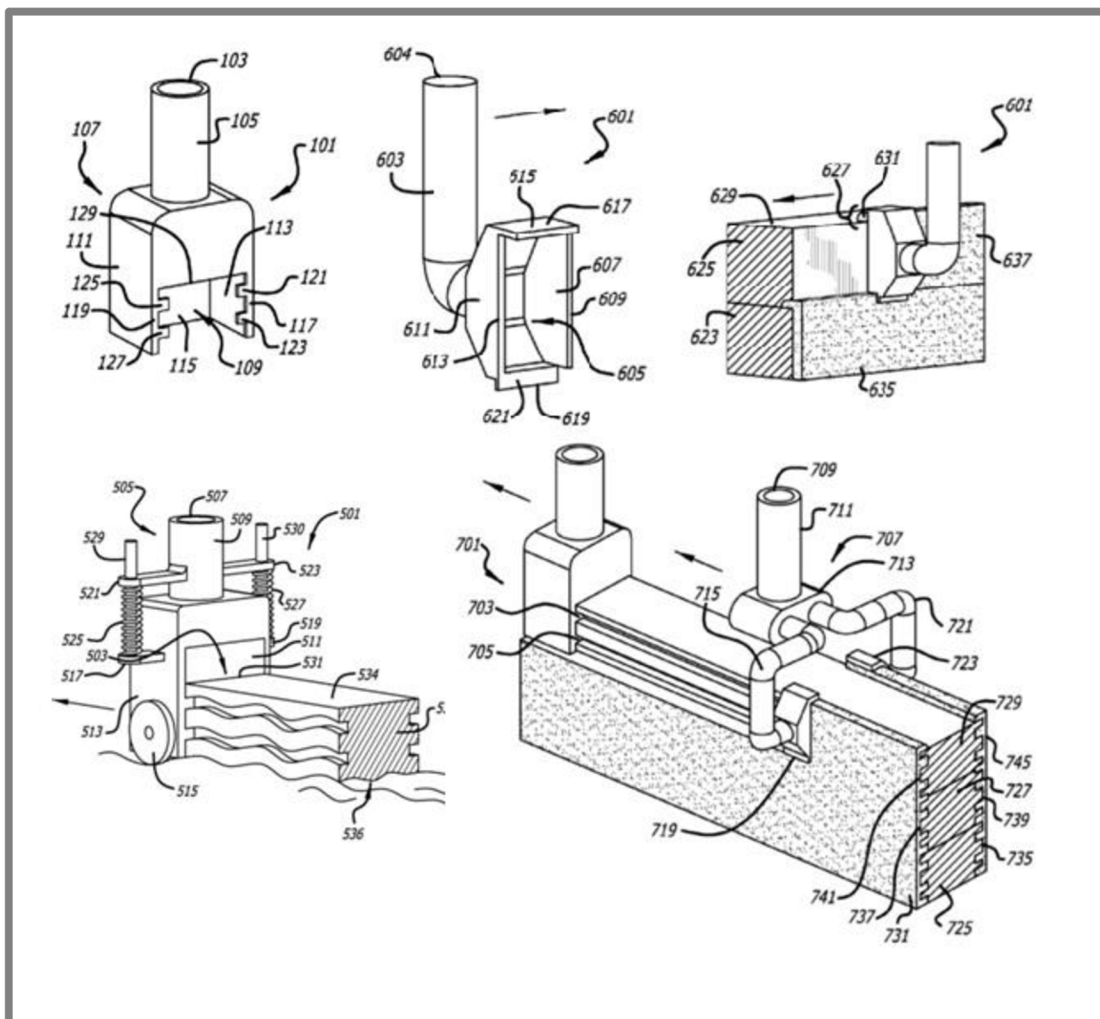
Další z patentů University of Southern California, Behrokha Khoshnevis. Zabývá se konstrukcí tiskové hlavy na beton sloužícímu k tvorbě stěn domů metodou contour crafting. Tisková hlava se skládá ze dvou hlavních trysek určených k dávkování cementových směsí, které vytvářejí vnější stěny tisknutého objektu. Množství směsi přiváděné k tryškám je řízeno externí pumpou na beton a klapkou umístěnou v přívodním kanálu mezi oběma tryškami. Dále může být tisková hlava opatřena třetí tryškou, která vyplňuje prostor vzniklý mezi vnějšími stěnami. Tato tryska může dávkovat buď také cementovou směs, nebo různé druhy izolačních materiálů. Mezi výhody této tiskové hlavy patří nastavitelnost šířky tisknuté stěny, tisk velkého množství materiálu v rámci jednoho výnosu nebo schopnost tiskové hlavy zároveň s tiskem obvodových stěn vyplňovat dutiny uvnitř. Další oblastí, kterou se tento patent zabývá, je tvorba struktur uvnitř stěny sloužící buď pro zpevnění celkového objektu nebo jako izolace. [26]



Obr. 2-20 Tisková hlava US7874825 (upraveno) [26]

Patent US8801415B2

Patent University of Southern California, registrován v roce 2014. Behrokh Khoshnevis, hlavní autor tohoto patentu, popisuje způsoby tvarování betonové směsi metodou contour crafting s využitím pro stavbu domů. Tento patent obsahuje detailní rozbor postupu pro vytváření stěn domů pomocí 3D tisku betonu. Zabývá se nanášením jednotlivých vrstev betonu, nanášením krycích vrstev stěn nebo například tvorbou dutin ve stěnách sloužících jako okna. [27]

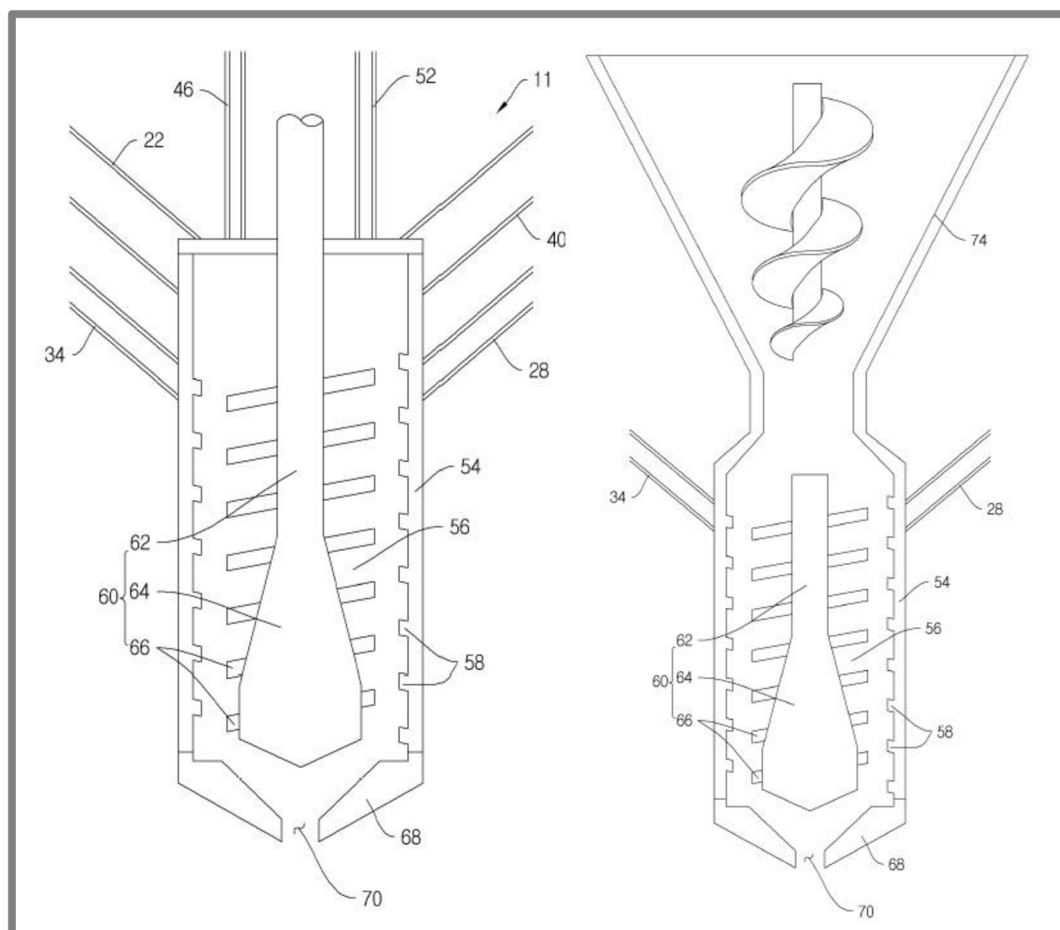


Obr. 2-21 Tisková hlava contourcrafting US8801415 (upraveno) [27]

Patent KR20170125603A

Jedná se o patent připsaný korejské Kookmin University v roce 2017. Mezi autory tohoto patentu patří Jang Jung Sik, Hong Kee Jeung, Lee Sung Woo a Cho Baek Kyu. Předmětem patentu je aktivní tisková hlava sloužící k vytváření třídízenčních betonových objektů. Tisková hlava se skládá ze tří hlavních částí. Ze zásobníku na beton, tlačného dávkovacího šroubu a trysky. Do zásobníku je z volného prostoru dopravováno potřebné množství betonu. Uvnitř tohoto zásobníku je šnekový dopravník, který má za úkol dopravovat směs k dávkovacímu tlačnému

šroubu. Tlačný šroub je umístěn ve speciálně tvarovaném těle pod zásobníkem a má za úkol protlačovat materiál o daném množství tryskou. Na vnitřním povrchu těla tiskové hlavy je vytvořena spirála v opačném směru, než je směr spirály tlačného šroubu. Tvar šroubu a jeho uložení zajišťuje konstantní dopravované množství a stálý tlak uvnitř komory. [28]

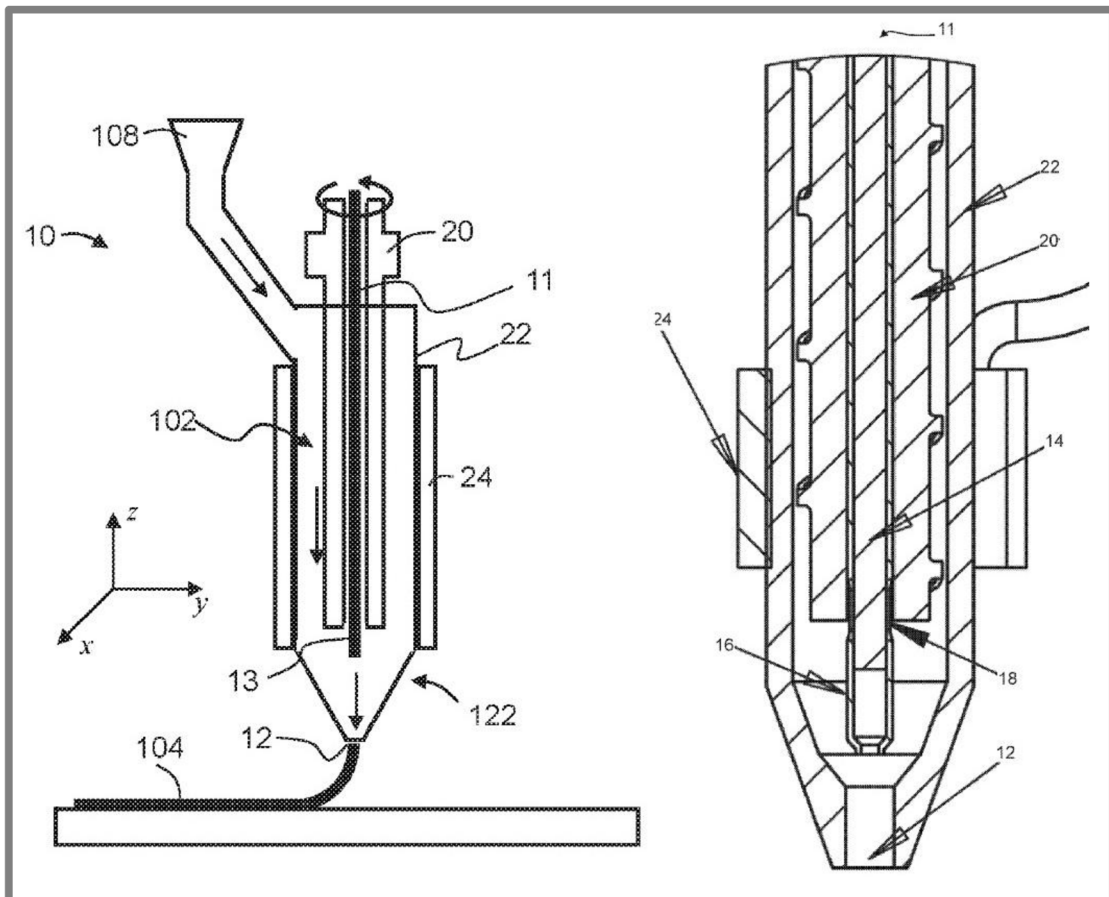


Obr. 2-22 Aktivní tisková hlava KR20170125603A (upraveno) [28]

Patent US2016/0303802A1

Jedná se o americký patent z roku 2016 připsaný společnosti Flexi Matter. Autorem je Meysar Meshorer a Alexander Vasilevski. Patent popisuje aktivní tiskovou hlavu se šnekovým pohonem a její příslušenství. Tisková hlava je určena pro široké spektrum tisknutých materiálů od polymerních materiálů přes vosky, keramiku, sklo až po kovy nebo kompozity. Konstrukce tiskové hlavy se skládá z několika základních částí: vyhřívané tělo tiskové hlavy, letmo uložený dutý tlačný šroubový profil souosý s tělem tiskové hlavy, axiálně pohyblivá hřídel uložená v dutině šroubového profilu, která slouží k uzavírání výstupu z tiskové hlavy, tryska, přívodní příruba a další příslušenství určené vždy pro tisk specifického materiálu. Množství tisknutého materiálu je řízeno rychlostí otáčení tlačného šroubu a polohou uzavírací hřídele. Tímto systémem je řízen i tlak uvnitř tiskové hlavy. Vyhřívání tiskové hlavy zajišťuje dostatečnou viskozitu tisknutého materiálu při jeho pohybu tělem tiskové

hlavy. Mezi příslušenství k tiskové hlavě uvedené v patentu patří například systém rozvodu plynu určeného k zajištění kvalitního spojení jednotlivých nanášených vrstev při tisku kovových materiálů. [29]

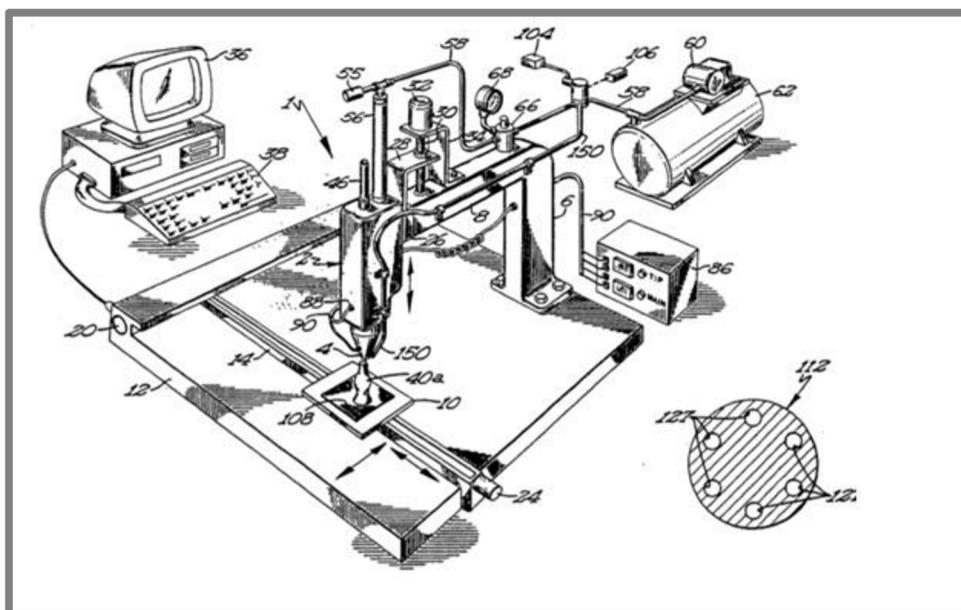


Obr. 2-23 Tisková hlava US2016/0303802A1 (upraveno) [29]

2.5.2 Třídídimenzionální systém polohování tiskové hlavy

Patent EP0426363A2

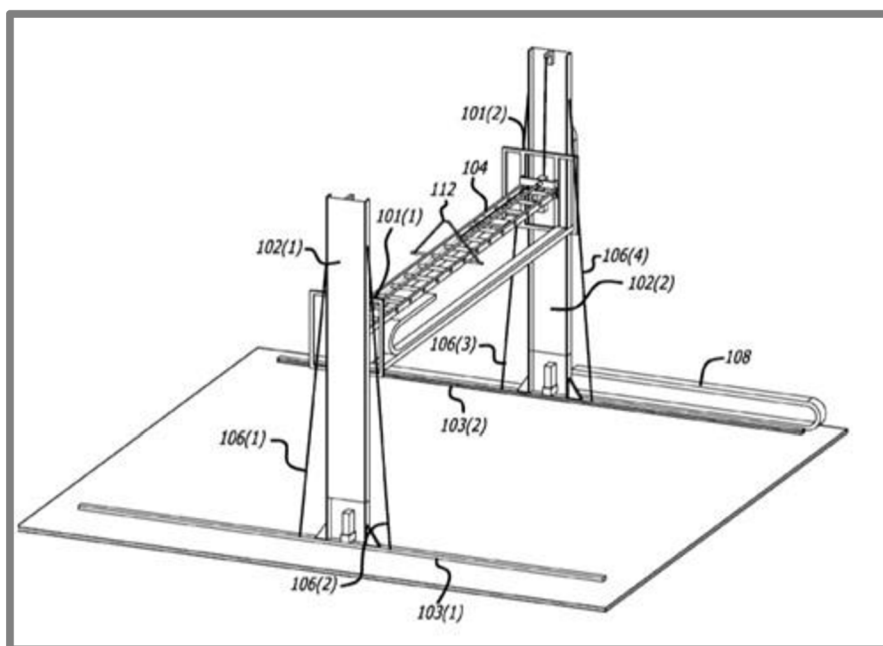
O patent zažádala společnost STRATASYS, INC v roce 1991. Hlavní zásluhy na tomto patentu nese Crump Steven Scott, který představuje myšlenku tvorby 3D objektů pomocí počítačově řízeného stroje, který vrstvením materiálu vytváří požadované prostorové objekty. Zařízení je určeno pro rychlou tvorbu prototypů 3D modelů vytvořených v počítačovém softwaru, které slouží k vizualizaci případných designérských problémů vzniklých při jejich modelování. Systém 3D polohování trysky byl prvotně určen pro materiály, které po vytlačení mění svoji strukturu z tekuté nebo vysoce viskózní na pevnou jako například vosky, termoplasty, dvousložkové epoxidy nebo sklo. [30]



Obr. 2-24 První patent představující myšlenku tisku 3D objektů [30]

Patent CA2667483C

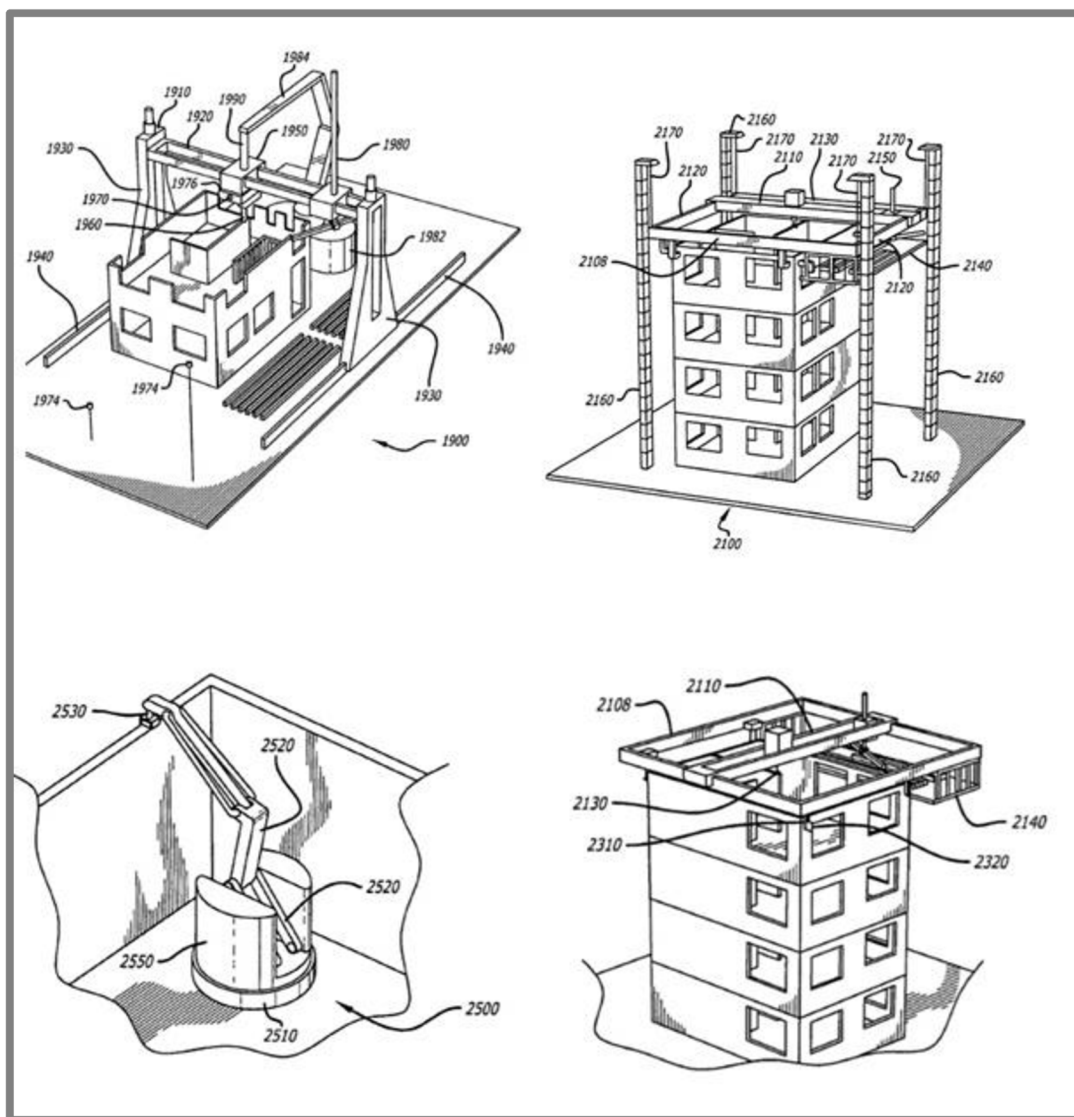
Patent byl registrován roku 2008, autorem je Behrokh Khoshnevis, registraci provedla University of Southern California. Patent popisuje robotický systém polohování tiskové hlavy navržený pro metodou contour crafting. Systém je založen na horizontálním pohybu dvou sloupů vedených kolejkami, dále pak na vertikálním pohybu příčnicku mezi těmito sloupy a třetí souřadnice pohybu je vymezena horizontálním pohybem tiskové hlavy po příčnicku. [31]



Obr. 2-25 Kolejnicový systém polohování, patent CA2667483C [31]

Patent US7641461B2

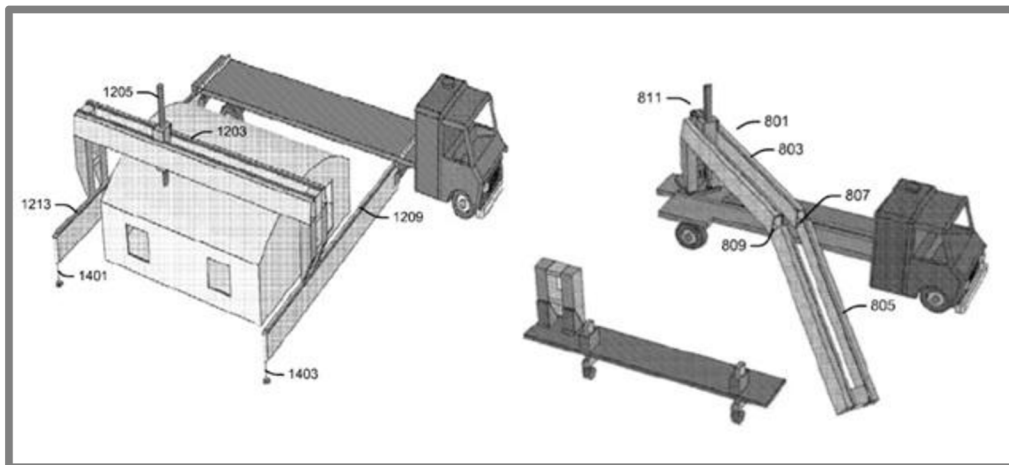
Toto je druhá část výše uvedeného patentu autora Behrokha Khoshnevis z University of Southern California. Tato část patentu se zabývá polohováním tiskové hlavy a dopravou betonové směsi k ní. Patent představuje různé koncepty polohování tiskové hlavy s využitím zejména pro stavbu budov. Prvním konceptem je návrh dvou kolejnic, po kterých se pohybuje rám s příčníkem, tento rám zajišťuje horizontální i vertikální pohyb. Druhý systém je založen na horizontálním pohybu po čtyřech sloupech a vertikální pohyb je pak zajištěn po rámu zavěšeném na těchto sloupech. Patent představuje i další řešení například pomocí robotických ramen nebo pomocí zavěšení rámu na předtím vystavěnou konstrukci, dále pak kombinace těchto systémů a návrhy sestav robotických ramen pro tisk velkých objektů. [25]



Obr. 2-26 Polohovací zařízení 3D tisk domů US7641461B2 (upraveno) [25]

Patent US7814937B2

University of Southern California získala tento patent v roce 2007, autorem je Behrokh Khoshnevis a Marina del Ray. Práce klade důraz na využití 3D tisku betonu pro stavbu domů, zejména pak na mobilní systém převozu 3D tiskárny na nákladním automobilu. Představuje několik možných systémů skládání 3D tiskárny betonu na nákladní automobil. [32]



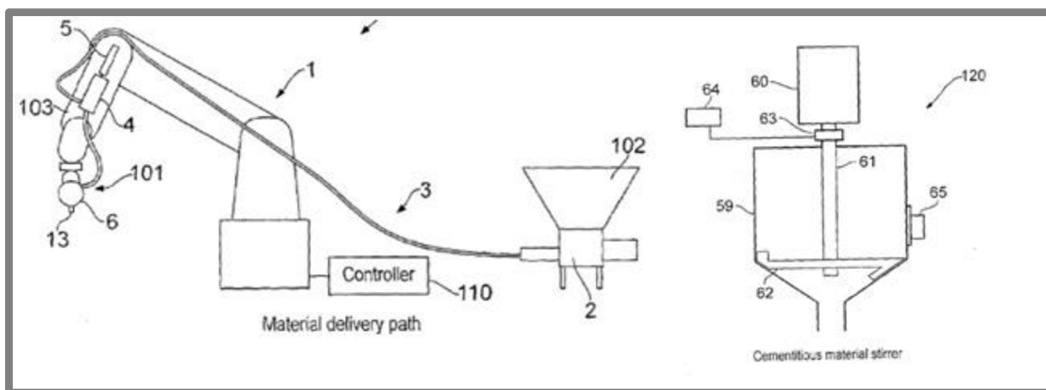
Obr. 2-27 Mobilní 3D tiskárna na beton [32]

2.5.3 Doprava betonových směsí

2.5.3

Patent US20140252668A1

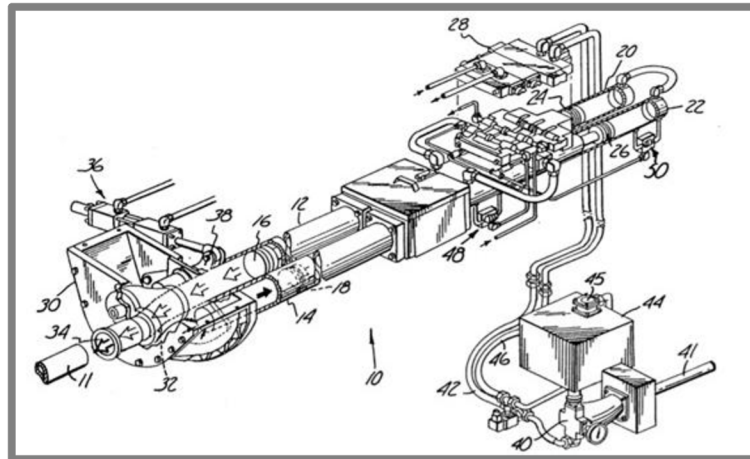
Registraci patentu provedla Loughborough University v roce 2012, mezi hlavní členy tohoto projektu patří Simon Austin, Richard Andrew Buswell, Sungwoo Lim a John Webster. Patent popisuje systém 3D tisku betonu pomocí robotického ramene vrstvením jednotlivých vrstev betonu na sebe, dále pak systém mísení jednotlivých komponent betonu a dopravu směsi k tiskové hlavě. Hlava je připevněn na robotickém rameni a betonová směs je k němu přiváděna ze zásobníku pomocí šnekového pohonu. [33]



Obr. 2-28 Systém dopravy betonové směsi k tiskové (upraveno) [33]

Patent US5332366

Patent byl roku 1994 zapsán na společnost Schwing America, Inc. Autorem je Thomas M. Anderson. Předmětem patentu je počítačové monitorování množství pumpovaného betonu a řízení pístové pumpy určené k pumpování betonu na stavbách. Pumpa je složená z násypky na beton a dvou válců, v nichž pracují písty, které střídavě nasávají a vytlačují betonovou směs do výstupního kolene. [11]

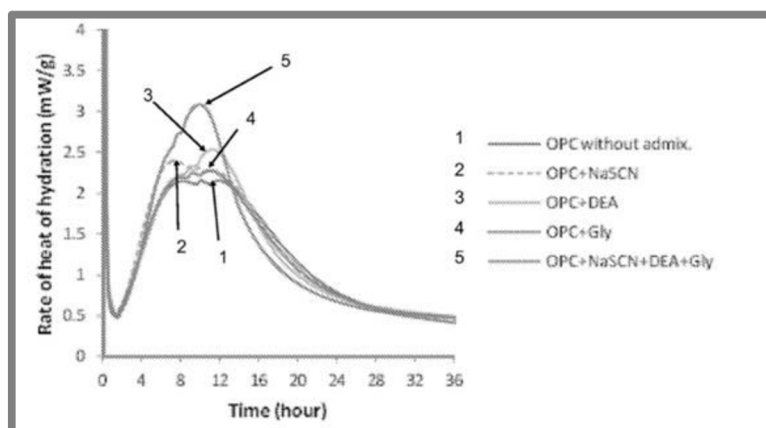


Obr. 2-29 Pístové čerpadlo na beton, patent US5332366 [11]

2.5.4 Urychlovače tuhnutí

Patent WO2013066192

Patent byl registrován společností MAPEI AS v roce 2012. Největší zásluhy na tomto patentu nesou Hoang Kien Dinh, Mette Geiker, Harald Justnes, Espen Rudberg a Roar Myrdal. Práce se zabývá chemickou sloučeninou, která urychluje tuhnutí pojiv v betonu. Sloučenina je složena z několika složek thiokyanátů, alkanolaminů, polyolů, které zvyšují rychlost hydratace pojiv v betonu. Tento urychlovač tuhnutí je určen pro výrobu prefabrikovaných dílců ve stavebnictví. Urychlením tuhnutí se urychluje proces výroby a zvyšuje se efektivita. [34]



Obr. 2-30 Závislost hydratačního tepla na čase WO2013066192 [34]

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3

3.1 Analýza problému

3.1

Před samotným navrhováním tiskové hlavy je nutné stanovit základní parametry, které má tisková hlava splňovat. Jeden z hlavních parametrů, který je při navrhování tiskové hlavy nutné znát, je druh a množství materiálu, které bude tisková hlava schopná vytlačit v realizovatelném časovém intervalu. Při řešení tohoto problému je nutné zohlednit technické možnosti nejen tiskové hlavy, ale i dalších zařízení nutných pro zajištění funkčnosti celého systému pro 3D tisk betonových dílců. Jedná se zejména o zařízení, které bude zajišťovat polohování tiskové hlavy v prostoru. Množství tisknutého materiálu musí být nejen vytlačeno z trysky na jednom místě, ale také nanášeno v podobě výnosu na určené místo. Je nutné tedy zohlednit rychlosti posuvů, kterých je toto zařízení schopné dosahovat. Další zařízení, které musí být zohledněno, je zařízení určené k dopravě směsi k tiskové hlavě. Množství tisknutého materiálu musí odpovídat množství přiváděného materiálu k tiskové hlavě. V neposlední řadě je pak nezbytné vzít v úvahu vlastnosti tisknuté směsi, zejména dobu jeho tuhnutí, aby nedocházelo např. ke ztuhnutí směsi v tiskové hlavě. Po zohlednění všech okolních vlivů tisku betonové směsi mohou být stanoveny problémy přímo souvisejícími s konstrukcí samotné tiskové hlavy. Z rešeršní části této práce vyplývá, že při konstrukci tiskové hlavy určené k extruzi betonu bude nutné na začátku zvážit volbu mezi aktivní a pasivní tiskovou hlavou. Jedním z hlavních úkolů aktivní tiskové hlavy je dávkování tisknutého materiálu, k čemuž je nutné zvolit pohon, který bude dávkování zajišťovat. Dále je nutné zohlednit nutnost čištění tiskové hlavy po každém tisku a s tím související rozebíratelnost tiskové hlavy. Dalším problémem při navrhování tiskové hlavy je její těsnost. Tisknutá směs obsahuje vodu a drobné částice, které musíme utěsnit v hlavě tak, aby nedošlo k jejich vnikání do míst s ložisky a pohonnou jednotkou. Aplikace aditiv a jejich kvalitní promíchání s tisknutou směsí je dalším z řešených problémů této bakalářské práce. Při návrhu tiskové hlavy je nutné zohlednit všechny výše uvedené problémy, dále pak tiskovou hlavu vyrobit a odzkoušet.

3.2 Cíl práce

3.2

Cílem této bakalářské práce je konstrukční návrh experimentální tiskové hlavy určené pro kontinuální 3D tisk betonové směsi s těmito parametry: konstrukce hlavy modulární, minimální rychlost vytlačování $0,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, průměr trysky 50 mm, systém pro aplikaci aditiv, zajištění promíchání směsi s aditivem.

Dílčí cíle bakalářské práce jsou:

- Rešerše současných řešení
- Návrh dvou konstrukčních variant
- 3D model a dokumentace sestavy 3D tiskové hlavy

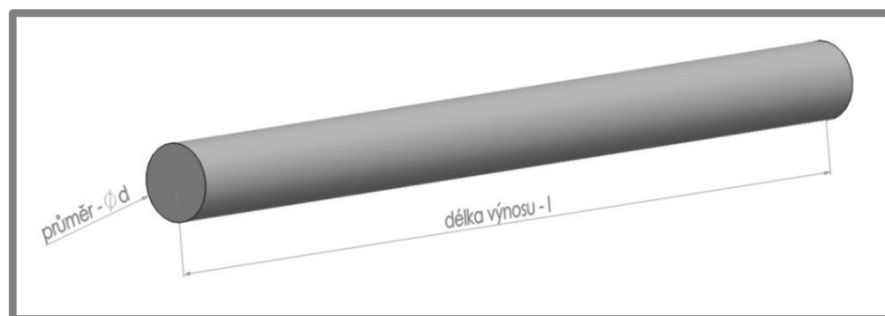
4 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ

4.1 Volba mezi aktivní a pasivní tiskovou hlavou, výběr pohonu

Pro 3D tisk betonové směsi s obsahem kameniva o maximální velikosti 8 mm byla zvolena aktivní tisková hlava se šnekovým pohonem. Důvodem tohoto rozhodnutí je nehomogenita tisknutého materiálu a neznalost jeho přesného chování při tisku. Aktivní pohon v tiskové hlavě by měl zamezit případnému vytékání materiálu z trysky vlivem gravitačních účinků. Šnekový pohon pak byl zvolen z důvodu jednoduchosti celé konstrukce, možnosti kontinuálního tisku bez přerušení způsobených plněním pístové tiskové hlavy a z důvodu vhodnosti užití šnekového dopravníku pro dopravu nehomogenních materiálů.

4.1. Množství tisknutého materiálu

Prvním krokem při návrhu koncepčních řešení tiskové hlavy, je základní rozvaha rychlosti tisku. Rychlost tisku musí být přizpůsobena jednak možnostem rychlosti posuvu tiskové hlavy, dále pak dopravě betonu k tiskové hlavě a v neposlední řadě možnostem samotné tiskové hlavy.



Obr. 4-1 Výnos

4.1.1 Základní rozvaha

Nejprve je ze stanoveného množství materiálu a různých průměru trysek dopočítána idealizovaná délka výnosu (Obr. 4-1). Výpočet vychází z předpokladu, že průměr výnosu je stejný jako průměr trysky tiskové hlavy. Množství materiálu, pro které jsou hodnoty dopočítány, byly zvoleny $0,5 \text{ m}^3$, $0,75 \text{ m}^3$ a 1 m^3 v návaznosti na požadovanou minimální rychlost vytlačování $0,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Průměr trysky byl volen s ohledem na tisknutý materiál s obsahem kameniva o velikosti max. 8 mm tak, aby byl minimálně 5x větší než kamenivo, v intervalu 40 až 90 mm.

Základní vzorce použité pro výpočet Tab. 4-1 a Tab. 4-2. Výpočet proveden pouze pro první objem a první délku výnosu v prvním číselném řádku tabulky.

$$V = \frac{\pi \cdot d_v^2}{4} \cdot l_v \quad (4-1)$$

$$l_1 = \frac{4 \cdot V_1}{\pi \cdot d_v^2} = \frac{4 \cdot 1}{\pi \cdot 0,04^2} = 795,77 \text{ m} \quad (4-2)$$

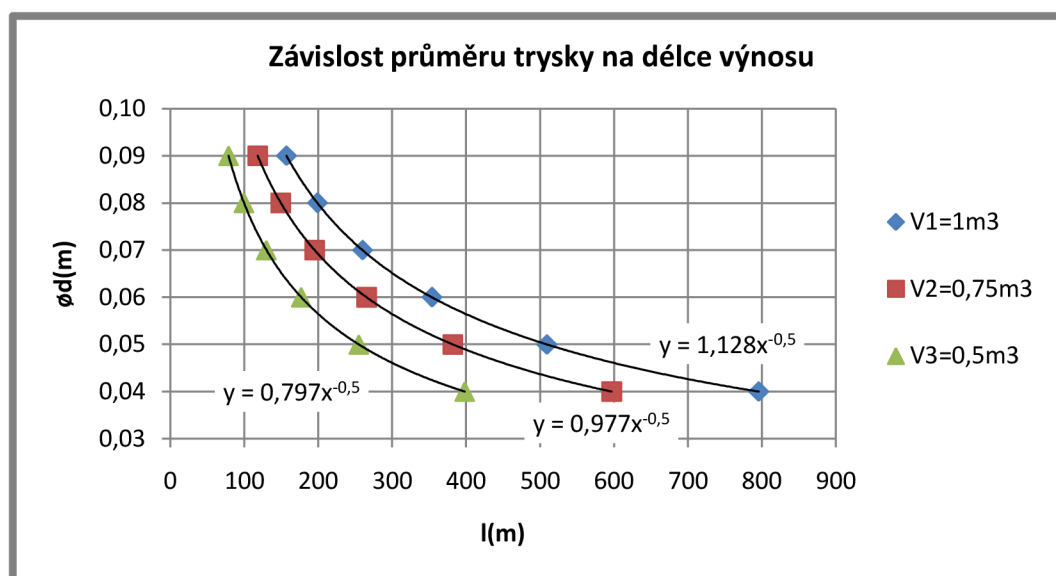
$$t = \frac{l}{v_{\text{posuv}}} = \frac{509,30}{0,075} = 1,87 \text{ h} \quad (4-3)$$

kde:

V	m ³	je objem materiálu
d _v	m	- průměr výnosu
l _v	m	- délka výnosu
v _{posuv}	m·s ⁻¹	- rychlost posuvu tiskové hlavy
t	h	- čas, za který bude vytištěn daný objem materiálu

Tab. 4-1 Závislost délky výnosu na průměru trysky

V ₁ (m ³)	V ₂ (m ³)	V ₃ (m ³)	Ød (m)	l ₁ (m)	l ₂ (m)	l ₃ (m)
1,00	0,75	0,50	0,04	795,77	596,83	397,89
1,00	0,75	0,50	0,05	509,30	381,97	254,65
1,00	0,75	0,50	0,06	353,68	265,26	176,84
1,00	0,75	0,50	0,07	259,84	194,88	129,92
1,00	0,75	0,50	0,08	198,94	149,21	99,47
1,00	0,75	0,50	0,09	157,19	117,89	78,60



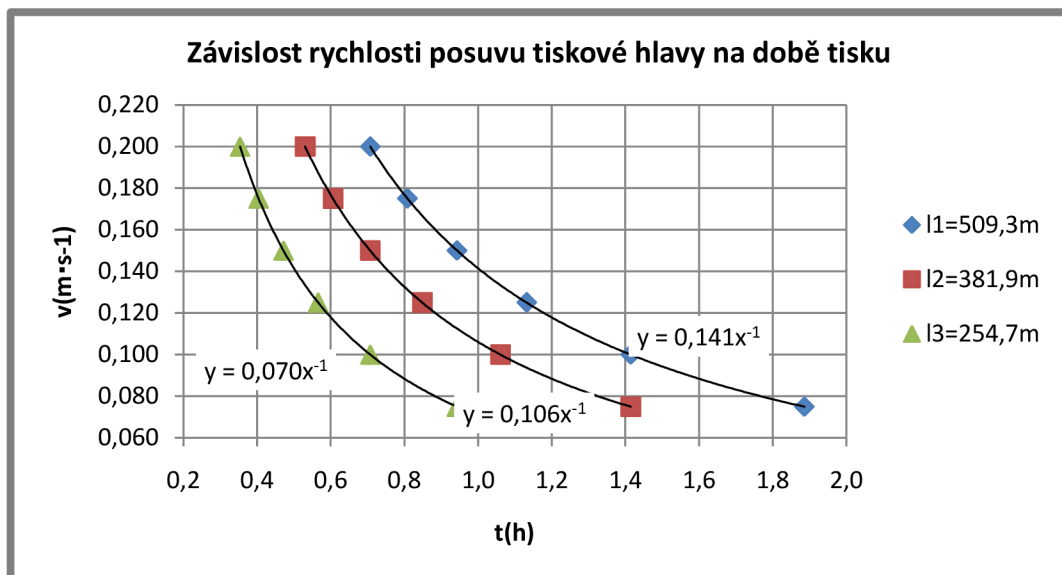
Obr. 4-2 Závislost průměru trysky na délce výnosu

V grafu na Obr. 4-2 je znázorněna závislost průměru trysky na idealizované délce výnosu. Z grafu je patrné, že s rostoucím průměrem trysky se zkracuje délka výnosu podle předpisů zobrazených v grafu. Dále byly uvažovány hodnoty délek výnosů pro průměr trysky ze zadání 50 mm a z Tab. 4-1 k nim byl podle vztahu (4-3) dopočítán ze zvolených rychlostí posuvů čas tisku daného objemu materiálu. Rychlosti posuvu tiskové hlavy byly zvoleny v intervalu od 0,075 do 0,2 m·s⁻¹ podle videodokumentace staveb realizovaných firmami a výzkumnými organizacemi. [35]

Tab. 4-2 Závislost rychlosti posuvu tiskové hlavy na době tisku

l_1 (m)	l_2 (m)	l_3 (m)	v ($m \cdot s^{-1}$)	t_1 (h)	t_2 (h)	t_3 (h)
509,30	381,97	254,65	0,075	1,87	1,42	0,94
509,30	381,97	254,65	0,100	1,42	1,06	0,71
509,30	381,97	254,65	0,125	1,13	0,85	0,57
509,30	381,97	254,65	0,150	0,94	0,71	0,47
509,30	381,97	254,65	0,175	0,81	0,61	0,40
509,30	381,97	254,65	0,200	0,71	0,53	0,35

V grafu na Obr. 4-3 je znázorněna závislost rychlosti posuvu tiskové hlavy na době tisku. Tento graf předpokládá konstantní průměr trysky 50 mm a rychlosti posuvu tiskové hlavy jsou voleny s ohledem na možnosti polohovacích zařízení.



Obr. 4-3 Závislost rychlosti posuvu na době tisku

Z grafu vyplývá, že pro stanovenou minimální rychlost vytlačování $0,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ musí být rychlost posuvu tiskové hlavy cca $0,07 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Těchto hodnot by mělo být polohovací zařízení bez problému schopno dosáhnout. Z grafu dále vyplývá, že rychlost pohybu polohovacího zařízení nebude limitující ani při rychlosti vytlačování o hodnotě $1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Z těchto hodnot vyvozují závěr, že minimální rychlost vytlačování $0,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ by měla být s ohledem na rychlosti posuvů tiskové hlavy bez problému realizovatelná.

V březnu 2018 proběhly v laboratořích NETME Center první testy betonové směsi určené pro 3D tisk. Experiment byl zaměřen na zkoumání tvaru výnosu při vytlačování směsi z pístové tiskové hlavy s průměrem trysky 50 mm. Tisknutá směs byla z válce tiskové hlavy vytlačována gravitačními účinky závaží umístěného na píst tiskové hlavy. Posuv tiskové hlavy byl zajištěn robotickým ramenem KUKA. Bylo provedeno několik testů s různým složením tisknuté směsi. Finální směs pak byla vynesena v podobě rovného výnosu na podložku. Z videa natočeného při

experimentu a z dat získaných naskenováním finálního výnosu byly získány tyto hodnoty: objem vyneseno materiálu $V=0,004 \text{ m}^3$, délka výnosu $l=0,9 \text{ m}$, doba tisku $t=9 \text{ s}$. Tvar výnosu odpovídal válci o průměru $77,94 \text{ mm}$ oříznutému tečnou rovinou ve vzdálenosti 9 mm od povrchu. Dupočítané hodnoty: rychlost vytlačování $Q=1,6 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, rychlost posuvu tiskové hlavy $v=0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Ze získaných dat vyplývá, že idealizovaný profil materiálu použitý při výpočtu lze považovat pouze za přibližný. Reálný průměr výnosu nemusí odpovídat průměru trysky a je ovlivněn rychlostí posuvu tiskové hlavy a rychlostí vytlačování, jak bylo pozorováno na tomto experimentu.

4.1.2 Výpočet vertikálního šnekového dopravníku

4.1.2

Obvyklý postup pro výpočet vodorovného nebo šikmého šnekového dopravníku je, že ze známého dopravovaného množství materiálu, zvolených otáček a součinitele plnění šneku dupočítáme vnější průměr šneku a potřebný výkon motoru. U vertikálního šnekového dopravníku je postup výpočtu z důvodu lišících se silových účinků jiný. Výpočet se provádí tak, že ze zvoleného průměru šneku jsou vypočteny nejprve minimální potřebné otáčky a poté z těchto otáček a zvoleného součinitele plnění dupočteno dopravované množství. Tento výpočet je nutné provést několikrát, dokud nedojdeme k optimálnímu průměru šneku pro požadované dopravované množství materiálu. [36] Výpočet je určen pro dopravu materiálu směrem vzhůru. Výpočet pro dopravu materiálu směrem dolů se bude lišit pouze ve směru rychlostí v rychlostním trojúhelníku viz Obr. 4-5.

Volba šnekovnice

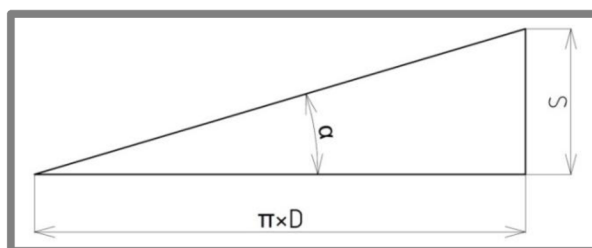
Zvolena byla nerezová šnekovnice od firmy Taurus, s.r.o, Chrudim. Parametry vychází z nerezové řady šnekovnic dle katalogu z materiálu ČSN 17246. [37]

Tab. 4-3 Parametry šnekovnice [37]

Rozměr	Zkratka	Hodnota
Vnější průměr šnekovnice	D	Ø100 mm
Vnitřní průměr šnekovnice	d	Ø34 mm
Stoupání šnekovnice	s	100 mm
Tloušťka šnekovnice u kořene	t_1	4 mm
Tloušťka šnekovnice na obvodu	t_2	2 mm

Úhel stoupání šnekovnice

Pomocí goniometrických funkcí byl dupočítán úhel stoupání šnekovnice graficky zobrazený na Obr. 4-4.



Obr. 4-4 Úhel stoupání šnekovnice

$$\alpha = \arctg\left(\frac{s}{\pi \cdot D}\right) = \arctg\left(\frac{100}{\pi \cdot 100}\right) = 0,308 \text{ rad} \quad (4-4)$$

kde:

α	rad	je úhel stoupání šnekovnice
s	mm	- stoupání šnekovnice
D	mm	- průměr šnekovnice

Minimální otáčky

Výpočet minimálních otáček je proveden užitím vzorce 4-5 odvozeného z rovnice ustáleného stavu vertikálního šnekového dopravníku. [36] Výpočet uvažuje stejný koeficient tření mezi pláštěm a materiálem a mezi šnekovnicí a materiálem, z důvodu volby stejného materiálu pro výrobu šnekovnice a pro výrobu pláště. Hodnota tohoto koeficientu byla podle dostupné literatury [38] zvolena $\mu_1 = \mu_2 = 0,3$.

$$n_{min} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g}{D \cdot \mu_1} \cdot ((\sin(\alpha) + \mu_2 \cdot \cos(\alpha)))} \quad (4-5)$$

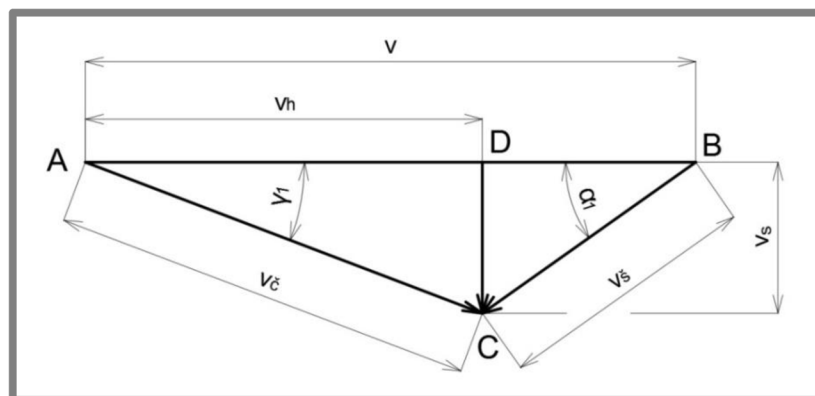
$$n_{min} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 9,81}{0,1 \cdot 0,3} \cdot ((\sin(0,308) + 0,3 \cdot \cos(0,308)))} = 3,12 \text{ s}^{-1}$$

kde:

α	rad	je úhel stoupání šnekovnice
g	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	- gravitační zrychlení
D	mm	- průměr šnekovnice
μ_1	-	- koeficient tření mezi materiálem a pláštěm
μ_2	-	- koeficient tření mezi materiálem a šnekovnicí

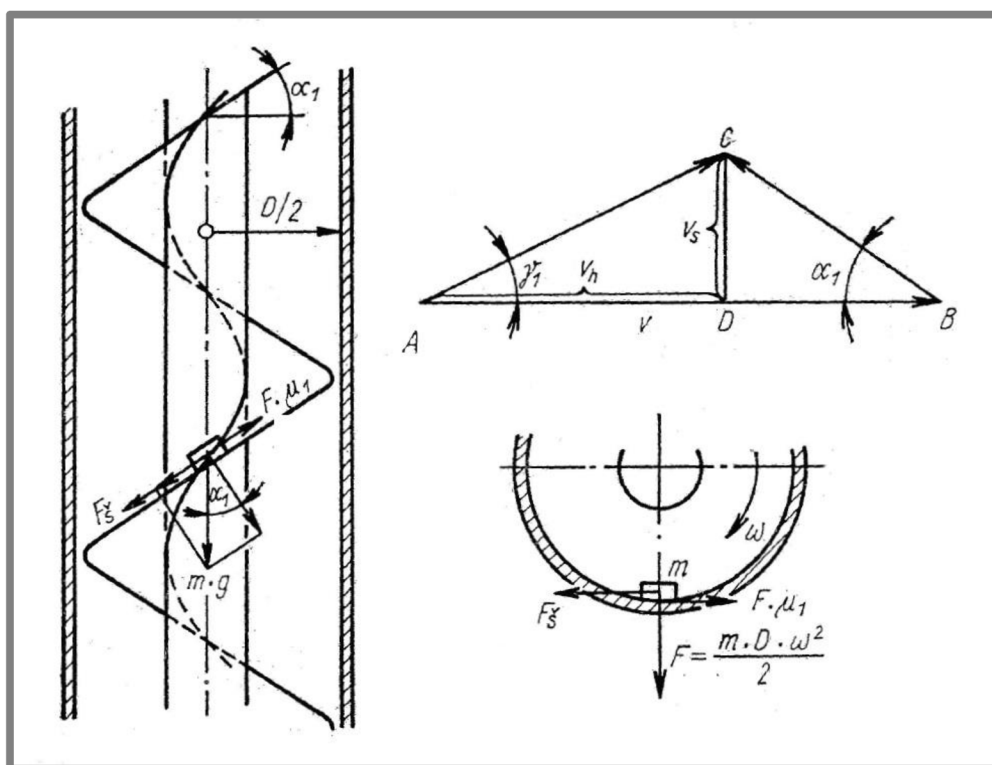
Vypočtená hodnota je hodnota minimální a dále je ve výpočtu používána hodnota provozních otáček $n = 3,5 \text{ s}^{-1}$

Rychlostní poměry částice ve šnekovém vertikálním dopravníku



Obr. 4-5 Rychlostní poměry při pohybu dolů (upraveno) [39]

Rychlosti částice pohybující se ve vertikálním šnekovém dopravníku jsou graficky znázorněny na Obr. 4-5. Jedná se o dva pravouhlé trojúhelníky s jednou společnou odvěsnou, která představuje vertikální rychlost částice v_s . Pravý trojúhelník znázorňuje rychlost pohybu částice vůči plášti dopravníku a jeho okolí, tedy absolutní rychlost částice v_Σ . Odvěsny tohoto trojúhelníku jsou horizontální rychlost částice v_h a vertikální rychlost částice v_s . Přepona v_Σ s odvěsnou v_h svírají úhel γ , který představuje úhel stoupání částice. Pravý trojúhelník popisuje relativní pohyb částice vůči šnekovnici v_s . Odvěsny tohoto trojúhelníku jsou horizontální rychlost částice vůči šnekovnici $v-v_h$ a vertikální rychlost v_s , úhel α je úhel stoupání šnekovnice. [36]



Obr. 4-6 Schéma dopravy materiálu svislou šnekovnicí [39]

$$v = \overline{AB} = \pi \cdot D \cdot n \quad (4-6)$$

$$v = \pi \cdot 0,1 \cdot 3,5 = 1,099 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$v_h = \overline{AD} = \sqrt{\frac{D \cdot g \cdot (\sin(\alpha) + \mu_1 \cdot \cos(\alpha))}{2 \cdot \mu_1}} \quad (4-7)$$

$$v_h = \sqrt{\frac{0,1 \cdot 9,81 \cdot (\sin(0,308) + 0,3 \cdot \cos(0,308))}{2 \cdot 0,3}} = 0,981 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$v_s = \overline{DC} = \left[\pi \cdot D \cdot n - \sqrt{\frac{D \cdot g \cdot (\sin(\alpha) - \mu_1 \cdot \cos(\alpha))}{2 \cdot \mu_1}} \right] \cdot \operatorname{tg}(\alpha) \quad (4-8)$$

$$v_s = \overline{DC} = \left[\pi \cdot 0,1 \cdot 3,5 - \sqrt{\frac{0,1 \cdot 9,81 \cdot (\sin(0,308) - 0,3 \cdot \cos(0,308))}{2 \cdot 0,3}} \right] \cdot \operatorname{tg}(0,308) = 0,296 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

kde:

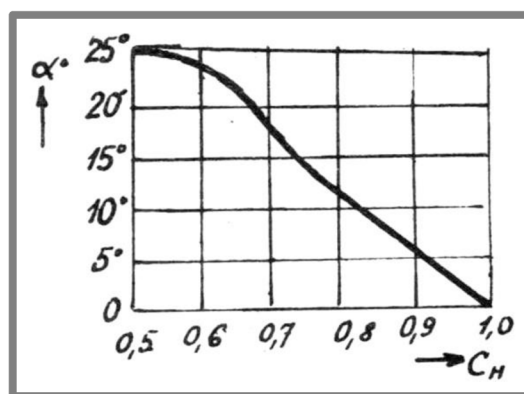
α	rad	je úhel stoupání šnekovnice
g	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	- gravitační zrychlení
D	mm	- průměr šnekovnice
μ_1	-	- koeficient tření mezi materiálem a pláštěm
n	s^{-1}	- otáčky šnekovnice

Součinitel plnění

Součinitel plnění je definován jako podíl plochy v řezu dopravníkem, kterou zaujímá materiál a plochy vypočítané z vnitřního průměru pláště. Pro abrazivní materiály jako je cement a písek uvádí dostupná literatura [40] hodnotu součinitele plnění $\psi=0,3$.

Součinitel vlivu sklonu dopravníku

U dopravníků uložených v jiné než vodorovné poloze se do výpočtu dopravovaného množství musí započítat součinitel snižující dopravované množství vzhledem ke sklonu dopravníku. Hodnoty C_H se v literatuře uvádí pro šikmé dopravníky do sklonu max. 25° , pro ně je hodnota součinitele vlivu sklonu dopravníku $C_H=0,5$. Pro vertikální šnekový dopravník je považována za dostatečnou korekce dopravovaného množství součinitelem vlivu sklonu dopravníku o hodnotě $C_H=1/3$. [41]



Obr. 4-7 Vliv sklonu dopravníku C_H [39]

Teoretické dopravované množství

Výpočet teoretického dopravovaného množství vychází ze základních vzorců pro výpočet průtoku (4-9). Za rychlost se do tohoto vzorce dosazuje vertikální rychlost částice v_s . Plocha S ve vzorci je redukována výše zmíněnými součiniteli C_H, ψ . [41]

$$Q = S \cdot v_s \quad (4-9)$$

$$Q = 3600 \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot C_H \cdot \psi \cdot v_s \quad (4-10)$$

$$Q = 3600 \frac{\pi \cdot 0,1^2}{4} \cdot \frac{1}{3} \cdot 0,3 \cdot 0,296 = 0,837 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$$

kde:

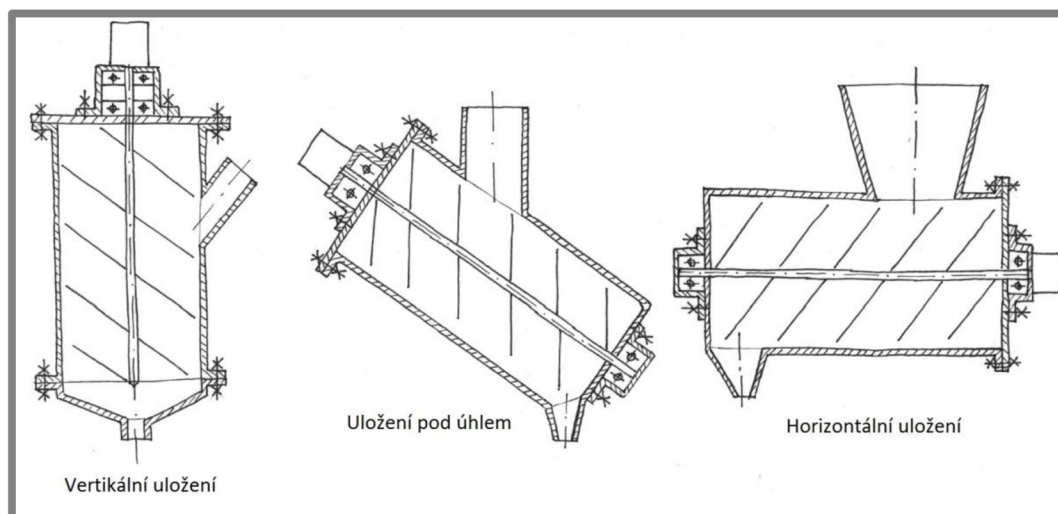
S	m ²	je plocha uvnitř těla dopravníku
v _s	m·s ⁻¹	- vertikální rychlost
D	m	- průměr šnekovnice
C _H	-	- součinitel vlivu sklonu dopravníku
ψ	-	- součinitel plnění

Výsledné teoretické dopravované množství leží v požadovaném intervalu (0,5;1) m³·h⁻¹ viz kapitola 4.1.1. Těto hodnotě odpovídá průměr šnekovnice 100 mm, na který bude tisková hlava navržena. Případné difference od dopočítaného dopravovaného množství způsobené volbou součinitelů, lze při výsledném tisku odstranit pomocí regulace otáček šneku.

4.4 Uložení šnekového pohonu

4.4

Uložení šnekového pohonu vůči podložce, na kterou bude tisková hlava nanášet materiál je zásadním faktorem, který ovlivní celkové tvarové uspořádání tiskové hlavy. Šnekovnice může být uložena vertikálně, horizontálně, nebo může s podložkou svírat určitý úhel. Výhodou horizontálního uložení je možnost uchycení hřídele šnekovnice do ložisek na obou stranách tiskové hlavy, čímž se zajistí tuhost šnekovnice a zamezí se jejímu případnému házení. Velkou nevýhodou tohoto uspořádání tiskové hlavy je manipulovatelnost v prostoru, možné sedání kameniva v místech kam nedosáhne šnekovnice a nesnadná rozebíratelnost zařízení při jeho



Obr. 4-8 Uložení šnekového pohonu

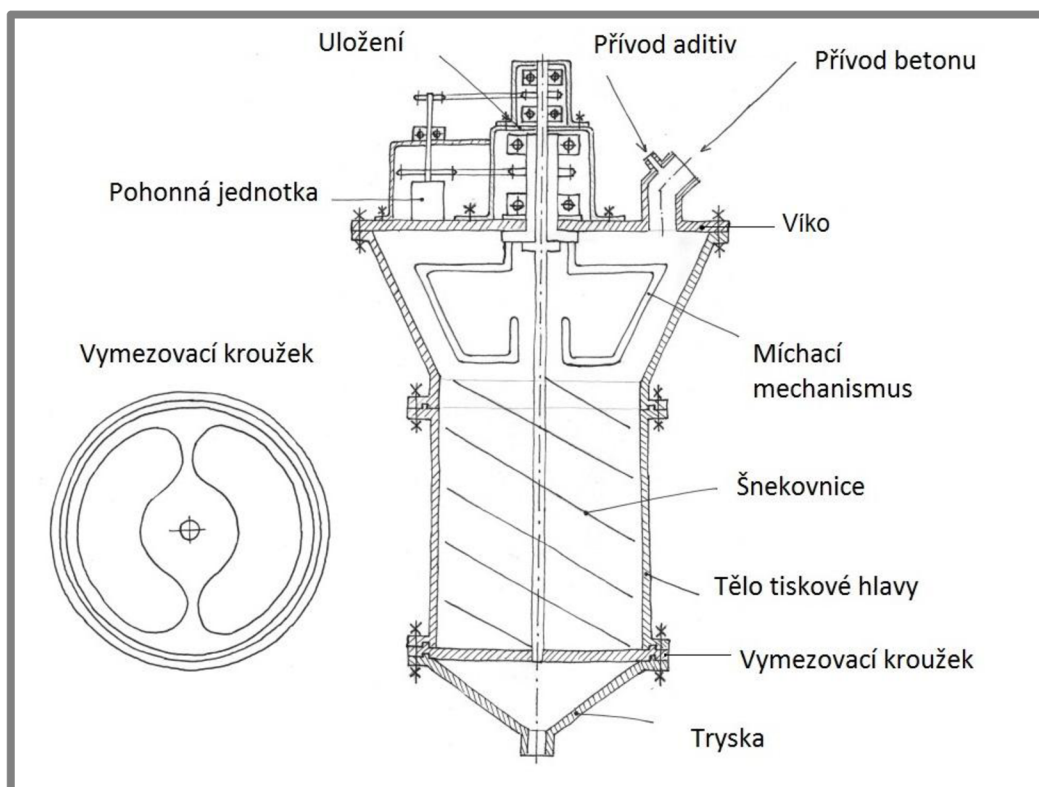
čištění. Manipulovatelnost v 3D prostoru a nesnadné čištění je i problémem uložení pod úhlem, z toho důvodu bylo zvoleno vertikální uspořádání. Výhodou vertikálního uspořádání je právě zmíněná snadná rozebíratelnost zařízení způsobená letným uložením hřídele šnekovnice.

4.5 Výsledné koncepční návrhy

Dílčím úkolem této bakalářské práce bylo navrhnutí systému aplikace aditiv urychlujících tuhnutí betonové směsi. Podoba výsledných koncepčních návrhů je pak výrazně ovlivněna právě tímto dílčím úkolem. Dva výsledné koncepční návrhy se liší zejména velikostí, složitostí konstrukce a tedy i potenciální cenou výroby. Zásadní rozdíl mezi těmito návrhy je v tom, jaký druh aditiva se bude do směsi přidávat.

4.5.1 Tisková hlava s míchacím zařízením

Tisková hlava s míchacím zařízením se skládá ze čtyř rozebíratelných částí (tryska, tělo, zásobník a víko s uložením) a je určena pro aplikaci aditiv do hotové betonové směsi těsně před jejím vytlačení na požadované místo. Přívod aditiv se nachází těsně před vstupem betonu do tiskové hlavy a k zajištění kvalitního promíchání směsi s aditivem je v tiskové hlavě umístěn míchací mechanismus. Tento mechanismus se nachází v horní části zařízení, kde se tělo tiskové hlavy rozšiřuje a tvoří tak zásobník na beton. Míchací mechanismus je tvořen čtyřmi míchacími segmenty přivařenými na dutý hřídel letmo uložený do ložisek. Skrz tento dutý hřídel je veden hřídel šnekovnice. Hřídel šnekovnice je uložen do dalšího páru ložisek, což umožňuje



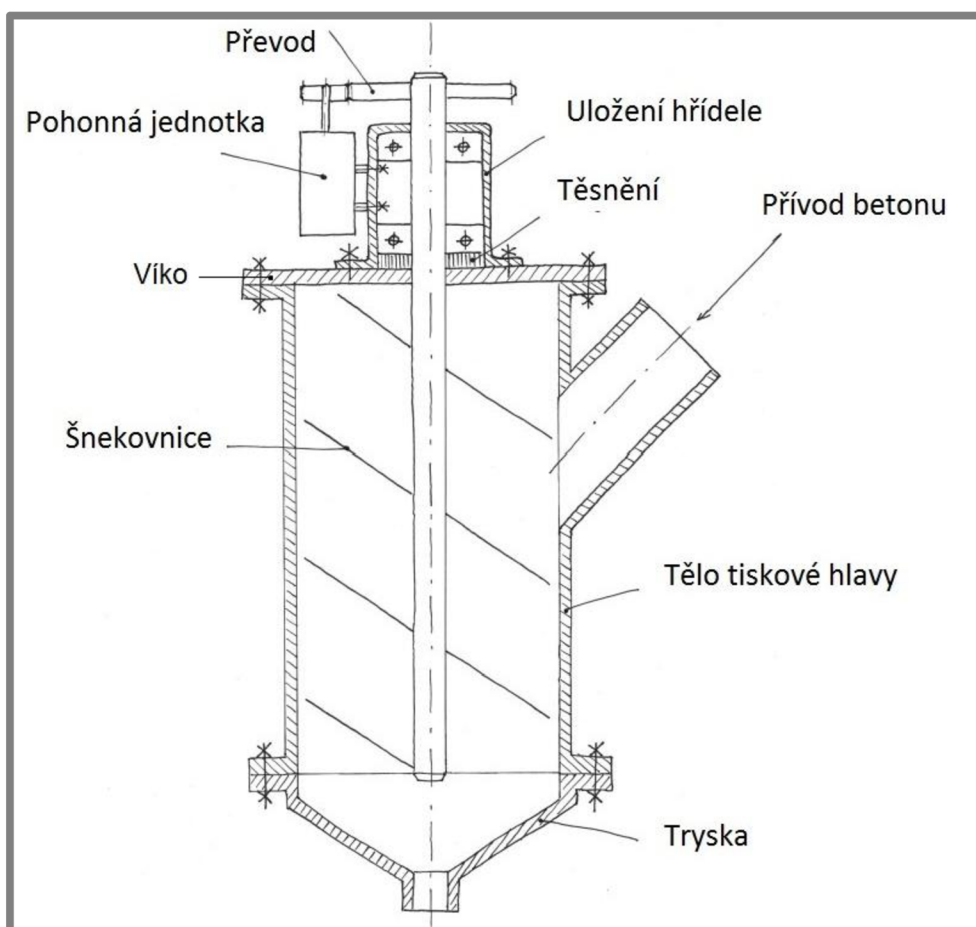
Obr. 4-9 Tisková hlava s míchacím zařízením

různou rychlost otáčení šnekovnice a míchacího zařízení. Kroutící moment od motoru bude převáděn na hřídel šnekovnice a míchacího zařízení odděleně s různým převodovým poměrem podle potřeby zařízení. Tento systém uložení slouží k zajištění dostatečného promíchání směsi před vytlačáním změnou poměru otáček šnekovnice a míchacího zařízení. Ve spodní části tiskové hlavy je mezi tělo hlavy a trysku vložen vymezovací kroužek, který slouží k vedení hřídele šnekovnice. Hlavní části tiskové hlavy jsou spojeny šroubovými spoji tak, aby byla konstrukce snadno rozebíratelná při čištění.

4.5.2 Tisková hlava bez míchacího zařízení

4.5.2

Druhým koncepčním řešením je tisková hlava určená pro tisk betonové směsi s aditivami aplikovanými do záměsové vody. Tento druh aditiv se přidává do betonové směsi při jejím míchání a kvalitní promíchání je tedy zajištěno ještě před dopravou směsi k tiskové hlavě. Výsledkem tohoto způsobu aplikace aditiv je zjednodušení celé konstrukce tiskové hlavy, snížení její hmotnosti a nákladů na výrobu. Tato tisková hlava se skládá ze tří hlavních částí: trysky, těla a víka s uložením šnekovnice. Hlavní části tiskové hlavy jsou opět spojeny šroubovými spoji z důvodu rozebíratelnosti konstrukce kvůli čištění. Beton je do těla tiskové hlavy přiváděn z boku z důvodu nedostatku místa v oblasti uložení hřídele šnekovnice. Hřídel šnekovnice je letmo uložen do dvou ložisek. Kroutící moment je na hřídel přiveden přes převod ozubenými koly.



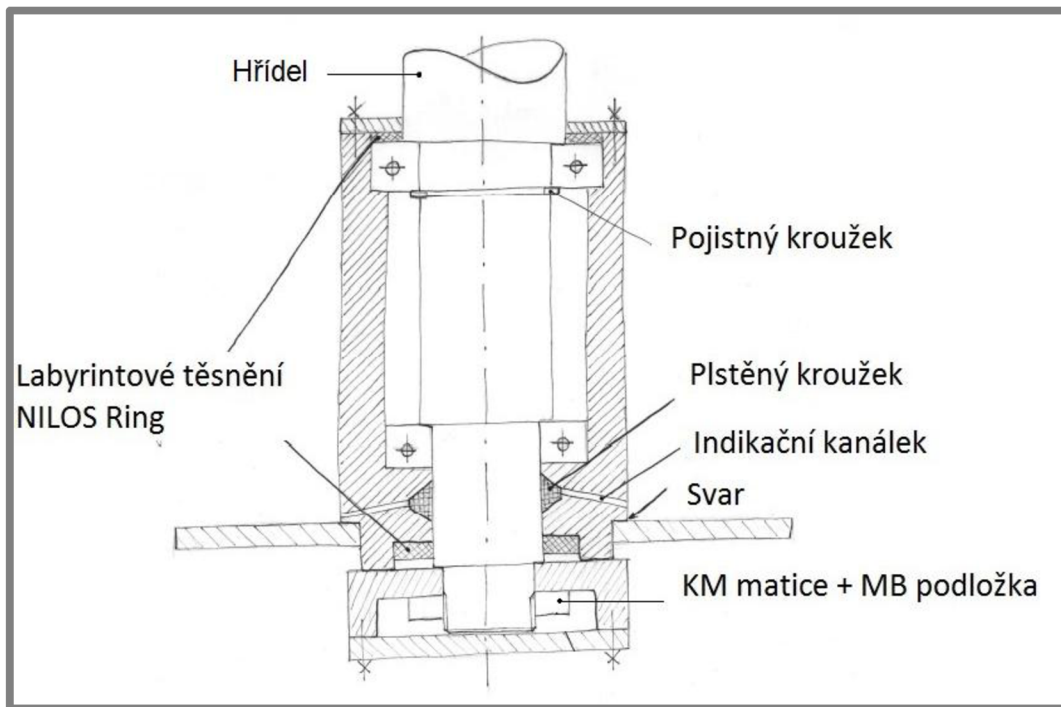
Obr. 4-10 Tisková hlava bez míchacího zařízení

4.6 Uložení hřídele

Ze zvoleného vertikální uložení šnekovnice vyplývá nutnost letmého uložení hřídele, který bude přenášet krouticí moment od motoru k šnekovnici. Hřídel bude namáhán axiálně i radiálně, čemuž musí být uzpůsobeno jeho uložení do ložisek. Celé uložení pak musí být dobře utěsněno proti vnikání vody a rozpuštěných látek z komory se šnekovnicí do ložiskových domků a do ložisek. K zajištění těsnosti celého uložení je zvoleno vícestupňové těsnění podrobněji rozebrané v konstrukčním návrhu.

4.6.1 Uložení hřídele č. 1

Uložení hřídele na Obr. 4-11 je složeno z jednoho kusu materiálu, do kterého jsou vysoustružena dvě osazení pro ložiska a ve spodní části pak osazení pro systém těsnění. Hřídel je orientován největším osazením nahoru a zajištěn pojistným kroužkem. Šnekovnice je ve spodní části připevněna k hřídeli přes objímku zajištěnou KM maticí a MB podložkou. Těsnění uložení je zajištěno labyrintovým těsnícím kroužkem v kombinaci s plstěným těsněním a indikačními kanálky, které případně upozorní na proniklé nečistoty. Celý ložiskový domek pak bude přivařen k víku přišroubovanému na tělo tiskové hlavy. Nevýhoda tohoto uložení je případná výrobní složitost, kdy je přesný rozměr na spodní ložisko umístěn hluboko v osazení.

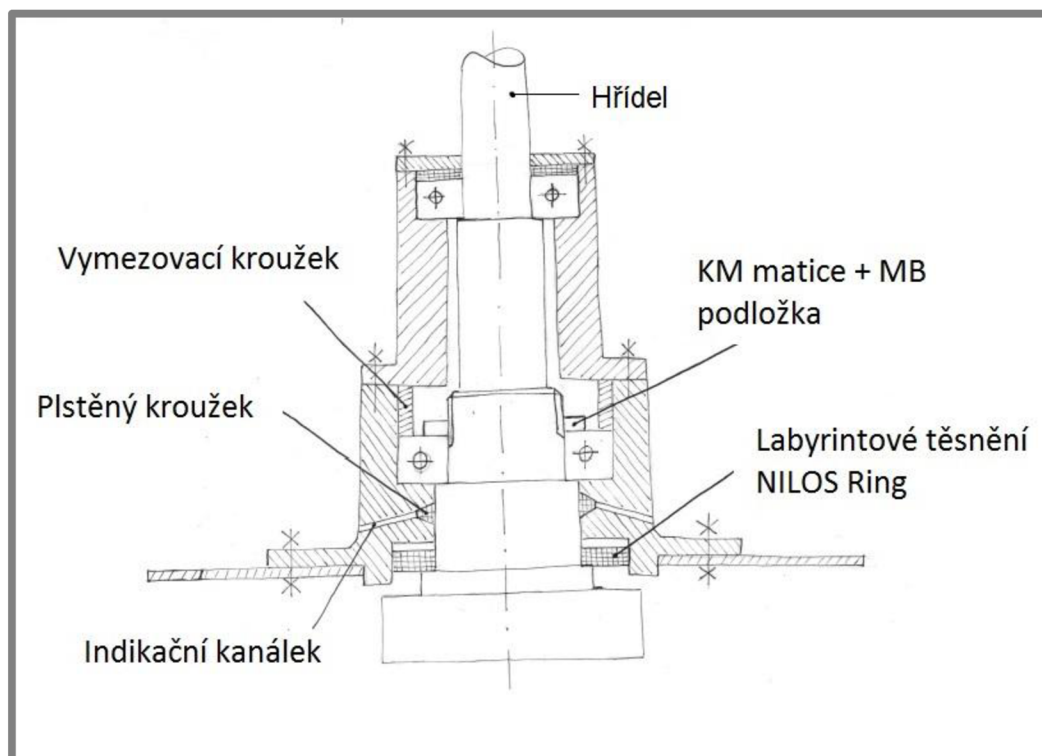


Obr. 4-11 Uložení hřídele č. 1

4.6.2 Uložení hřídele č. 2

Hřídel na Obr. 4-12 je uložen do dvou samostatných domků spojených šroubovými spoji. Ve spodním, větším domku jsou dvě osazení pro těsnění, první labyrintové těsnění NILOS Ring a blíže k ložisku těsnění plstěným kroužkem. Do míst plstěného těsnění jsou z venkovního prostoru navrtány kanálky, které v případě průniku vody a

dalších nečistot skrz těsnění indikují jejich přítomnost v oblasti ložiskového domu. Hřídel je proti uvolnění zajištěna KM maticí a MB podložkou ke spodnímu, většímu ložisku. Toto ložisko je v axiálním směru zajištěno z jedné strany osazením ložiskového domku a z druhé strany vymezovacím kroužkem přitlačeným na ložisko vrchním domkem. Šnekovnice je pak k hřídeli přišroubována zespod do největšího osazení hřídele. Spodní domek je přivařen nebo přišroubován k víku, které uzavírá prostor těla tiskové hlavy. Výhodou tohoto uložení je jednodušší výroba, jednoduchá rozebíratelnost a kvalitní axiální zajištění hřídele.



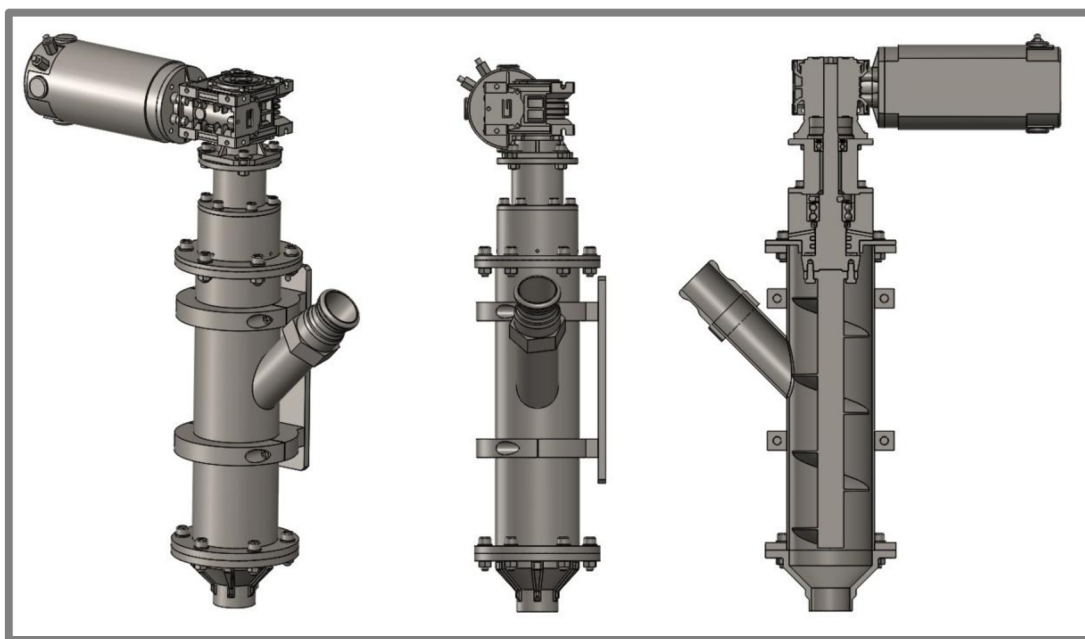
Obr. 4-12 Uložení hřídele č. 2

4.7 Zvolená řešení

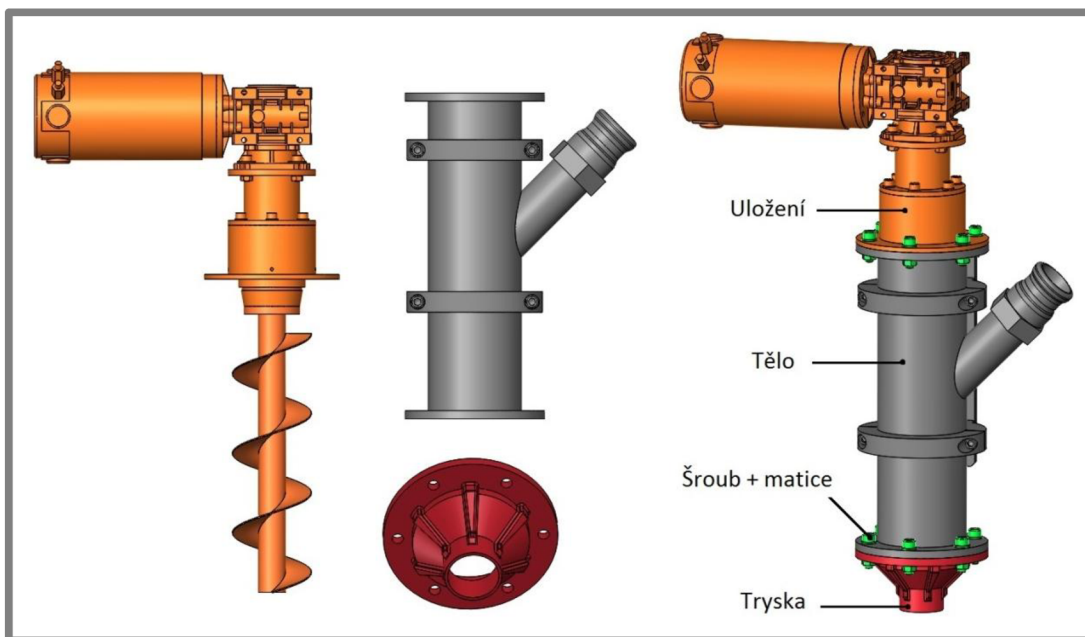
Po důkladném zvážení výhod a nevýhod jednotlivých koncepčních řešení byla vybrána tisková hlava bez míchacího zařízení. Důvodem je jednodušší konstrukce, nižší náklady na výrobu tiskové hlavy a použití aditiva, které je určeno pro aplikaci do záměsové vody. Hřídel přenášející kroutící moment od motoru ke šnekovnici byl zvolen podle Obr. 4-12, tedy hřídel s největším osazením směrem ke šnekovnici, zajištěn KM maticí a MB podložkou. Důvodem byla opět jednodušší výroba a snadná smontovatelnost celého uložení. Další zvolené parametry tiskové hlavy: průměr trysky 50 mm, průměr šnekovnice 100 mm, otáčky šnekovnice $3,5 \text{ s}^{-1}$, dopravované množství $0,837 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.

5 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

Výsledkem konstrukčního řešení je aktivní tisková hlava se šnekovým pohonem o maximálních rozměrech 740 x 495 x 193 mm. Hmotnost konstrukce bez motoru a převodovky 22,9 kg, hmotnost motoru 7,1 kg, převodovka 2,3 kg. Celková hmotnost zařízení i s materiálem je přibližně 40 kg. Tisková hlava je modulární, skládá se ze 3 hlavních celků viz Obr. 5-2 (uložení, tělo tiskové hlavy a tryska), které jsou vzájemně spojeny šroubovými spoji. Materiál je do tiskové hlavy přiváděn z boku vstupním otvorem o průměru 52,3 mm. Průměr výstupní trysky 50 mm. Pohon šneku je realizován DC motorem se šnekovou převodovkou viz Obr. 5-5.



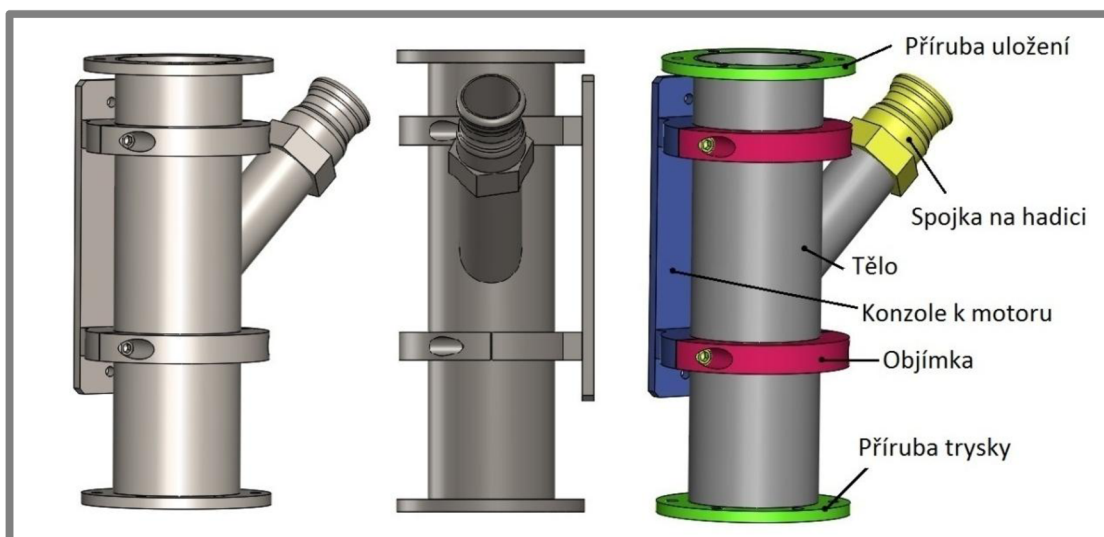
Obr. 5-1 Hlavní sestava



Obr. 5-2 Hlavní celky tiskové hlavy

5.1 Tělo tiskové hlavy

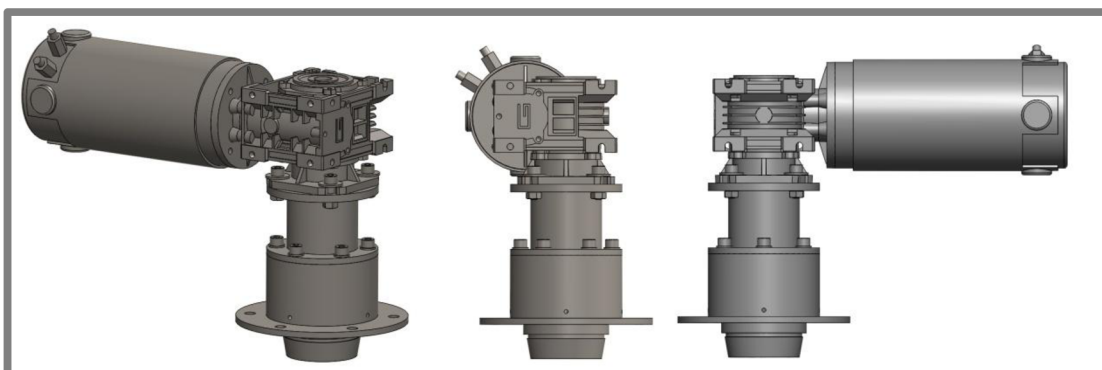
Základem těla tiskové hlavy je svařenec tvořený ze dvou nerezových trubek jedné svíslé o vnějším průměru 114,3 mm, tloušťce stěny 3mm a k ní z boku pod úhlem 45° přivařené trubky o vnějším průměru 60,3 mm, tloušťce stěny 4 mm na jejímž konci je vytvořen závit G2" pro našroubování spojky na hadici KAMLOK. [42] Rozměry trubek jsou normovány, materiál je nerezová ocel. [43] Větší, svíslá trubka byla vybírána z normovaných profilů na základě průměru šnekovnice a volby vůle mezi šnekovnicí a tělem tiskové hlavy. Doporučená vůle mezi šnekovnicí a žlabem je 5 až 10 mm. [39] Zvolená vůle je 8,3 mm, to znamená 4,15 mm na každou stranu, při použití šnekovnice o vnějším průměru 100 mm. Na každý konec svíslé trubky základního svařence jsou přivařeny dvě příruby k uchycení uložení hřídele a trysky. Kolem svíslé trubky jsou umístěny dvě objímky, které zajišťují upevnění celé tiskové hlavy přes konzolu k polohovacímu zařízení (robotickému rameni KUKA). Konzole i objímky jsou vyrobeny z duralu a jsou vzájemně spojeny šroubovými spoji.



Obr. 5-3 Tělo tiskové hlavy

5.2 Uložení hřídele

Přenos kroutícího momentu od motoru ke šnekovnici je realizován hřídelem uloženým do dvojice ložisek. Uložení hřídele se skládá ze 4 hlavních součástí: velký ložiskový domek, malý ložiskový domek, hřídel a motor se šnekovou převodovkou.



Obr. 5-4 Uložení hřídele

Ložiska jsou umístěna a zajištěna každé ve svém ložiskovém domku. Ložiskové domky jsou vůči sobě osazeny viz Obr. 5-7 z důvodu zajištění soustřednosti a jsou spojeny šesti šrouby M8. Větší ložiskový domek je svařený ze dvou částí. Ze samotného domku pro ložisko a osazení, jímž je domek přišroubován k tělu tiskové hlavy. Celý tento svařenec je na Obr 5-5 označen šedou barvou. Malý ložiskový domek má 2 vnější osazení. Spodní osazení slouží k uchycení k velkému ložiskovému domku, k hornímu osazení je pak připevněna převodovka s motorem. Poloha motoru vůči tiskové hlavě je záměrně volena tak, aby motor vyvažoval moment vzniklý připojením přívodní hadice. Z převodovky na hřídel je kroučící moment přenášen přes pero těsné. Uložení je navrženo tak, že lze oddělat převodovku s motorem a zůstane stále plně určené uložení hřídele, na které můžeme místo převodovky nasadit například převod ozubenými koly nebo řemenem viz Obr 5-5 vlevo. Šnekovnice bude k hřídeli přišroubována čtyřmi šrouby, což zajistí možnost její výměny za jinou šnekovnici. Čištění zařízení bude probíhat tak, že se odšroubují šrouby mezi velkým ložiskovým domkem a tělem tiskové hlavy a celé uložení i se šnekovnicí se vyjme a očistí.



Obr. 5-5 Uložení hřídele popis

5.2.4 Volba motoru

Výkon motoru potřebný pro pohon šnekovnice závisí na viskozitě tisknutého materiálu, která je závislá na složení směsi. Protože přesné složení směsi je teprve ve fázi vývoje a neznáme výsledné síly působící na šnekovnici byl zvolen výpočtový postup, který určuje maximální možné hodnoty kroučícího momentu, kterými můžeme namáhat zvolenou šnekovnici. Limitní hodnotu kroučícího momentu určíme ze známého průměru hřídele šnekovnice a z meze kluzu materiálu, ze kterého je vyrobena. Tisková hlava je primárně navržena pro šnekovnici o vnějším průměru 100 mm a vnitřním průměru hřídele 34 mm. Protože se jedná o experimentální tiskovou hlavu a budou se na ní zkoušet parametry tisku při různých průměrech

trysek a šnekovic, tak je nutné počítat s nejmenší hodnotou vnitřního průměru použité šnekovnice. Druhá šnekovnice, která bude případně zkoušena má tyto parametry: vnější průměr 75 mm, vnitřní průměr 17 mm, délka 353,5 mm. Výpočet maximálního výkonu motoru tedy bude proveden pro nejmenší průměr hřídele menší šnekovnice $d_s=17$ mm, vyrobené z materiálu ČSN 11375 s mezí kluzu 225 MPa.

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_k}{2} = \frac{225}{2} = 112,5 \text{ Mpa} \quad (5-1)$$

$$\tau_{max} = \frac{M_{k_max}}{W_k} = \frac{16 \cdot M_{k_max}}{\pi \cdot d_s^3} \quad (5-2)$$

$$M_{k_max} = \frac{\tau_{max} \cdot \pi \cdot d_s^3}{16} \quad (5-3)$$

$$M_k = \frac{112,5 \cdot \pi \cdot 17^3}{16} = 108524,85 \text{ N} \cdot \text{mm} = 108,5 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$P_{max} = M_{k_max} \cdot \omega = M_{k_max} \cdot 2 \cdot \pi \cdot n \quad (5-4)$$

$$P_{max} = 108,5 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 3,5 = 2386 \text{ W}$$

kde:

τ_{max}	MPa	je mez kluzu ve smyku
σ_k	MPa	- mez kluzu
W_k	mm ³	- modul průřezu v krutu
M_{k_max}	N·mm	- maximální kroutící moment
d_s	mm	- průměr hřídele menší šnekovnice
P_{max}	W	- maximální výkon motoru
ω	rad·s ⁻¹	- úhlová rychlost
n	s ⁻¹	- otáčky

Z výpočtu vyplývá, že maximální moment, který je hřídel menší šnekovnice schopen přenést je 108,5 N·m. Při otáčkách vypočítaných v kapitole 4.1.2 $n=3,5$ s⁻¹ je maximální výkon motoru 2,4 kW. Při případném překročení vypočítaných hodnot by došlo k defektu zařízení. Motor tedy bude vybírán s ohledem na výpočet a jeho kroutící moment a výkon bude nižší než vypočtené hodnoty.

Pro pohon zařízení byl zvolen kartáčový DC motor se šnekovou převodovkou z katalogu firmy Raveo. [44] Změna otáček motoru při probíhající tisku pak bude realizována pomocí inteligentní řídicí jednotky. Parametry motoru:

Tab. 5-1 Parametry motoru [44]

Kartáčový DC motor E600	
Výkon motoru	800 W
Kroutící moment motoru	2,2 N·m
Napájení	24V
Rychlost otáčení	3000 min ⁻¹
Hmotnost	7,1 kg

Převod mezi motorem a hnací hřídelí šnekovnice bude realizován šnekovou převodovkou CM 040 s těmito parametry:

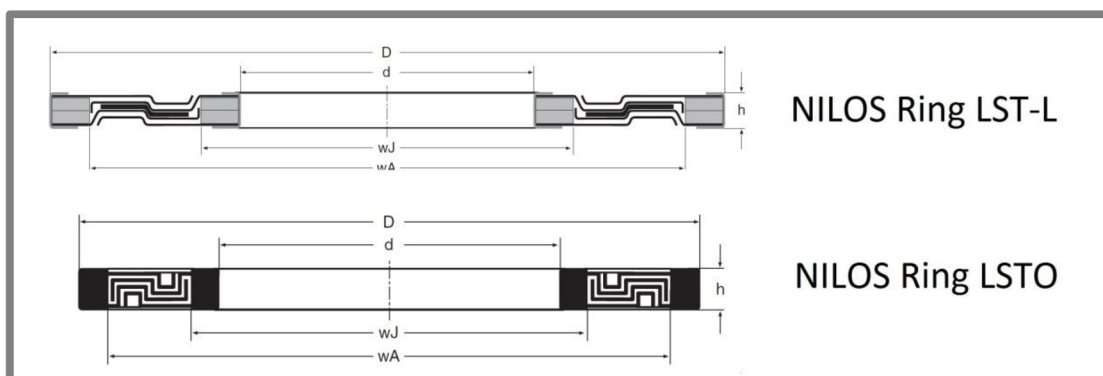
Tab. 5-2 Parametry převodovky [44]

Šneková převodovka CM040	
Převodový poměr	i=15
Výstupní kroutící moment	32 N·m
Výstupní táčky	200 min ⁻¹
Účinnost	74 až 88 %
Hmotnost	2,3 kg

Při volbě motoru byl brán ohled zejména na poměr mezi hmotností a výkonem motoru. Zvolený motor svými parametry nepřekračuje vypočítané hodnoty a jeho hmotnost je úměrná k velikosti celého zařízení. Výstupní kroutící moment 32 N·m a otáčky jsou 3,3 s⁻¹, což je hodnota velice blízká provozním otáčkám 3,5 s⁻¹.

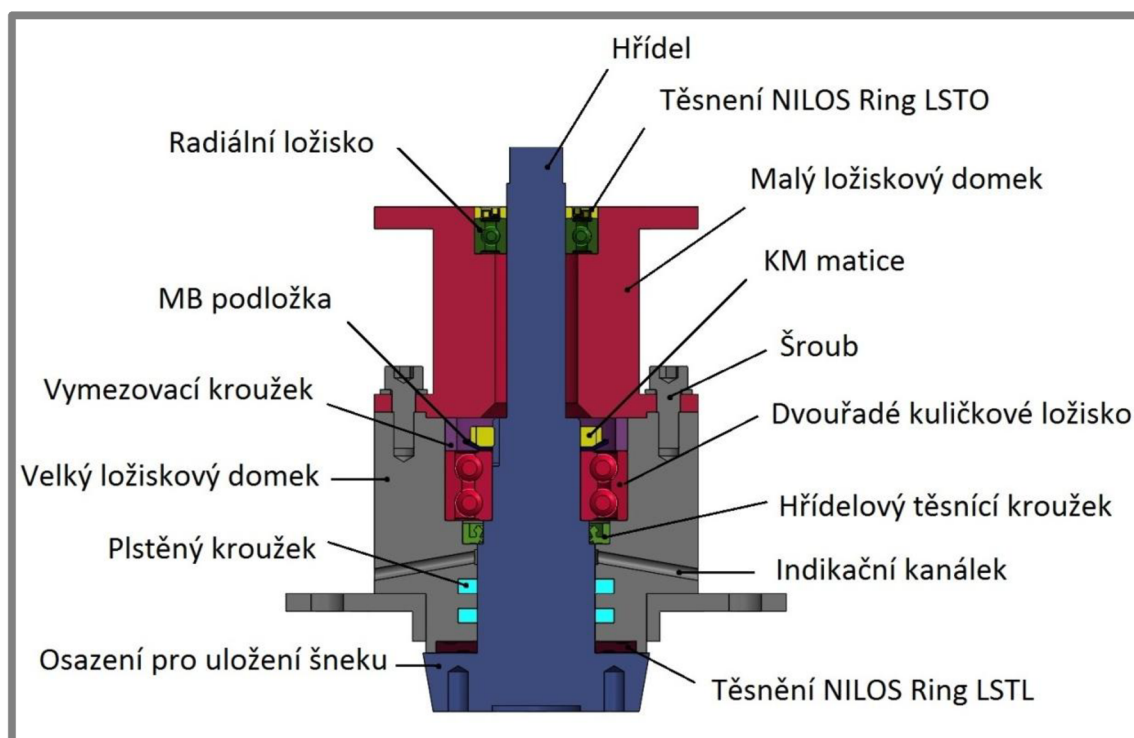
5.2.1 Těsnění

K zajištění správné funkce ložisek je důležité zajistit utěsnění ložiskového prostoru a zamezit tak vstupu vody a dalších nečistot do ložiskových domků. Z toho důvodu je ve spodní části většího ložiskového domku (Obr. 5-7), který bude vystaven kontaktu s tisknutou směsí, umístěna řada osazení a zápichů, které slouží k umístění systému těsnění. Bylo zvoleno vícestupňové těsnění, které se skládá z labyrintového těsnění NILOS Ring LSTL, dále následují dva plstěné kroužky [46] nad nimiž je zápich, ze kterého jsou do vnějšího prostoru ložiskového domku vedeny 4 indikační kanálky.



Obr. 5-6 Labyrintové těsnění NILOS Ring (upraveno) [45]

Pokud by kapalně nečistoty prošly přes labyrintové těsnění a plstěné kroužky, tak se zastaví o v pořadí čtvrté těsnění v podobě hřídelového těsnícího kroužku (gufera) [47] a vytečou ven. Pokud při vizuální kontrole tiskové hlavy spatříme nečistoty vytekající z indikačních kanálků, pak je to pro nás znamení, že nečistoty prošly přes první tři úrovně těsnění a je zde nebezpečí vniku nečistot do ložisek. Poslední ochranou ložisek je integrované kontaktní těsnění (značení 2RS v kódu ložiska), které uzavírá prostor kuliček ložiska před vnikem nečistot. Obě ložiska jsou opatřena těmito těsnícími prvky. Utěsnění menšího ložiskového domku proti vniknutí nečistot z vrchu je zajištěno pomocí labyrintového těsnění NILOS Ring LSTO. Rozdíl mezi těsněním LST-L a LSTO je v konstrukci těsnění viz Obr. 5-6 a v prostředí, pro které je těsnění určeno. Těsnění LSTO je určené pro těsnění ložisek vystavených extrémnímu znečištění prachového charakteru, těsnění LST-L je dalším vývojovým stupněm těsnění LSTO, kdy je do konstrukce labyrintu umístěno gumové těsnění na bázi flouro-elastomeru (Viton). Těsnění LST-L je tak vhodné i pro těsnění zařízení v permanentním styku s kapalným znečištěním.[45]



Obr. 5-7 Řez uložením hřídele

5.2.3 Volba ložisek

Volbu ložisek předurčují výsledné síly působící na hřídel. V tomto případě se bude jednat o síly radiální i axiální. Určení výsledných sil na hřídel je však velmi problematické. Závisí totiž zejména na viskózních vlastnostech tisknutého materiálu, které se budou měnit v závislosti na složení směsi. Další významné silové účinky v uložení mohou vznikat při sevření kameniva v prostoru mezi šnekovnicí a tělem tiskové hlavy. Protože není známo přesné složení směsi a jeho chování, můžeme určit pouze přibližnou axiální složku síly způsobenou gravitačními účinky.

Výpočet hmotnosti materiálu uvnitř tiskové hlavy

Potřebné proměnné (průměry, výšky, objemy, hmotnosti) pro výpočet byly změřeny v 3D modelu popřípadě odečteny přímo v použitém softwaru Solidworks 2017.

$$V_b = V_v - V_h - V_s = \frac{\pi \cdot d_v^2}{4} \cdot h_v - \frac{\pi \cdot d_h^2}{4} \cdot h_h - V_s \quad (5-5)$$

$$V_b = \frac{\pi \cdot 0,108^2}{4} \cdot 0,397 - \frac{\pi \cdot 0,075^2}{4} \cdot 0,034 - 4,027 \cdot 10^{-4}$$

$$V_b = 3,086 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$m_b = \rho \cdot V = 2350 \cdot 3,086 \cdot 10^{-3} = 7,25 \text{ kg} \quad (5-6)$$

kde:

V_b	m^3	je objem betonu uvnitř tiskové hlavy
V_v	m^3	- objem vnitřního válce tiskové hlavy
V_h	m^3	- objem hřídele zasahující do oblasti vnitřku hlavy
V_s	m^3	- objem šnekovnice
d_v	m	- průměr vnitřního válce tiskové hlavy
h_v	m	- výška vnitřního válce tiskové hlavy
d_h	m	- průměr hřídele zasahující do oblasti vnitřku hlavy
h_h	m	- výška hřídele zasahující do oblasti vnitřku hlavy
m_b	kg	- hmotnost betonu
ρ	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	- hustota betonu

Výpočet axiální síly do ložiska

$$F_a = F_h + F_s + F_b = m_h \cdot g + m_s \cdot g + m_b \cdot g \quad (5-7)$$

$$F_a = 1,621 \cdot 9,81 + 3,14 \cdot 9,81 + 7,25 \cdot 9,81 = 117,83 \text{ N}$$

kde:

F_a	m^3	je výsledná axiální síla
F_h	m^3	- síla od hřídele
F_s	m^3	- síla od šnekovnice
F_b	m^3	- síla od betonu
m_h	kg	- hmotnost hřídele
m_s	kg	- hmotnost šnekovnice
m_b	kg	- hmotnost betonu
g	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	- gravitační zrychlení

Z důvodu neznalosti výsledných sil v uložení byly ložiska voleny se značným naddimenzováním. K přenesení axiální síly bylo zvoleno dvouřadé kuličkové ložisko s kosoúhlým stykem 3206 A-2RS1 od společnosti SKF. Toto ložisko je nalisováno do osazení ve větším ložiskovém domu a z vrchu je přitaženo přes vymezovací kroužek osazením menšího ložiskového domku. Hřídel je k ložisku zajištěna osazením, KM maticí a MB podložkou.

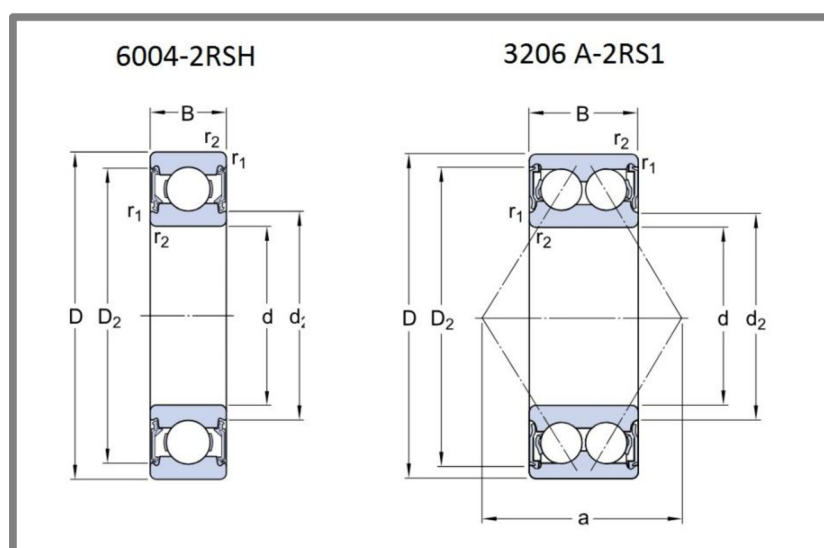
Tab. 5-3 Parametry ložiska 3206 A-2RS1 [48]

Dvouřadé kuličkové ložisko 3206 A-2RS1		
Vnější průměr ložiska	D_{L1}	Ø62 mm
Vnitřní průměr ložiska	d_{L1}	Ø30 mm
Tloušťka ložiska	B_{L1}	23,8 mm
Základní statická únosnost	C_{0L1}	20,4 kN
Základní dynamická únosnost	C_{L1}	30 kN
Maximální otáčky	n_{L1}	7500 min ⁻¹

Druhé, menší ložisko letmého uložení bylo zvoleno radiální kuličkové ložisko od firmy SKF s označením 6004-2RSH. Ložisko je určeno k přenášení radiálních sil a je zalisované do menšího ložiskového domku.

Tab. 5-4 Parametry ložiska 6004-2RSH [49]

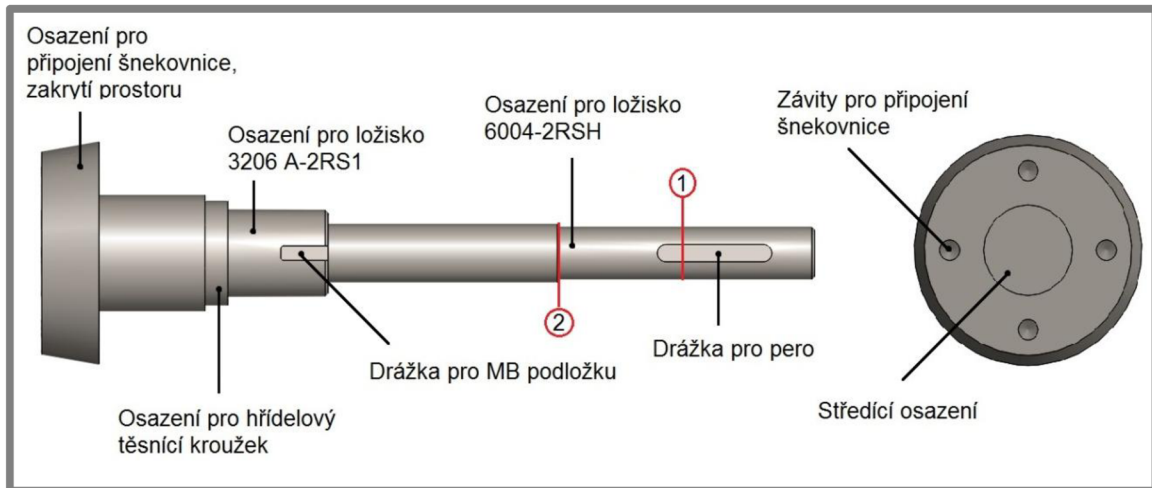
Radiální kuličkové ložisko 6004-2RSH		
Vnější průměr ložiska	D_{L2}	Ø42 mm
Vnitřní průměr ložiska	d_{L2}	Ø20 mm
Tloušťka ložiska	B_{L2}	12 mm
Základní statická únosnost	C_{0L2}	5 kN
Základní dynamická únosnost	C_{L2}	9,95 kN
Maximální otáčky	n_{L2}	11000 min ⁻¹



Obr. 5-8 Ložiska (upraveno) [48], [49]

5.2.5 Kontrola hřídele

Přenos krouticího momentu od motoru ke šnekovnici bude realizován pomocí hřídele na Obr. 5-10. Hřídel je vyroben z nerezové oceli ČSN 17040 s mezí kluzu 250 MPa. Na hřídeli je řada funkčních ploch, drážek a osazení sloužících k uložení ložisek popřípadě těsnění. Největší osazení hřídele slouží k uchycení šnekovnice a k uzavření prostoru těsnění. Šnekovnice je k hřídeli uchycena pomocí 4 šroubů, což umožňuje snadnou výměnu šnekovnic.



Obr. 5-9 Hřídel

Výpočet bezpečnosti

Bezpečnost hřídele bude vypočítána pro dvě nebezpečná místa na hřídeli (drážka pro pero a osazení), červeně označená na Obr. 5-10. Průměr hřídele v nebezpečných místech je $d=18$ mm. Součinitelé tvaru pro drážku a osazení byly odečteny z grafů v dostupné literatuře [50] a jejich hodnoty jsou $\alpha_{\tau 1}=2,8$ a $\alpha_{\tau 2}=2,05$.

Výpočet bezpečnosti v místě drážky označené na Obr. 5.10 číslem 1

$$\tau_k = 0,5 \cdot \sigma_k = 0,5 \cdot 250 = 125 \text{ Mpa} \quad (5-8)$$

$$\tau_{\max \square 1} = \alpha_{\tau 1} \cdot \frac{M_k}{W_k} = \alpha_{\tau 1} \cdot \frac{16 \cdot M_k}{\pi \cdot d^3} = 2,8 \cdot \frac{16 \cdot 32}{\pi \cdot 0,018^3} = 78,25 \text{ MPa} \quad (5-9)$$

$$k_{k_1} = \frac{\tau_k}{\tau_{\max \square 1}} = \frac{125}{78,25} = 1,6 \quad (5-10)$$

Výpočet bezpečnosti v osazení označené na Obr. 5.10 číslem 2

$$\tau_{\max \square 2} = \alpha_{\tau 2} \cdot \frac{M_k}{W_k} = \alpha_{\tau 2} \cdot \frac{16 \cdot M_k}{\pi \cdot d^3} = 2,05 \cdot \frac{16 \cdot 32}{\pi \cdot 0,018^3} = 57,29 \text{ MPa} \quad (5-11)$$

$$k_{k_2} = \frac{\tau_k}{\tau_{\max \text{ [0]1}}} = \frac{125}{57,29} = 2,18 \quad (5-12)$$

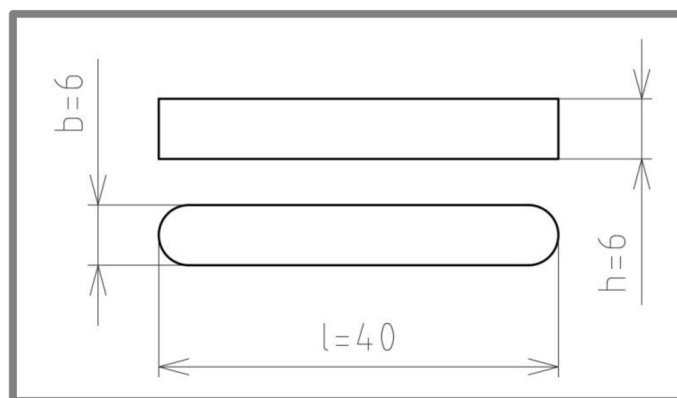
kde:

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	- kroučící moment motoru
d	m	- průměr hřídele
$\alpha_{\tau 1}$	[-]	- součinitel tvaru pro drážku
$\alpha_{\tau 2}$	[-]	- součinitel tvaru pro osazení
$\tau_{\max \text{ [0]1}}$	MPa	- napětí v místě drážky pro pero
$\tau_{\max \text{ [0]2}}$	MPa	- napětí v místě osazení
k_{k_1}	[-]	- bezpečnost v místě drážky pro pero k MSP
k_{k_2}	[-]	- bezpečnost v místě osazení k MSP

Minimální hodnota bezpečnosti hřídele na Obr. 5-10 namáhaného krutem je v místě drážky pro pero a její velikost je $k_k=1,6$.

Kontrola otláčení pera

Kroučící moment z převodovky na hřídel bude přenášen pomocí pera těsného. Pero bylo navrženo podle drážky v náboji převodovky a má rozměry: výška pera $h=6$ mm, šířka $b=6$ mm, zasunutí do náboje převodovky $t_1=2,5$ mm, zvolená délka pera těsného $l=40$ mm. Základní hodnota tlaku p_0 pro ocel stanovená z literatury [51] je 150 MPa. Dovolený tlak na bocích drážek pro pera těsná a jednosměrné zatížení s malými rázy je $p_D=0,7 \cdot p_0$.



Obr. 5-10 Pero těsné

$$F = \frac{2 \cdot M_k}{d} = \frac{2 \cdot 32}{0,018} = 3555,56 \text{ N} \quad (5-13)$$

$$p_D = 0,7 \cdot p_0 = 0,7 \cdot 150 = 105 \text{ MPa} \quad (5-14)$$

$$p_D \geq \frac{F}{t_1 \cdot (l - b)} \quad (5-15)$$

$$105 \geq \frac{3555,56}{2,5 \cdot (40 - 6)} = 41,83 \dots \text{platí}$$

kde:

F	N	je obvodová síla na povrchu hřídele
M_k	N·m	- kroutící moment na hřídeli
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

Zvolené pero vyhovuje, splňuje podmínku kontroly na otláčení.

Kontrola šroubového spoje hřídel-šnekovnice

Z hřídele na šnekovnici bude kroutící moment převeden šroubovým spojem. Šroubový spoj se skládá ze čtyř šroubů ISO 4014 M8 x 20 A2-70 s mezí kluzu $R_{p0,2}=450$ MPa. Tyto šrouby budou namáhány kombinovaným zatížením způsobeným přenosem kroutícího momentu, silami v předpětí a silou gravitačních účinků. Použité vzorce a konstanty dohledány v dostupné literatuře. [51] $f_s = 0,3$; $f_0 = f = 0,2$; $\alpha = 60^\circ$, $k_n = 1,25$; $P = P_H = 1,25$ mm, $A_s = 36,6$ mm², $s = 13$ mm, $d_H = 9$ mm, $D_r = 53$ mm

$$F_s = \frac{2 \cdot M_k}{D_r \cdot i} = \frac{2 \cdot 32}{0,053 \cdot 4} = 301,89 \text{ N} \quad (5-16)$$

$$F_i = \frac{k_n \cdot F_s}{f_s} = \frac{1,5 \cdot 301,89}{0,3} = 1509,43 \text{ N} \quad (5-17)$$

$$H = 0,5 \cdot \sqrt{3} \cdot P = 0,5 \cdot \sqrt{3} \cdot 1,25 = 1,08 \text{ mm} \quad (5-18)$$

$$d_2 = d_s - \frac{3}{4} \cdot H = 8 - \frac{3}{4} \cdot 1,08 = 7,19 \text{ mm} \quad (5-19)$$

$$d_3 = d_s - \frac{17}{12} \cdot H = 8 - \frac{17}{12} \cdot 1,08 = 6,47 \text{ mm} \quad (5-20)$$

$$d_0 = \frac{s + d_H}{2} = \frac{13 + 9}{2} = 11 \text{ mm} \quad (5-21)$$

$$M_u = M_z + M_o = \frac{F_i \cdot d_2}{2} \left[\frac{P_h + \pi \cdot d_2 \cdot f \cdot \sec\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{\pi \cdot d_2 - f \cdot P_h \cdot \sec\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \right] + \frac{F_i \cdot d_o \cdot f_o}{2} \quad (5-22)$$

$$M_u = \frac{1509,43 \cdot 7,19}{2} \left[\frac{1,25 + \pi \cdot 7,19 \cdot 0,2 \cdot \sec\left(\frac{60^\circ}{2}\right)}{\pi \cdot 7,19 - 0,2 \cdot 1,25 \cdot \sec\left(\frac{60^\circ}{2}\right)} \right] + \frac{1509,43 \cdot 11 \cdot 0,2}{2} = 3234,26 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

$$\sigma_i = \frac{F_i + F_s + F_b}{A_s} = \frac{F_i + g + m_s \cdot g + m_b \cdot g}{A_s} \quad (5-23)$$

$$\sigma_i = \frac{1509,43 + 3,14 \cdot 9,81 + 7,25 \cdot 9,81}{36,6} = 44,03 \text{ MPa}$$

$$\tau_s = \frac{16 \cdot M_z}{\pi \cdot d_3^3} = \frac{16 \cdot 1573,89}{\pi \cdot 6,47^3} = 29,60 \text{ MPa} \quad (5-24)$$

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_i^2 + 3 \cdot \tau_s^2} = \sqrt{44,03^2 + 3 \cdot 29,60^2} = 67,62 \text{ MPa} \quad (5-25)$$

$$k_{k_3} = \frac{R_{p0,2}}{\sigma_{red}} = \frac{450}{67,62} = 6,65 \quad (5-26)$$

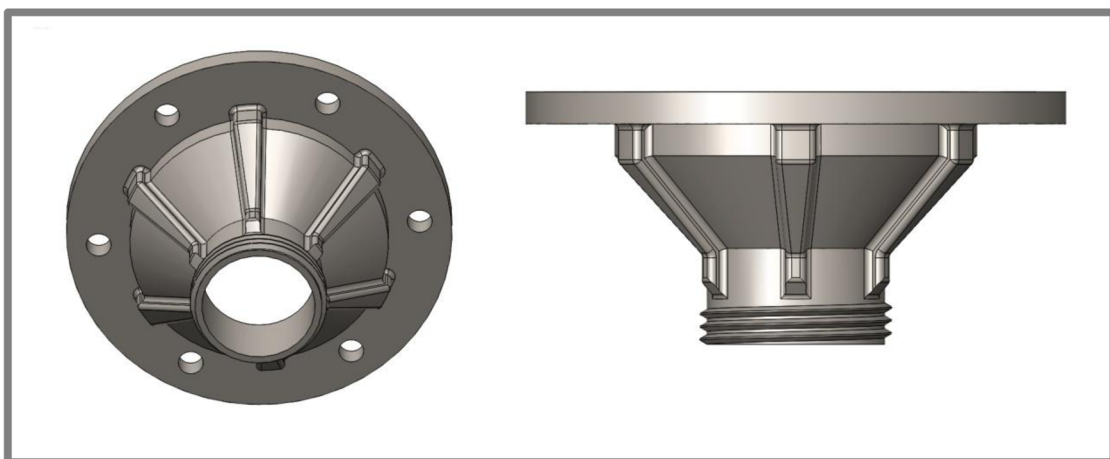
kde:

F_s	MPa	je provozní síla od momentu působící kolmo na šroub
D_r	m	- průměr roztečné kružnice šroubů
i	[-]	- počet šroubů
M_k	N·m	- kroucí moment na hřídeli
F_i	N	- síla předpětí jednoho šroubu
k_n	[-]	- návrhový součinitel
f_s	[-]	- součinitel tření na stykových plochách
f	[-]	- součinitel tření v závitech
f_o	[-]	- součinitel tření pod hlavou šroubu
H	mm	- výška základního trojúhelníku
P	mm	- rozteč
d_2	mm	- střední průměr vnějšího závitu
d_s	mm	- jmenovitý velký průměr závitu
d_3	mm	- malý průměr vnějšího závitu
d_o	mm	- střední průměr dosedací plochy pod hlavou šroubu
s	mm	- rozměr pro klíč
d_H	mm	- díra pro šroub
M_u	MPa	- utahovací moment
M_z	MPa	- moment potřebný pro překonání tření v závitech
M_o	MPa	- moment pro překonání tření na dosedací ploše
σ_i	MPa	- napětí od síly předpětí a gravitačních sil

F_{ξ}	m^3	- síla od šnekovnice
F_b	m^3	- síla od betonu
m_{ξ}	kg	- hmotnost šnekovnice
m_b	kg	- hmotnost betonu
g	$m \cdot s^{-2}$	- gravitační zrychlení
τ_{ξ}	MPa	- smykové napětí ve šroubu
σ_{red}	MPa	- redukované napětí podle HMH
$R_{p0,2}$	MPa	- mez kluzu šroubu
$k_{k,3}$	[-]	- součinitel bezpečnosti vůči MSP

5.3 Tryska

Tryska je umístěna ve spodní části tiskové hlavy a má za úkol tvarovat beton vycházející z tiskové hlavy. Uchycení trysky k tělu tiskové hlavy je zajištěno šesti šrouby. Předpokládaná metoda výroby je 3D tisk metodou SLM - spékáním nerezového prášku pomocí laseru. Tryska je opatřena žebrováním pro zvýšení její tuhosti a na konci trysky je na vnějším průměru vytvořen závit M56x4, na který se mohou našroubovat různé koncovky pro dosažení tvarové různorodosti výnosů.



Obr. 5-11 Tryska

6 DISKUZE

V rámci této bakalářské práce byla navržena aktivní tiskové hlava se šnekovým pohonem. Návrh tiskové hlavy byl inspirován existujícími řešeními tiskových hlav uvedenými v rešeršní části práce. Konstrukční řešení pak bylo navrhováno s ohledem na jednoduchost výroby a cenovou dostupnost použitých komponent. Mezi přednosti tiskové hlavy patří možnost kontinuálního tisku, snadná rozebíratelnost nutná pro čištění tiskové hlavy a možnost výměny některých částí tiskové hlavy jako je šnekovnice nebo koncovka trysky při optimalizaci tiskových parametrů zařízení.

Byla navržena dvě hlavní koncepční řešení pro dva různé systémy aplikace aditiv urychlujících tuhnutí směsi. První koncepční návrh je zaměřen na tiskovou hlavu určenou pro tisk směsi s aditivem přidávaným do betonu těsně před vstupem do tiskové hlavy. Z tohoto důvodu je v tiskové hlavě umístěno míchaací zařízení k zajištění kvalitního promíchání směsi s aditivem, což zvyšuje složitost a výrobní náročnost celého zařízení. Druhý koncepční návrh je určený pro tisk směsi s aplikací aditiva do záměsové vody. Výhoda tohoto koncepčního návrhu spočívá v jednoduchosti konstrukce a nižší hmotnosti tiskové hlavy. Zmíněné výhody druhého koncepčního návrhu a použití aditiv určených pro aplikaci do záměsové vody vedly ke zvolení právě tohoto řešení a jeho rozpracování ve výsledný konstrukční návrh.

Při výpočtu dopravovaného množství materiálu a rychlosti tisku bylo použito několik zjednodušení, které mohou způsobit odchylky od požadovaných tiskových parametrů. Jednalo se zejména o idealizaci tvaru výnosu, volbu součinitele plnění, součinitele vlivu sklonu dopravníku nebo koeficientu tření mezi materiálem a pláštěm, které se mohou lišit od hodnot reálných. Tyto případné diference však bude možné optimalizovat změnou otáček motoru a minimální požadavek na rychlost vytlačování ze zadání $0,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ by měl být bez problému dosažen.

Výsledný konstrukční návrh se skládá ze tří rozebíratelných celků: tělo tiskové hlavy s uchycením k polohovacímu zařízení, tryska a uložení hřídele s převodovkou, motorem a šnekovnicí. Zvolený materiál pro výrobu tiskové hlavy je nerezová ocel. Důvodem volby byla chemická a korozní odolnost při styku tiskové hlavy s betonovou směsí. Hliníková konstrukce byla zavrhnuta zejména z důvodu agresivity aditiva přidávaného do betonu a jeho reaktivnosti s hliníkovou konstrukcí. Po každém tisku pak budou hlavní části tiskové hlavy rozebrány a důkladně vyčištěny.

Celková hmotnost tiskové hlavy i s materiálem je cca 40 kg a její připojovací rozměry k polohovacímu zařízení odpovídají připojovacím rozměrům robota KUKA KR60HA. Jelikož se jedná o první prototyp tiskové hlavy na beton, tak je nutné ji vyrobit a odzkoušet, k čemuž nám pomůže právě zmiňované robotické rameno. Pro tisk velkorozměrných dílů typu prefabrikovaných bloků, popřípadě celých stěn domů je toto polohovací zařízení nedostatečné a do budoucna bude muset být tisková hlava opatřena větším polohovacím zařízením.

7 ZÁVĚR

Hlavním cílem této bakalářské práce bylo vytvořit konstrukční návrh tiskové hlavy určené pro kontinuální tisk velkorozměrových dílců z betonové směsi. Tento cíl byl úspěšně splněn stejně jako všechny ostatní dílčí cíle.

V úvodní části práce je provedena rešerše současných zařízení používaných v oblasti 3D tisku betonu, následovaná analýzou problému a stanovením cíle bakalářské práce. V koncepční části jsou stanoveny základní parametry tisku a zpracována 2 koncepční řešení pro dva různé systémy aplikace aditiv. Dále bylo zvolené koncepční řešení následně rozpracováno v konstrukční návrh, byl vytvořen model celého zařízení a k němu výkresy vybraných sestav.

Výstupem této práce je konstrukční návrh tiskové hlavy o maximálních rozměrech 740 x 495 x 193 mm. Celková hmotnost zařízení je 32,3 kg a zařízení je určeno pro tisk materiálu s aditivou přidávanými do záměsové vody.

Tato bakalářská práce se zabývá pouze návrhem mechanické části tiskové hlavy, pro zajištění správné funkce zařízení však bude nutné vytvořit řídicí systém, který bude synchronizovat pohyb polohovacího zařízení, s otáčkami šneku a se zařízením na dopravu betonu k tiskové hlavě. Další vývoj tiskové hlavy by se měl ubírat právě směrem optimalizace tiskových vlastností a synchronizace použitých zařízení. Dále pro využití tiskové hlavy v praxi bude nutné tiskovou hlavu opatřit adekvátním polohovacím zařízením.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] LEAL DE SILVA, Wilson. *3D Concrete Printing - Technological issues in concrete mix design and extrusion* [online]. In: . Danish technological institute, 2017, s. 13 [cit. 2018-04-14].
- [2] MOLITCH-HOU, Michael. 3D printed guitarmaker leads students in building mobile concrete 3D printer. *3D printing industry* [online]. 2015 [cit. 2018-04-14]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/news/3d-printed-guitarmaker-leads-students-in-building-mobile-concrete-3d-printer-54546/>
- [3] 3D PRINTING CONCRETE. *AMALGAMMA* [online]. 2015 [cit. 2018-04-19]. Dostupné z: <https://www.amalgamma.org/3d-printing-concrete>
- [4] BOS, Freek, Rob WOLFS, Zeeshan AHMED a Theo SALET. Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing. *Virtual and Physical Prototyping* [online]. Taylor, 2016, **11**(3), 209-225 [cit. 2018-04-14]. DOI: 10.1080/17452759.2016.1209867. ISSN 1745-2759.
- [5] KHOSHNEVIS, Behrokh. Behrokh Khoshnevis. *Behrokh Khoshnevis* [online]. 2018 [cit. 2018-04-14]. Dostupné z: <http://www.bkhoshnevis.com/>
- [6] ZHANG, Jing a Behrokh KHOSHNEVIS. Optimal machine operation planning for construction by Contour Crafting. *Automation in Construction* [online]. 2013, **29**, 50-67 [cit. 2018-04-14]. ISSN 0926-5805.
- [7] TU Eindhoven starts using kingsize 3-D concrete printer. In: *Phys.org* [online]. Eindhoven, 2015 [cit. 2018-03-23]. Dostupné z: <https://phys.org/news/2015-10-tu-eindhoven-kingsize-3d-concrete.html>
- [8] System Solutions and Motion Control. In: *HepcoMotion* [online]. 2018 [cit. 2018-04-14]. Dostupné z: <https://www.hepcotion.com/wp-content/uploads/2015/03/hepcotion-system-solutions-and-motion-control-02.jpg>
- [9] Aips cor 3D printers features. *Aips cor* [online]. b.r. [cit. 2018-04-14]. Dostupné z: <http://apis-cor.com/en/3d-printer>
- [10] KR 60. *KUKA* [online]. b.r. [cit. 2018-04-14]. Dostupné z: <https://www.kuka.com/en-de/products/robot-systems/industrial-robots/kr-60>
- [11] *Concrete pump monitoring system*. 1993. USA. US5332366. Uděleno 26.7.1994. Zapsáno 22.1.1993.
- [12] Stacionární čerpadlo betonu Putzmeister P13 DMR. In: *PM CZ s.r.o.* [online]. 2017 [cit. 2018-04-14]. Dostupné z: http://www.putzmeister.cz/Stacionarni_cerpadla_betonu_Putzmeister_diesel.html
- [13] Šnekové čerpadlo betonu Putzmeister SP 11THF. *PM CZ s.r.o.* [online]. 2017 [cit. 2018-04-14]. Dostupné z: http://www.putzmeister.cz/Snekova_cerpadla_na_potery_Putzmeister_diesel.html
- [14] Jak pracuje peristaltické nebo hadicové čerpadlo. *VERDER passion for pumps* [online]. b.r. [cit. 2018-04-14]. Dostupné z: <https://www.verderliquids.com/cz/cs/podle-typu/jak-pracuje-peristalticke-nebo-hadicove-cerpadlo/>
- [15] Peristaltické čerpadlo P65. In: *GEKOS* [online]. b.r. [cit. 2018-04-14]. Dostupné z: <http://www.gekos.cz/peristalticke-cerpadlo-p65>
- [16] HELA, Rudolf. *Technologie betonu. Modul M01: BJ 04 Technologie betonu I.*

- Brno: Vysoké učení technické, Fakulta stavební, 2005, 110 s. : il.
- [17] ŠČUČKA, Jiří a Petr MARTINEC. *Stavební hmoty 1: Beton*. Ostrava: FAST VŠB - Technická Univerzita Ostrava, 2013.
- [18] BULLARD, Jeffrey, Hamlin JENNINGS, Richard LIVINGSTON, Andre NONAT, George SCHERER, Jeffrey SCHWEITZER, Karen SCRIVENER a Jeffrey THOMAS. Mechanisms of cement hydration. *Cement and Concrete Research* [online]. Elsevier Ltd, 2011, **41**(12), 1208-1223 [cit. 2018-04-28]. DOI: 10.1016/j.cemconres.2010.09.011. ISSN 0008-8846.
- [19] VAZQUEZ, A. a T.M. PIQUE. Biotech admixtures for enhancing portland cement hydration. *Biopolymers and Biotech Admixtures for Eco-Efficient Construction Materials*. Elsevier Inc, 2016, s. 81-98. DOI: 10.1016/B978-0-08-100214-8.00005-1. ISBN 9780081002148.
- [20] SKŘIVÁNEK, Michal. *Vývoj samozhutnitelných betonů s rychlými náběhy pevnosti a modulů pružnosti*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební, 2015. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [21] HORSKÝ, Marek a Ivana LUSOVÁ. Činitele ovlivňující rychlost nárůstu pevnosti betonu II. *ABS-portál.cz: odborný stavební portál* [online]. 2013 [cit. 2018-04-14]. Dostupné z: <https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/materialy-a-vyroby/beton/cinitele-ovlivnujici-rychlost-narustu-pevnosti-betonu-ii>
- [22] BLAŽEK, Michal. *Vliv počátečních podmínek na modul pružnosti mostního betonu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební, 2012. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [23] ČSN EN 934-2+A1 (722326) *A Přísady do betonu, malty a injektážní malty: Přísady do betonu - Definice, požadavky, shoda, označování a značení štítkem*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [24] TREFIL, Vladislav. Snížení nákladů na výrobu prefabrikátů použitím moderní přísady urychlující tvrdnutí, 1. díl. *TIP - Technika. Informace. Poradenství*. [online]. 2015 [cit. 2018-04-14]. Dostupné z: <http://www.tip-basf.cz/snizeni-nakladu-na-vyrobu-prefabritaku-pouzitim-moderni-prisady-urychlujici-tvrdnuti-1-dil>
- [25] *Robotic systems for automated construction*. 2005. United States. US7641461B2. Uděleno 5.1.2010. Zapsáno 21.1.2005.
- [26] *Nozzle for forming an extruded wall with rib-like interior*. 2006. United States. US7874825B2. Uděleno 25.1.2011. Zapsáno 25.10.2006.
- [27] *Contour crafting extrusion nozzles*. 2008. United States. US8801415B2. Uděleno 12.8.2014. Zapsáno 23.10.2008.
- [28] *Three dimensional print head for concrete printing and three dimensional printer for concrete printing*. 2016. The Republic of Korea. KR20170125603A. Uděleno 15.11.2017. Zapsáno 4.5.2016.
- [29] *Extruder system for additive manufacturing*. 2016. United States. US 2016/0303802 A1. Uděleno 20.10.2016. Zapsáno 13.4.2016.
- [30] *Apparatus and method for creating three-dimensional objects*. 1990. Great Britain. EP0426363A2. Uděleno 08.05.1991. Zapsáno 24.10.1990.
- [31] *Gantry robotics systems and related material transport for contour crafting*. 2007. Canada. CA2667483C. Uděleno 15.5.2008. Zapsáno 5.11.2007.

- [32] *Deployable contour crafting*. 2006. United States. US7814937B2. Uděleno 19.10.2010. Zapsáno 25.10.2006.
- [33] *Method and apparatus for delivery of cementitious materials*. 2012. United States. US20140252668A1. Uděleno 11.9.2014. Zapsáno 31.10.2012.
- [34] *Hardening-accelerator and a method for accelerating the hardening of hydraulic binders and mixtures thereof*. 2012. World Intellectual Property Organization. WO2013/066192 A1. Uděleno 10.5.2013. Zapsáno 5.11.2012.
- [35] *3D Concrete Printing Workshop – 3D Printet Byggeri* [online]. Teknologisk Institut, 2017 [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=uZqdjE6qFFI>
- [36] SORDYL, Martin. *Vertikální šnekový dopravník* [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2017 [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/66974>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce Jiří Malášek.
- [37] Šnekovnice - Taurus. *Taurus s.r.o. Chrudim* [online]. 2018 [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <http://www.taurus-sro.cz/polotovary-a-nahradni-dily/snekovnice.html>
- [38] GORST, N, S WILLIAMSON, P PALLET a L CLARK. *Friction in temporary works*. Birmingham: HSE Books, 2003. ISBN 07-176-2613-X.
- [39] DRAŽAN, František a Karel JEŘÁBEK. *Manipulace s materiálem: vysokošk. učebnice*. 1. vydání. Praha: SNTL, 1979, 454 s.
- [40] DRAŽAN, František, Věra VOŠTOVÁ, Karel JEŘÁBEK a Milan BRAND. *Teorie a stavba dopravníků*. 1. vydání. Praha: ČVUT, 1983.
- [41] SORDYL, Martin. *Vertikální šnekový dopravník*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2017. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [42] Kamlok - vsuvka s vnitřním závitem. *GUMEX: Pružné partnerství* [online]. 2015 [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <https://www.gumex.cz/kamlok-vsuvka-s-vnitrnim-zavitem-14508.html#prettyPhoto>
- [43] Nerezové trubky - svařované. *Inerez.cz: Váš online dodavatel nerezového materiálu a zařízení* [online]. 2018 [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <https://www.inerez.cz/nerezove-trubky-a-jekly/nerezove-trubky-svarovane/>
- [44] DC motory se šnekovými převodovkami. *Raveo: world of motion* [online]. 2016 [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: http://www.raveo.cz/sites/default/files/download/2016/12/katalog_-_dc_snekove.pdf
- [45] Katalog. *NILOS RING* [online]. 2018 [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <http://www.nilos-ring.com/default.aspx/G/111327/L/1031/R/-1/T/122840/A/2/ID/122936>
- [46] FR40535WP001 Plstěný kroužek 40x53x5. *KRAMP* [online]. 2018 [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <https://www.kramp.com/shop-cz/cs/268514/1417619/1419409/FR40535WP001+Plst%C4%9Bn%C3%BD+krou%C5%BEk+40x53x5>
- [47] RUBENA CR 36x50x7 GP.WAS NBR gufero dvoubřité s prachovkou, nitril-butadien-kaučuk. *ARKOV* [online]. 2018 [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <https://www.arkov.cz/p/cr-36x50x7-gp-was-nbr-gufero-dvoubrite-s-prachovkou->

nitril-butadien-kaucuk-rubena-162049

- [48] Angular contact ball bearings, double row. *SKF* [online]. b.r. [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <http://www.skf.com/group/products/bearings-units-housings/ball-bearings/angular-contact-ball-bearings/double-row-angular-contact-ball-bearings/double-row/index.html?designation=3206%20A-2RS1>
- [49] Deep groove ball bearings. *SKF* [online]. b.r. [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <http://www.skf.com/group/products/bearings-units-housings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/index.html?designation=6004-2RSH>
- [50] JANÍČEK, Přemysl, Emanuel ONDRÁČEK a Jan VRBKA. *Mechanika těles: Pružnost a pevnost I*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1987, 286 s.
- [51] SHIGLEY, Joseph, Charles MISCHKE, Richard BUDYNAS, Martin HARTL a Miloš VLK. *Konstruování strojních součástí*. 1. vyd. V Brně: VUTIUUM, 2010. ISBN 978-80-214-2629-0.

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

Zkratka	Význam
CC	Contour crafting
3D	Třídídimenzionální
ČSN	Česká technická norma
MSP	Mezní stav pružnosti
SLM	Selective laser melting
HMH	Podmínka měrné energie napjatosti změny tvaru

Veličina	Jednotka	Význam
V	m ³	- objem tištěného materiálu
d _v	m	- průměr výnosu
l _v	m	- délka výnosu
v _{posuv}	m · s ⁻¹	- rychlost posuvu tiskové hlavy
t	h	- čas za který bude vytištěn daný objem materiálu
α	rad	- úhel stoupání šnekovnice
s	mm	- stoupání šnekovnice
D	mm	- průměr šnekovnice
g	m · s ⁻²	- gravitační zrychlení
μ ₁	-	- koeficient tření mezi materiálem a pláštěm
μ ₂	-	- koeficient tření mezi materiálem a šnekovnicí
n _{min}	s ⁻¹	- minimální otáčky šnekovnice
n	s ⁻¹	- otáčky šnekovnice
S	m ²	- plocha uvnitř těla dopravníku
v _s	m · s ⁻¹	- vertikální rychlost
C _H	-	- součinitel vlivu sklonu dopravníku
ψ	-	- součinitel plnění
τ _{max}	MPa	- mez kluzu ve smyku
σ _k	MPa	- mez kluzu
W _k	mm ³	- modul průřezu v krutu
M _{k,max}	N · mm	- maximální kroutící moment
d _š	mm	- průměr hřídele menší šnekovnice
P _{max}	W	- maximální výkon motoru
ω	rad · s ⁻¹	- úhlová rychlost
V _b	m ³	- objem betonu uvnitř tiskové hlavy
V _v	m ³	- objem vnitřního válce tiskové hlavy
V _h	m ³	- objem hřídele zasahující do oblasti vnitřku hlavy
V _š	m ³	- objem šnekovnice
d _v	m	- průměr vnitřního válce tiskové hlavy
h _v	m	- výška vnitřního válce tiskové hlavy
d _h	m	- průměr hřídele zasahující do oblasti vnitřku hlavy
h _h	m	- výška hřídele zasahující do oblasti vnitřku hlavy
m _b	kg	- hmotnost betonu
ρ	kg · m ⁻³	- hustota betonu

F_a	m^3	- výsledná axiální síla
F_h	m^3	- síla od hřídele
F_{ξ}	m^3	- síla od šnekovnice
F_b	m^3	- síla od betonu
m_h	kg	- hmotnost hřídele
m_{ξ}	kg	- hmotnost šnekovnice
m_b	kg	- hmotnost betonu
τ_k	MPa	- mez kluzu ve smyku
M_k	$N \cdot m$	- kroutící moment na hřídeli
d	m	- průměr hřídele
$\alpha_{\tau 1}$	[-]	- součinitel tvaru pro drážku
$\alpha_{\tau 2}$	[-]	- součinitel tvaru pro osazení
$\tau_{\max \text{ 1}}$	MPa	- napětí v místě drážky pro pero
$\tau_{\max \text{ 2}}$	MPa	- napětí v místě osazení
k_{k_1}	[-]	- bezpečnost v místě drážky pro pero k MSP
k_{k_2}	[-]	- bezpečnost v místě osazení k MSP
F	N	- obvodová síla na povrchu 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
F_{ξ}	MPa	- provozní síla od momentu působící kolmo na šroub
D_r	m	- průměr roztečné kružnice šroubů
i	[-]	- počet šroubů
F_i	N	- síla předpětí jednoho šroubu
k_n	[-]	- návrhový součinitel
f_s	[-]	- součinitel tření na stykových plochách
H	mm	- výška základního trojúhelníku
P	mm	- rozteč
d_2	mm	- střední průměr vnějšího závitu
d_{ξ}	mm	- jmenovitý velký průměr závitu
d_3	mm	- malý průměr vnějšího závitu
d_0	mm	- střední průměr dosedací plochy pod hlavou šroubu
s	mm	- rozměr pro klíč
d_H	mm	- díra pro šroub
f	[-]	- součinitel tření v závitech
f_0	[-]	- součinitel tření pod hlavou šroubu
M_u	MPa	- utahovací moment
M_z	MPa	- moment potřebný pro překonání tření v závitech
M_o	MPa	- moment pro překonání tření na dosedací ploše
σ_i	MPa	- napětí od síly předpětí a gravitačních sil
τ_{ξ}	MPa	- smykové napětí ve šroubu
σ_{red}	MPa	- redukované napětí podle HMM
$R_{p0,2}$	MPa	- mez kluzu šroubu
k_{k_3}	[-]	- součinitel bezpečnosti šroubu vůči MSP

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 2-1 Aktivní tisková hlava se šnekovým pohonem [2]	14
Obr. 2-2 Aktivní tisková hlava, tisk s podporami [3]	15
Obr. 2-3 Pasivní tisková hlava [4]	16
Obr. 2-4 Tisková hlava - metoda contour crafting [6]	17
Obr. 2-5 Rámová konstrukce tiskárny na beton [7]	18
Obr. 2-6 Princip funkce rámové konstrukce [8]	18
Obr. 2-7 Výsuvné otočné rameno [9]	19
Obr. 2-8 Portálový systém [6]	19
Obr. 2-9 Dieselové pístové čerpadlo betonu [12]	20
Obr. 2-10 Šnekové, dieselové čerpadlo na beton SP 11BHF [13]	21
Obr. 2-11 Peristaltické čerpadlo na beton P 65 [15]	21
Obr. 2-12 Složení betonu [16]	22
Obr. 2-13 Fáze hydratace cementu [18]	24
Obr. 2-14 Vliv druhu cementu na pevnost v tlaku [21]	25
Obr. 2-15 Vliv teploty okolí na pevnost v tlaku [21]	25
Obr. 2-16 Závislost hydratačního tepla na čase, použití urychlovače tuhnutí. [22]	26
Obr. 2-17 Vliv akceleraátoru X-SPEED na vývoj hydratace [24]	27
Obr. 2-18 Vliv X-SPEED na pevnost v tlaku při různých teplotách [24]	27
Obr. 2-19 Tisková hlava US7641461B2 (upraveno) [25]	28
Obr. 2-20 Tisková hlava US7874825 (upraveno) [26]	29
Obr. 2-21 Tisková hlava contourcrafting US8801415 (upraveno) [27]	30
Obr. 2-22 Aktivní tisková hlava KR20170125603A (upraveno) [28]	31
Obr. 2-23 Tisková hlava US2016/0303802A1 (upraveno) [29]	32
Obr. 2-24 První patent představující myšlenku tisku 3D objektů [30]	33
Obr. 2-25 Kolejnicový systém polohování, patent CA2667483C [31]	33
Obr. 2-26 Polohovací zařízení 3D tisk domů US7641461B2 (upraveno) [25]	34
Obr. 2-27 Mobilní 3D tiskárna na beton [32]	35
Obr. 2-28 Systém dopravy betonové směsi k tiskové (upraveno) [33]	35
Obr. 2-29 Pístové čerpadlo na beton, patent US5332366 [11]	36
Obr. 2-30 Závislost hydratačního tepla na čase WO2013066192 [34]	36
Obr. 4-1 Výnos	38
Obr. 4-2 Závislost průměru trysky na délce výnosu	39
Obr. 4-3 Závislost rychlosti posuvu na době tisku	40
Obr. 4-4 Úhel stoupání šnekovnice	41
Obr. 4-5 Rychlostní poměry při pohybu dolů (upraveno) [39]	42
Obr. 4-6 Schéma dopravy materiálu svislou šnekovnicí [39]	43
Obr. 4-7 Vliv sklonu dopravníku C_H [39]	44
Obr. 4-8 Uložení šnekového pohonu	45
Obr. 4-9 Tisková hlava s míchacím zařízením	46
Obr. 4-10 Tisková hlava bez míchacího zařízení	47
Obr. 4-11 Uložení hřídele č. 1	48
Obr. 4-12 Uložení hřídele č. 2	49
Obr. 5-2 Hlavní celky tiskové hlavy	50
Obr. 5-1 Hlavní sestava	50
Obr. 5-3 Tělo tiskové hlavy	51
Obr. 5-4 Uložení hřídele	51

Obr. 5-5 Uložení hřídele popis	52
Obr. 5-6 Labyrintové těsnění NILOS Ring (upraveno) [45]	54
Obr. 5-7 Řez uložením hřídele	55
Obr. 5-8 Ložiska (upraveno) [48], [49]	57
Obr. 5-9 Hřídel	58
Obr. 5-10 Pero těsné	59
Obr. 5-11 Tryska	62

11 SEZNAM TABULEK**11**

Tab. 4-1 Závislost délky výnosu na průměru trysky	39
Tab. 4-2 Závislost rychlosti posuvu tiskové hlavy na době tisku	40
Tab. 4-3 Parametry šnekovnice [37]	41
Tab. 5-1 Parametry motoru [44]	54
Tab. 5-2 Parametry převodovky [44]	54
Tab. 5-3 Parametry ložiska 3206 A-2RS1 [48]	57
Tab. 5-4 Parametry ložiska 6004-2RSH [49]	57

12 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Řez hlavní sestavou

Příloha 2 Katalog NILOS Ring LSTL

Příloha 3 Katalog NILOS Ring LSTO

Příloha 4 Technický list ložisko 3206 A-2RS1

Příloha 5 Technický list ložisko 6004-2RSH

Příloha 6 Katalogový list motor ECM600/040

Příloha 7 Výkresová dokumentace