



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

REŠERŠE A POPIS KONSTRUKČNÍCH UZLŮ PRO 3D TISK BETONU

RESEARCH AND DESCRIPTION OF A DESIGN PARTS FOR 3D PRINTING OF CONCRETE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Patrik Pondělek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Kočiš

BRNO 2023

Zadání bakalářské práce

| | |
|-------------------|--|
| Ústav: | Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky |
| Student: | Patrik Pondělek |
| Studijní program: | Základy strojního inženýrství |
| Studijní obor: | Základy strojního inženýrství |
| Vedoucí práce: | Ing. Petr Kočiš |
| Akademický rok: | 2022/23 |

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:

Rešerše a popis konstrukčních uzlů pro 3D tisk betonu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Student provede důkladnou rešerši zaměřenou na popis a zhodnocení vlastností a parametrů konstrukčních uzlů zařízení na tisk betonu při známých metodách tisku. Student na základě zjištěných vlastností betonových hmot popíše jednotlivé uzly, které se používají pro přípravu betonové směsi od přípravy směsi až po vytlačení směsi z trysky.

Cíle bakalářské práce:

Přehled současného stavu a poznání.

Systémový rozbor zjištěných poznatků.

Porovnání hlavních nalezených parametrů multikriteriální analýzou.

Zhodnocení zjištěných informací na základě systémového rozboru a multikriteriální analýzy.

Závěr a vlastní doporučení pro praxi.

Seznam doporučené literatury:

NOORANI, Rafiq. 3D Printing: Technology, Applications, and Selection. 1. CRC Press, 2018. DOI: 10.1201/9781315155494. ISBN 9781498783750.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato práce přináší ucelený přehled o současném stavu poznání v oblasti konstrukčních uzlů zařízení na tisk betonu. Rešerše se zabývá možnými metodami 3D tisku z betonu. V práci jsou detailně popsány hlavní konstrukční uzly a klíčové technologické procesy od přípravy betonové směsi až po její vytlačení. Systémový rozbor analyzuje vzájemné souvislosti mezi jednotlivými konstrukčními uzly a jejich aplikací ve 3D tisku výroby rámových betonových dílů. Na základě získaných informací a výsledků multikriteriální analýzy jsou identifikovány vhodné konstrukční prvky a složení betonové směsi pro tisk rámu stroje. V závěrečné diskuzi jsou prezentována vlastní doporučení pro praxi, která se týkají výběru vhodné metody 3D tisku pro uvedenou aplikaci.

Klíčová slova

Pístové čerpadlo, betonová tisková směs, tisková hlava, rám výrobního stroje, cement, extruze betonové směsi

ABSTRACT

This work provides a comprehensive overview of the current state of knowledge in the field of construction nodes for concrete printing devices. The research focuses on potential methods of 3D concrete printing. The main construction nodes and key technological processes, from the preparation of the concrete mixture to its extrusion, are described in detail. A systemic analysis examines the interrelationships between individual construction nodes and their application in 3D printing of structural concrete elements. Based on the obtained information and the results of a multicriteria analysis, suitable construction elements and the composition of the concrete mixture for printing the machine frame are identified. The final discussion presents practical recommendations regarding the selection of a suitable 3D printing method for the given application.

Keywords

Piston pump, concrete printing mixture, printing head, machine frame, cement, concrete mixture extrusion

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PONDĚLEK, Patrik. *Rešerše a popis konstrukčních uzlů pro 3D tisk betonu*. Brno, 2023. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/149496>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Petr Kočiš.

Poděkování

Rád bych touto cestou vyjádřil své upřímné poděkování vedoucímu práce Ing. Petru Kočišovi za jeho vstřícnost a ochotu, kterou mi v průběhu vypracování bakalářské práce poskytoval. Jeho cenné rady a připomínky mi velmi pomohly při zpracování mé práce a výsledky by nebyly tak kvalitní bez jeho odborného vedení. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za poskytnutí možnosti studovat a za jejich neustálou podporu během mých studijních let. Nakonec bych chtěl poděkovat svým kamarádům, kteří mě vždy podporovali a povzbuzovali, když jsem to potřeboval. Bez jejich trpělivosti, pochopení a podpory bych nemohl dosáhnout tohoto významného milníku v mém životě.

Patrik Pondělek

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Rešerše a popis konstrukčních uzlů pro 3D tisk betonu** vypracoval samostatně pod odborným vedením vedoucího práce a výhradně s použitím uvedených pramenů a literatury. Všechny informace, které jsem v práci použil, jsou pravdivé a byly použity v souladu se zásadami odborné etiky.

Prohlašuji, že jsem při psaní práce dodržoval zásady akademické čestnosti, etické zásady a normy v souladu s etickými kodexy, platnými zákony a nařízeními či neporušil autorská práva třetích osob. Všechny použité zdroje a informace jsou v práci řádně citovány a uvedeny v seznamu použitých zdrojů, který je součástí tohoto dokumentu.

.....
V Brně dne 26.05.2023

Datum

Patrik Pondělek

OBSAH

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | ÚVOD | 15 |
| 2 | PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ..... | 16 |
| 2.1 | HISTORIE | 16 |
| 2.2 | METODY 3D TISKU VE STAVEBNICTVÍ | 16 |
| 2.2.1 | 3D tisk vytlačováním betonové směsi | 16 |
| 2.2.1.1 | Contour Crafting | 17 |
| 2.2.1.2 | Concrete printing..... | 17 |
| 2.2.2 | Particle-bed 3D printing | 18 |
| 2.2.2.1 | Selective binder (cement) activation..... | 19 |
| 2.2.2.2 | Selective paste intrusion..... | 19 |
| 2.2.2.3 | Binder Jetting | 20 |
| 2.2.3 | Vzájemné porovnání a zhodnocení tiskových metod..... | 21 |
| 2.3 | ROZDĚLENÍ 3D TISKÁREN Z POHLEDU KONSTRUKCE | 23 |
| 2.3.1 | Rámové 3D tiskárny | 23 |
| 2.3.1.1 | Kartézské souřadnice (portálová tiskárna)..... | 23 |
| 2.3.1.2 | Delta souřadnice..... | 27 |
| 2.3.2 | 3D tiskárny s robotickým ramenem..... | 30 |
| 2.4 | BETON | 34 |
| 2.4.1 | Pojivo..... | 34 |
| 2.4.2 | Plnivo..... | 34 |
| 2.4.3 | Voda | 35 |
| 2.4.4 | Přísady | 36 |
| 2.4.5 | Příměsi | 36 |
| 2.5 | TISKOVÁ SMĚS..... | 37 |
| 2.5.1 | Vývoj vlastností tiskové směsi | 38 |
| 2.5.2 | Receptury tiskové směsi | 39 |
| 2.5.2.1 | Receptura 1–Dr. Khoshnevis | 39 |
| 2.5.2.2 | Receptura 2–Lim a kol. | 39 |
| 2.5.2.3 | Receptura 3–Gosselin a kol..... | 39 |
| 2.5.2.4 | Receptura 4–Ducoulombier a kol. | 39 |
| 2.5.2.5 | Receptura 5–Le a kol. | 40 |
| 2.5.2.6 | Receptura 6–Tao Ding a kol. | 41 |
| 2.5.2.7 | Receptura 7–Xiao a kol..... | 42 |
| 2.5.2.8 | Receptura 8–Yao a kol. | 43 |
| 2.5.2.9 | Receptura 9–Wang a kol. | 44 |
| 2.6 | PROCES MÍSENÍ BETONOVÉ SMĚSI | 45 |
| 2.6.1 | Druhy míchacích zařízení..... | 45 |
| 2.6.1.1 | Míchačky gravitační..... | 45 |
| 2.6.1.2 | Míchačky s nuceným chodem..... | 46 |
| 2.6.2 | Doba míchání..... | 47 |
| 2.7 | DOPRAVA BETONOVÉ SMĚSI | 48 |
| 2.7.1 | Čerpadla..... | 49 |
| 2.7.1.1 | Pístová čerpadla | 50 |
| 2.7.1.2 | Šroubová čerpadla..... | 50 |
| 2.7.1.3 | Peristaltická čerpadla | 51 |
| 2.7.2 | Dopravní potrubí a hadice..... | 52 |
| 2.7.2.1 | Proudění betonu v potrubí..... | 52 |
| 2.7.2.2 | Lubrikační vrstva | 53 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 2.8 | TISKOVÉ HLAVY A EXTRUDÉRY | 54 |
| 2.8.1 | Metody nanášení tiskové vrstvy | 55 |
| 2.8.1.1 | Nekonečné vytlačování cihel | 55 |
| 2.8.1.2 | Orientované lisování | 55 |
| 2.8.1.1 | Depozice volného toku | 55 |
| 2.8.1.2 | Formování kluzem | 56 |
| 2.8.2 | Tvarování trysky | 57 |
| 3 | SYSTÉMOVÝ ROZBOR | 59 |
| 3.1 | PROBLÉMOVÁ SITUACE | 59 |
| 3.2 | FORMULACE PROBLÉMU | 59 |
| 3.3 | FORMULACE CÍLŮ A ŘEŠENÍ | 59 |
| 3.4 | POPIS ŘEŠENÉ SOUSTAVY | 59 |
| 3.5 | SYSTÉM PODSTATNÝCH PARAMETRŮ | 60 |
| 4 | MULTIKRITERIÁLNÍ ANALÝZA | 61 |
| 4.1 | STANOVENÍ VÁHY KRITÉRIA | 61 |
| 4.2 | VYHODNOCENÍ KONSTRUKČNÍCH UZLŮ POMOCÍ ZVOLENÝCH KRITÉRIÍ | 63 |
| 4.2.1 | Stanovení optimální směsi | 63 |
| 4.2.1.1 | Receptura 5–Le a kol. | 63 |
| 4.2.1.2 | Receptura 7–Xiao a kol. | 64 |
| 4.2.1.3 | Receptura 9–Wang a kol. | 64 |
| 4.2.1.4 | Vyhodnocení směsi | 64 |
| 4.2.2 | Stanovení optimálního míchacího zařízení | 65 |
| 4.2.2.1 | Gravitační míchačky | 65 |
| 4.2.2.2 | Míchačky s nuceným chodem | 65 |
| 4.2.2.3 | Vyhodnocení míchacího zařízení | 66 |
| 4.2.3 | Stanovení optimálního čerpadla | 66 |
| 4.2.3.1 | Pístové čerpadlo | 66 |
| 4.2.3.2 | Šroubové čerpadlo | 67 |
| 4.2.3.3 | Peristaltické čerpadlo | 67 |
| 4.2.3.4 | Vyhodnocení čerpadla | 68 |
| 4.2.4 | Stanovení optimální tiskové hlavy | 68 |
| 4.2.4.1 | Pasivní tisková hlava | 68 |
| 4.2.4.2 | Aktivní tisková hlava | 69 |
| 4.2.4.3 | Vyhodnocení | 69 |
| 5 | DISKUSE | 70 |
| 6 | ZÁVĚR | 71 |
| 7 | SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ | 72 |
| 8 | SEZNAM OBRÁZKŮ | 78 |
| 9 | SEZNAM TABULEK | 80 |

1 ÚVOD

Pod pojmem 3D tisk z betonu si lze představit moderní technologii, která umožňuje vytvářet přesnou a vrstevnatou výrobu betonových struktur pomocí speciálních tiskových zařízení. Představa 3D tisku z betonu také evokuje snížení výrobních nákladů, zrychlení stavebních procesů a zlepšení udržitelnosti v oblasti stavebnictví. Je to technologie, která přináší revoluci v tom, jak se staví a navrhuje infrastruktura a otevírá nové možnosti pro tvorbu inovativních a efektivních staveb. Uvedená inovativní metoda kombinuje tradiční stavební materiál, jako je beton, s pokročilými automatizovanými systémy, aby umožnila přesnou realizaci komplexních geometrií a designů. 3D tisk z betonu je symbolem technologického pokroku v oblasti stavebnictví a otevírá nové možnosti v architektuře, inženýrství a dalších odvětvích. Poskytuje kreativní a efektivní přístup k navrhování a výrobě betonových konstrukcí s ohledem na individualitu a specifické požadavky projektů. Aditivní technologie nabízí potenciál transformovat způsob, jakým budujeme a vnímáme budoucnost stavebnictví.

Proces 3D tisku z betonu začíná digitálním modelem navržené konstrukce. Zmíněný model je následně rozdělen do tenkých vrstev, které budou postupně vytištěny. Tiskové zařízení využívá speciální trysku nebo extruder, který postupně nanáší vrstvu betonu podle přesně definovaného programu. Daná vrstva se postupně spojuje s předchozími vrstvami, čímž se vytváří pevná a kontinuální struktura.

3D tisk z betonu přináší mnoho výhod. Jednou z nejvýraznějších výhod je možnost vytvářet složité a organické tvary, které by bylo obtížné nebo nemožné realizovat tradičními stavebními metodami. Stavebnictví je zároveň ale velmi neefektivní ve využívání surovin, některé analýzy odhadují, že až 50 % z materiálu, započteného do nákladů stavebních děl, činí odpad. Díky 3D tisku lze snížit množství odpadu a materiálů potřebných pro výstavbu, což přispívá k udržitelnosti a ekologičnosti procesu. Navíc, tisk betonu umožňuje dosáhnout vysoké přesnosti a opakovatelnosti výroby, což vede ke zlepšení kvality a úsporám nákladů.

Cílem této bakalářské práce je provést důkladnou rešerši zaměřenou na popis a zhodnocení vlastností a parametrů konstrukčních uzlů zařízení pro 3D tisk z betonu v rámci existujících metod tisku. Práce se zaměřuje na detailní popis jednotlivých uzlů, které se používají při přípravě betonové směsi a procesu jejího vytlačování. Důraz je kladen na vysvětlení rozdílů mezi betonem a tiskovou směsí. Nedílnou součástí práce je také provedení komplexní analýzy konstrukčních uzlů pomocí multikriteriálního hodnocení, které umožní vybrat nejvhodnější prvky pro tisk rámu výrobního stroje. Cílem práce je tedy získat ucelený přehled o konstrukčních uzlech pro 3D tisk z betonu a identifikovat klíčové faktory pro úspěšnou a kvalitní výrobu betonových struktur pomocí této technologie.

Motivace pro řešení tématu 3D tisku z betonu vychází z jeho významu a potenciálu nejen v oblasti stavebnictví a architektury, ale také strojírenství. Důležitost a potřeba tohoto tématu spočívá v jeho schopnosti přinést inovace, zvýšit efektivitu a zlepšit udržitelnost ve stavebním průmyslu. Výzkum a pochopení konstrukčních uzlů pro 3D tisk betonu je klíčové pro rozvoj této technologie a překonání současných výzev ve stavebnictví. Důkladná rešerše, popis konstrukčních uzlů a dostupných metod 3D tisku betonu umožní lépe porozumět této technologii a možným výhodám. Práce přispěje k rozvoji znalostí o 3D tisku z betonu a poskytne směrnice pro architekty, inženýry a stavební profesionály, kteří se zajímají o praktické využití této technologie.

2 Přehled současného stavu poznání

2.1 Historie 3D tisku ve stavebním průmyslu

Koncept 3D tisku ve stavebnictví není nijak zvlášť novou technologií. Například používání technik formování skluzem ve stavebnictví začalo na počátku 20. století a od té doby byly často věže, nádrže a výškové budovy postaveny právě pomocí této metody, kde by tradiční stavební techniky byly příliš obtížné a časově náročné. [3]

Shotcreting známý také jako stříkaný beton je dalším příkladem aditivní nebo vrstvené výroby ve stavebnictví a opět se jedná o sto let starou technologii. Při této metodě je beton pomocí hadice dopravován do trysky a poté aplikován na povrch pod pneumatickým tlakem, vrstva po vrstvě. Shotcreting se používá jak při nové výstavbě, tak při opravách/rekonstrukcích stávajících objektů. Byl také široce používán v tunelech. [3]

V polovině 80. let 20. století získal 3D tisk popularitu v průmyslových odvětvích, jako je biomedicínská a průmyslová výroba, a komerční 3D tiskárny se staly dostupnými pro veřejnost. Lidé mohli pomocí těchto tiskáren transformovat digitální modely na fyzické trojrozměrné objekty prostřednictvím svých počítačů. Původně byly tyto 3D tiskárny omezeny na tisk malých objektů, ale následný výzkum a vývoj umožnily tisk velkých objektů, velkých jako budova. [3]

V druhé polovině 90. let se objevila technologie s názvem „Contour Crafting“, což je moderní forma aditivního a vrstveného procesu ve stavebnictví. Tato technologie byla později patentována v roce 2010. Původně začala jako metoda pro vytlačování keramické pasty, ale později byla rozšířena na cementové materiály pro výrobu konstrukčních prvků ve velkém měřítku a dokonce i na celé stavby, jako například tištěné budovy. [3]

Během prvního desetiletí 21. století se do pozornosti dostala další technologie „Concrete Printing“, která je podobná metodě Contour Crafting, ale s některými rozdíly v konstrukci vytlačovací trysky. [3]

2.2 Metody 3D tisku ve stavebnictví

Rozlišujeme dva elementární procesy betonového 3D tisku, které využívají směs na základní bázi zrnitých materiálů. Contour Crafting a Concrete printing lze zahrnout pod jednu kapitolu, a to 3D tisk vytlačováním betonové směsi neboli 3D tisk pomocí extruze. Druhou metodou je Particle-bed 3D printing, která využívá práškové lože. Dle variace různých přístupů nanášení vrstvy materiálů rozlišujeme technologii na tři podkategorie: Selective binder activation, Selective paste intrusion a Binder Jetting. [23] [25]

2.2.1 3D tisk vytlačováním betonové směsi

Nejrozšířenější způsob 3D tisku ve stavebnictví je obdobou hojně používané technologie 3D tisku z plastů-metody FDM, tj. tavného nanášení. Mezi další možné materiály vhodné pro tuto tiskovou metodu jsou mimo jiné sklo, nepálená hlína nebo právě betonová tisková směs respektive cementová malta. [1]

Aditivní technologie vytlačováním betonové směsi se vyznačuje postupným nanášením jednotlivých vrstev v horizontálním popř. ve vertikálním smyslu na základovou plochu. Vrstvení se tvoří nanášením předem vytvořené směsi plniva společně s tmelícím a dalším přídatným materiálem, který slouží ke zlepšení vlastností směsi. Plnicí směs se charakterizuje speciálními rysy mezi něž zapadá bezesporu omezená velikost zrna kameniva. Rozsah velikosti průměru trysky zpravidla sahá maximálně do jednotek centimetrů. Pro hladký průchod tryskou se u většiny projektů používá stropová hranice frakce kameniva 4 mm. Omezená velikost zrna má pozitivní vliv také na rozlišení tisku. Mezi další požadavek směsi patří rychlé tuhnutí. Hlavním důvodem je bezproblémové nanášení druhé vrstvy tak, aby se neporušila či nebyla

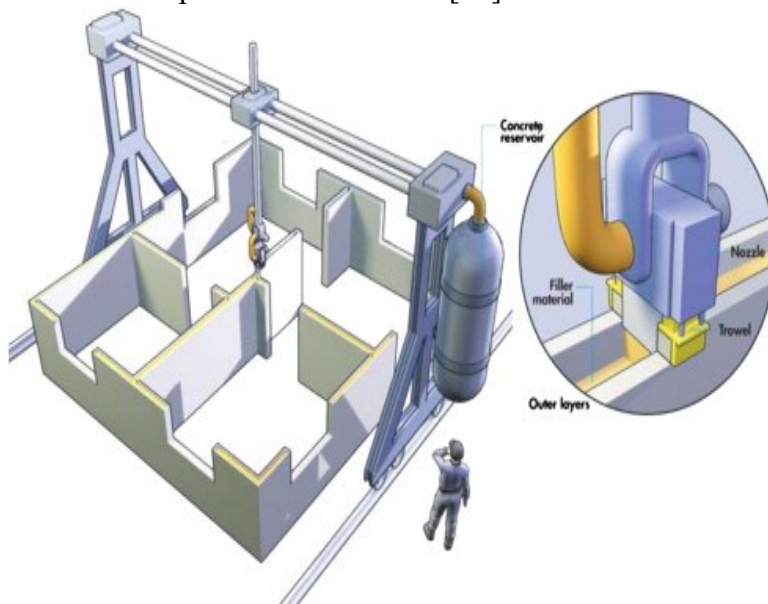
způsobena žádná deformace vrstvě první. Rychlost tuhnutí je řízený proces závislý na délce jedné vrstvy a na časovém rozmezí mezi tiskem jednotlivých návazných vrstev. Pokud je délka vrstvy krátká natolik, že by první vrstva nezískala dostatečnou pevnost popř. stabilitu, a díky tomu by neunesla vrstvu druhou, zavádí se technologická přestávka mezi jednotlivými navazujícími vrstvami. Vzhledem k přísným nárokům na tiskový materiál, se plnicí směs často označuje jako pasta, cementová malta popř. cementový kompozit. [1]

2.2.1.1 Contour Crafting

Autorem technologie Contour Crafting (dále CC) je Dr. Behrokh Khoshnevis z USC. Jedná se o aditivní technologii, která se stále vyvíjí již od roku 1998. První tiskárna, která tuto technologii využila, byla portálového typu. [2]

Princip technologie spočívá v kombinaci vytlačování a plnění. CC vytlačuje směs na bázi cementu a vytváří vrstvu po vrstvě. Využívají se dvě vytlačovací trysky, které současně vytváří vnější okraje. Vytlačená směs je regulována pomocí bočních hladítek, které dodávají stěnám hladší povrch a stálou povrchovou úpravu. Po výtisku určitého množství vrstev poslouží dosavadní vytištěná konstrukce jako forma pro výplňový materiál, který je do formy aplikován třetí prostřední tryskou. Novější verze CC uvádí místo prostřední výplňové trysky použití třetí vytlačovací trysky, která vytváří vlnitou vnitřní strukturu viz *obr.2*. Toto řešení urychluje proces výstavby, šetří materiál a dokáže také zvýšit například tepelnou vodivost. [2] [23]

Metoda CC umožňuje automatizovat aplikace ocelové výztuže a elektrických systémů, obklady podlah a stěn, instalatérské práce a další činnosti s minimálním zásahem člověka. To vše vede k úspoře času a nákladů. [23]



Obr. 1 Portálová tiskárna Contour Crafting [2]



Obr. 2 Vlnitá struktura CC [2]

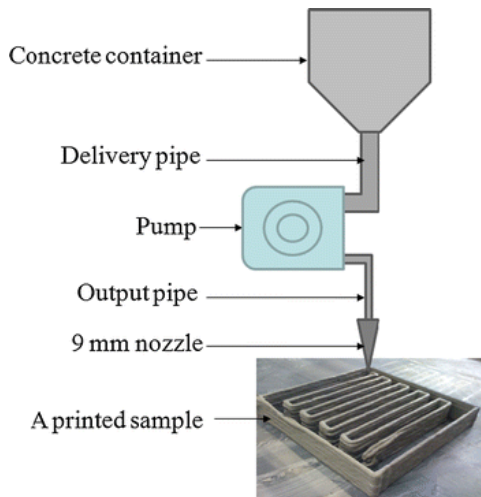
2.2.1.2 Concrete printing

Princip Concrete printing (dále CP) vychází z metody Contour Crafting. Na vytvoření této metody se z velké části podílel výzkumný tým z Loughborough University v roce 2006. Na rozdíl od Contour Crafting je CP určen primárně pro tisk prefabrikátů. [2]

Metoda CP je kompatibilní s portálovou tiskárnou. Tiskovou hlavu lze připojit také k robotickému rameni. Technologie dále vyžaduje mimo jiné tiskovou řídicí jednotku, mixér a čerpadlo. Proces začíná přípravou tiskové směsi, která se skladuje v míchacím systému tak, aby se zabránilo předčasnému tuhnutí. Dále se dopravuje pomocí čerpadla do tiskové hlavy, ve které se nachází míchací šnekový dopravník. Zde se do směsi přidávají aditiva např. pro urychlení

tuhnutí směsi po vytlačení. Po výtisku první vrstvy se tisková hlava zvedne a pokud je splněn časový požadavek pro dostatečnou pevnost dané vrstvy, lze tento proces opakovat nanášením návazné vrstvy dokud se nevytiskne celá struktura. [23]

Po srovnání obou metod založených na extruzi zjistíme, že technologie CP umožňuje větší kontrolu při nanášení vrstvy než metoda CC. Vrstvy CP jsou tenčí a dávají tak volnější prostor pro design složitých tvarů. [24]



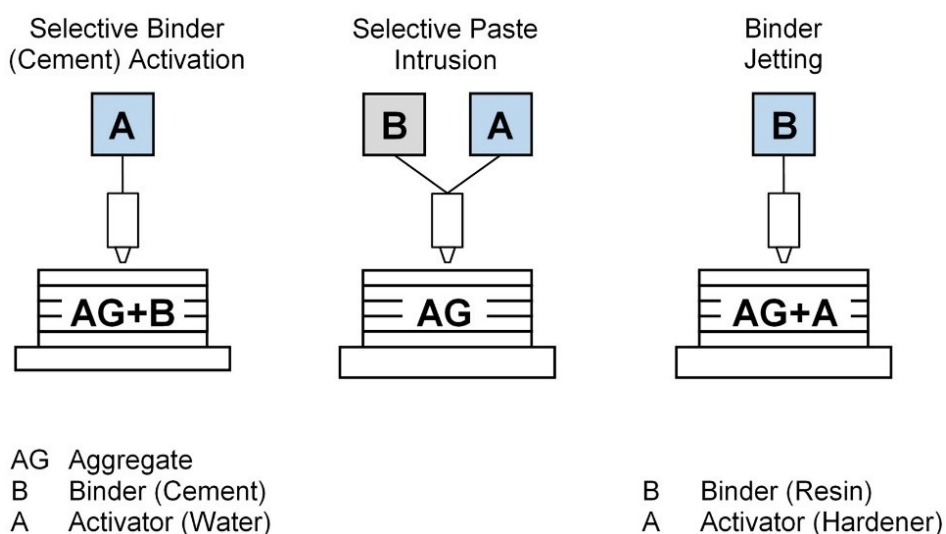
Obr. 3 Schéma principu CP [44]



Obr. 4 Průběh tisku metody CP [23]

2.2.2 Particle-bed 3D printing

Aditivní technologie Particle-bed 3D printing využívá lože pokryté částicemi na bázi minerálů k automatizované výrobě volně tvarovaných struktur na základě počítačového modelu. I zde se využívá základní charakteristika pro aditivní technologii, a to postupné nanášení jednotlivých návazných vrstev průřezu struktury (vrstvení). Obecný proces dané technologie lze popsat ve dvou opakujících se pracovních krocích: (1) nanášení vrstvy suchých částic tvořící lože a (2) selektivní nanášení tekuté fáze na suché lože pomocí několika trysek popř. tiskové hlavy. Jedna z hlavních odlišností od extruze betonové směsi je možnost aplikace tepelného zpracování pro zvýšení pevnosti a trvanlivosti produktu. Na základě použitých materiálů lze klasifikovat technologii do tří základních procesů viz obr.5. [25]



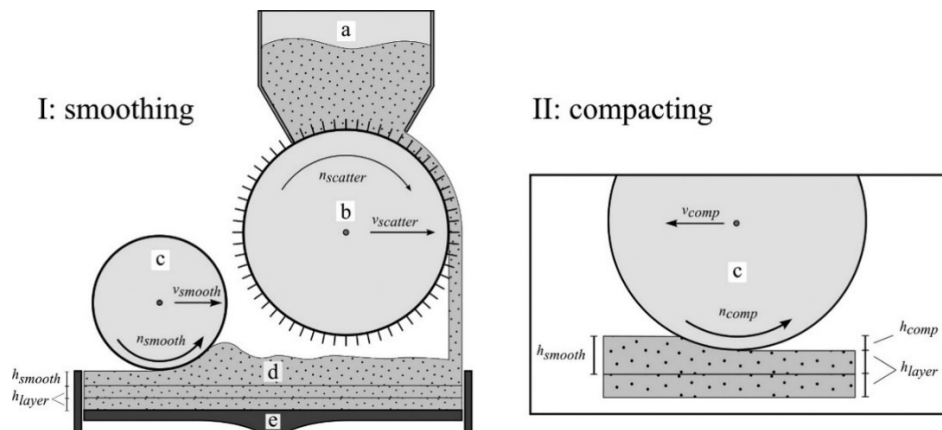
Obr. 5 Základní druhy technologie Particle-bed 3D printing [25]

2.2.2.1 Selective binder (cement) activation

Výrobní metoda Selective binder activation využívá lože, které obsahuje suchou směs jemnozrnného kameniva (typicky písku se zrnitostí do 1 mm) a pojiva. Při tisku betonových struktur se jako pojivo používá cement. Proces lze rozdělit do následujících dílčích kroků: (1) nanášení vrstvy, (2) zhutňování vrstev, (3) aplikace aktivátoru, (4) penetrace aktivátoru způsobí v místech kontaktu pojiva se směsí písku vytvoření betonové matrice, (5) odstranění nenávazného lože částic a (6) dokončovací operace (broušení, tepelné zpracování aj.). [25]

System pro nanášení vrstvy suché směsi a zhutňování je připojen na lineární osu nad stavební komorou. Suchá směs je uložena v násypce. Je dopravována a rozptýlována na lože pomocí jehličkového válečku. Pro rovnoměrné rozprostření směsi je využit hladký válec, který koná dvě operace. V první operaci se válec otáčí proti směru posuvu. Eliminuje přebytečný materiál a vyhlazuje vrstvu. V druhé operaci válec rotuje ve směru posuvu. Dochází ke stlačení a zhutnění vrstvy. Umožňuje tak přesnou kontrolu výšky vrstvy viz obr.6. [28]

Na rozdíl od jiných metod Particle-bed 3D printing, daná metoda je schopna využít tiskovou hlavu vybavenou vodním paprskem. Vodní paprsek umožňuje vyšší průtok vody a také hlubší pronikání do částicového lože. [29]



Obr. 6 Ilustrace systému pro nanášení a zhutňování směsi [28]

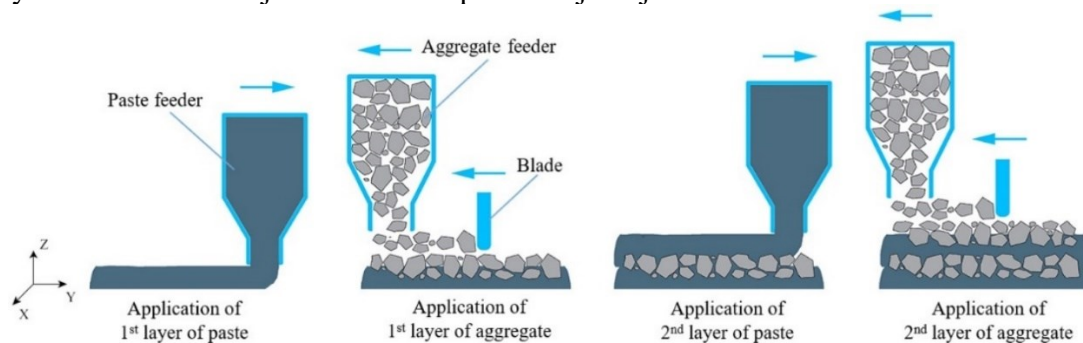
2.2.2.2 Selective paste intrusion

Metoda Selective paste intrusion používá lože tvořené pouze agregátem (typicky se středním průměrem do 5 mm). Proces zde začíná selektivním nanášením pojivové pasty, která sestává z cementu, vody a příměsí. Poté se nanese vrstva agregátu. Po určitém množství opakování výše uvedeného procesu a dostatečném zatvrdnutí, lze odstranit nenávazné částice. Na rozdíl od metody Selective binder activation, lože obsahuje pouze směs kameniva, nikoliv žádný cement, který je velmi náchylný na vlhkost. Nenávaznou směs kameniva lze pak snadno recyklovat a plně použít v dalších aplikacích. [25] [27]

Uvedenou metodu představil Weger a kolektiv v roce 2016. V jejich výzkumné práci mimo jiné bylo zjištěno, že hloubka průniku pasty do mezer mezi jednotlivými částicemi kameniva dokáže významně ovlivnit celkovou pevnost struktury. Nižší viskozita pasty umožňuje zvýšení pevnosti struktury, ale do určité míry snižuje tvarovou přesnost. V porovnání s ostatními aditivními metodami je možné použít hrubší kamenivo. Mezi výhody hrubého kameniva patří vyšší pevnost, malá smrštitelnost a vysoká trvanlivost. Naopak nevýhodou oproti jemnému agregátu je nepravidelný tvar, který klade odpor při ukládání a zdrsňuje povrch finální struktury. Při použití větších částic se snižuje rozlišitelnost. Je třeba zvolit vhodnou velikost kameniva podle požadavku na rozlišení dané aplikace. [26] [27]

Výrobní systém obsahuje tři klíčové komponenty: (1) dávkovač kameniva, (2) dávkovač tiskové směsi a (3) čepel. Dávkovač kameniva je využit k rozprostření kameniva do každé

vrstvy. Na rozdíl od tiskových metod na bázi prášku, zde dávkovač neřídí rovnoměrné rozptřeni kameniva na jednotlivé vrstvy. To zajišťuje čepel, která zarovná výšku každé vrstvy. Dávkovač směsi je konstruován podobně jako je tomu u extruze betonové směsi. [26]



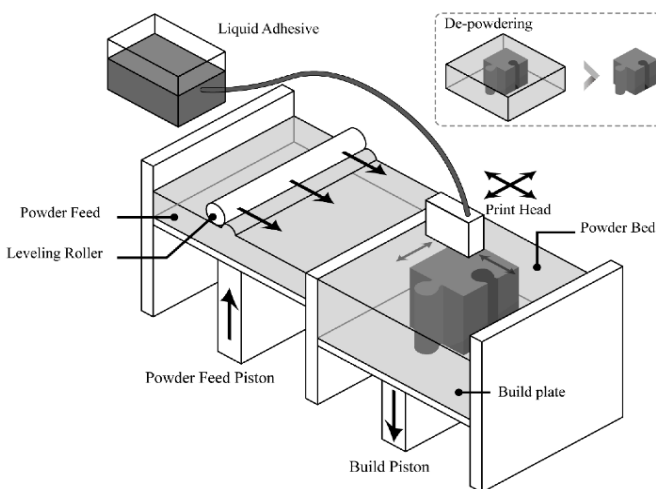
Obr. 7 Výrobní proces metody Selective paste intrusion [26]

2.2.2.3 Binder Jetting

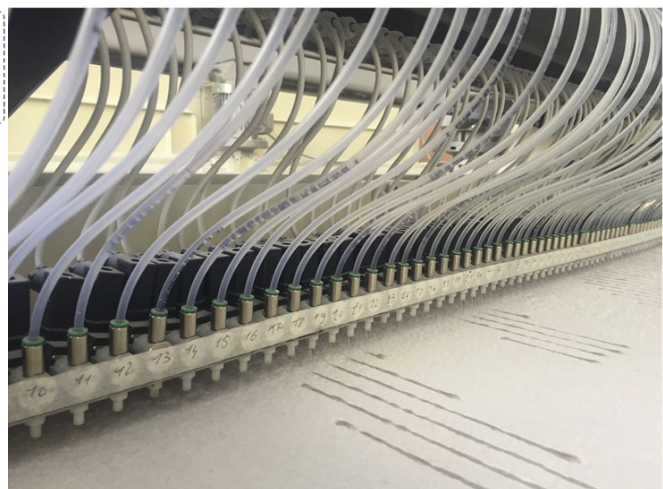
Technologie zvaná Binder Jetting využívá několik trysek k rozstřikování malých kapek kapalného pojiva na lože pokryté vrstvou prášku. Vyrovnávací válec nejdříve rovnoměrně rozptře směs po ložné ploše na odpovídající vrstvu. Poté jednotlivé trysky tiskové hlavy selektivně rozstřikují adhezivní pojivo na práškové lože, aby vytvořily 2D vzor. Pojivo při kontaktu s práškovým materiálem interaguje, vytvoří směs a ztuhne. Po vytvrzení dané vrstvy se nanese nová vrstva práškového materiálu. Po nanesení každé vrstvy stavební píst sjede o určitou výšku dolů tak, aby se do stavební komory vešla další vrstva. Proces se poté opakuje. Při tvoření převisů či dutých tvarů tato technologie nevyužívá žádný sekundární materiál. Pro vytvoření nosné struktury využívá nezreagovaný práškový materiál. Ten se eliminuje až po dokončení tisku celé struktury. [2] [31]

Kapalné pojivo je nejčastěji tvořeno na bázi pryskyřice. Tento proces je nejčastěji využit k nepřímé výrobě betonových struktur, a to pomocí tisku různorodého bednění betonových struktur. [30]

Jedním z hlavních představitelů této technologie je rozšiřující metoda D-shape. Práškové lože této metody se skládá z písku a cementu na bázi hořčíku. Pojivo, tvořeno roztokem slané vody, je nanášeno pomocí 300 trysek. [32]



Obr. 8 Systém Binder Jetting [31]



Obr. 9 Technologie D-shape [25]

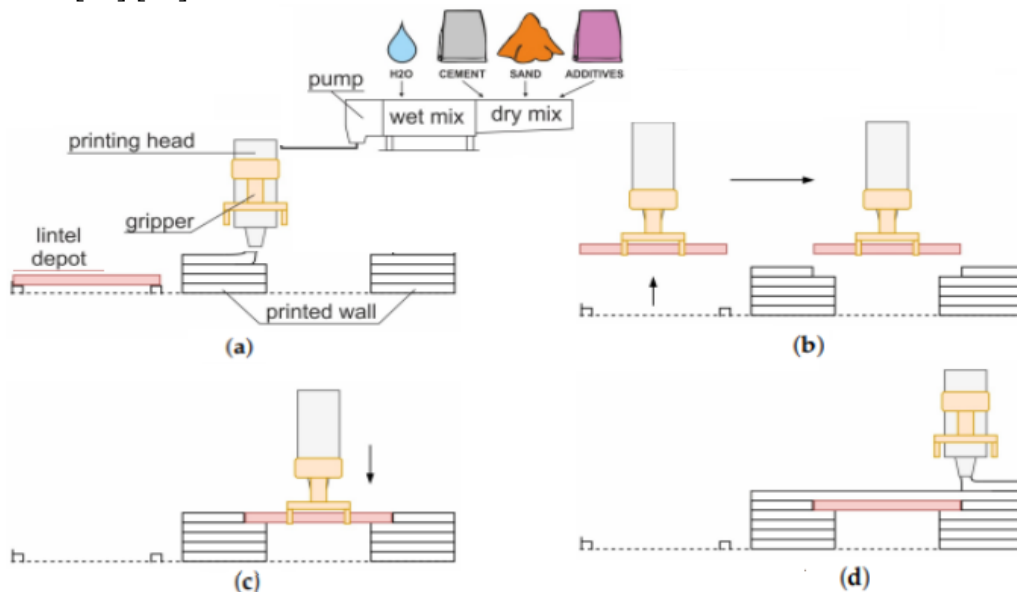
2.2.3 Vzájemné porovnání a zhodnocení tiskových metod

Metody CP a Binder Jetting, konkrétně D-shape, se značně vymezují vyšší mezí pevnosti v tlaku, ale i v ohybu viz *tabulka 1* v porovnání s ostatními uvedenými aditivními metodami 3D tisku. Hlavním důvodem je rozdílnost tiskové směsi. Tiskový materiál metody CC, díky velmi vysokému obsahu cementu se podobá více maltě než betonu jako takovému. Je nutné podotknout, že metoda CC nebyla navržena jako samostatný systém. Vytváří pouze konturu neboli vnější oporu, která se vyplní pevnějším materiálem. Dále na rozdíl od jiných metod, systém CC používá hladítka, která zajišťují lepší drsnost stěny a estetický vzhled.[23]

Tabulka 1 Základní charakteristiky metod 3D tisku [23] [25] [26] [27] [32]

| Metoda | Rozměr agregátu [mm] | Výška vrstvy [mm] | Výztuž | Mez pevnosti v tlaku [MPa] | Mez pevnosti v ohybu [MPa] |
|------------------------------------|----------------------|-------------------|--------|----------------------------|----------------------------|
| Concrete printing | < 4 | 6–25 | Ano | 70–110 | 12–13 |
| Contour crafting | < 4 | 13 | Ano | 18 | — |
| Selective binder/cement activation | < 1,2 | 0,1–1,2 | Ne | 14,7–20,8 | 1,2–5,3 |
| Selective paste intrusion | 1–7 | 3–7 | Ne | 15–70 | 3–7,5 |
| Binder Jetting (D-shape) | 0,1–4 | 5–10 | Ne | 235–242 | 14–19 |

Vzhledem k charakteru aditivní technologie je tištěná struktura postavena zdola nahoru. Největší obtíží pro metody pomocí extruze představuje bezesporu tisk výklenků mezi něž patří rovněž okna a dveře, tisk převisů, dutých a jiných tvarově složitých částí. Technologie CP tuto výzvu řeší tiskem podpurného sekundárního materiálu (typicky sádra). Tato podpora je po vytvrzení betonu odstraněna a recyklována k dalšímu použití. Metoda CC využívá automatického umístění překladu přes mezeru viz *obr. 10*. Tisk tak může pokračovat téměř s nulovým zpožděním. [23] [33]

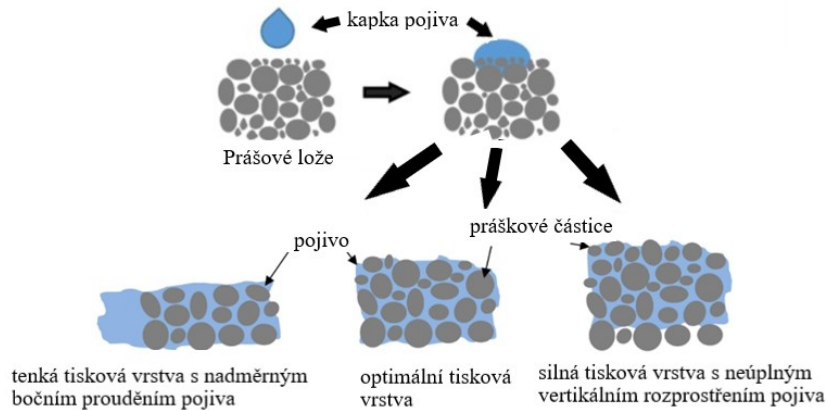


Obr. 10 Tisk výklenku pomocí automatizovaného umístění překladu [33]

Na druhou stranu technologie Particle-bed 3D neklade téměř žádné omezení na volbu formy. Tisk šikmé konstrukce, převisů, oblouků, výklenků, konzol a jiných složitých struktur lze dosáhnout snadno, díky mechanické stabilitě suchých částic. Zde se volný nezreagovaný materiál využívá zároveň jako podpora pro tisk zmíněných struktur. Jednou z hlavních předností oproti metodě vytlačování betonové směsi je vysoké produkční rozlišení. V závislosti na velikosti částic je možné rozlišení až 0,1 mm. Mimo to je doba tisku nezávislá na geometrické složitosti tištěné struktury. Nicméně tisková zařízení určená pro tuto metodu jsou značně omezená velikostí tiskového prostoru. [25]

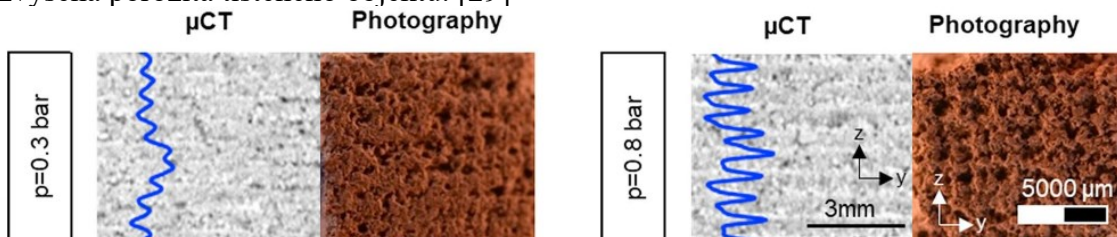
Z pohledu ekologie je nevyhnutelné aby nespojený materiál byl plně recyklovatelný. Díky tomu je tato technika předurčená především pro automatizovanou výrobu prefabrikátů v továrně. Je nutné brát v potaz čas potřebný k nanášení vrstev suchého materiálu a také jeho následném odstranění po dokončení tisku, který má významný vliv na celkový proces. [25]

Metoda binder jetting je nucena řešit zásadní problém, a to nadměrné boční proudění pojiva tzv. bleeding viz *obr. 11*. To se děje za předpokladu, kdy vazebné činidlo reaguje s předem nespécifikovanou oblastí. Kapka o průměru 5 mm může zasáhnout oblast větší než je požadováno a způsobí větší a nerovnoměrný potištěný díl. Vytváří se pak hrubý povrch s výstupky, který vyžaduje dokončovací úpravu. [25] [34]



Obr. 11 Závislost tloušťky vrstvy na bočním proudění pojiva ([34], upraveno)

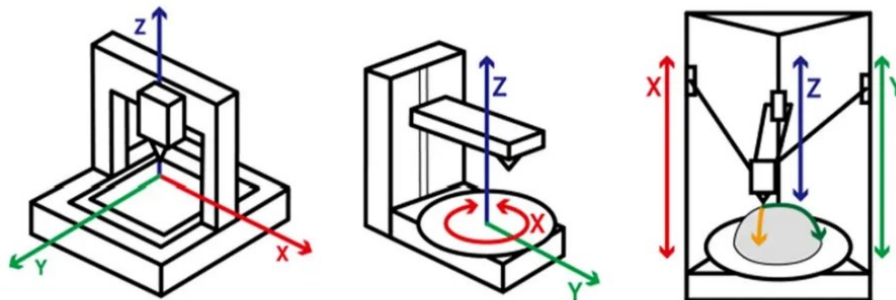
Technologie Selective binder (cement) activation umožňuje použití vodního paprsku, jako nanesení aktivátoru (typicky vodní roztok) na práškové lože. Bylo zjištěno, že zvýšení tlaku vody nemá žádnou jasnou korelaci s mechanickými vlastnostmi tištěné struktury. Jeden z mála testů při tlaku 0,5 baru vedl ke zvýšení napětí v tlaku vzorku z 10 MPa na 11 MPa a napětí v ohybu 5,5 MPa na 5,6 MPa. Růst tlaku vodního paprsku způsobuje přeskupení částic práškového lože, což vede ke vzniku vertikálních a horizontálních kanálů. Při použití vyššího tlaku jsou na povrchu vzorku viditelné rýhy, naopak při aplikaci nízkého tlaku je povrch příznivější viz *obr. 12*. Z pohledu penetrace je aplikace vodního paprsku pozitivní, ježto umožňuje řízené vertikální pronikání kapaliny do vrstvy práškového lože. Proti tomu však stojí zvýšená porozita tištěného objektu. [29]



Obr. 12 Porozita vzorků za rozdílného tlaku kapaliny [29]

2.3 Rozdělení 3D tiskáren z pohledu konstrukce

Tiskárny ve stavebnictví nabírají rozmanitých velikostí, obvykle se pohybují v řádu jednotek (výjimečně i desítek) metrů. Základní fragment 3D tiskárny představuje bezesporu tisková hlava. Koncovou část tiskové hlavy tvoří tryska, která zajišťuje požadovaný tvar a velikost nanesené vrstvy. Konstrukce tiskárny se skládá mimo jiné z dalších pohyblivých členů a pohonných jednotek. Vzájemné sestavení těchto komponent udává geometrii tiskového prostoru. Stavební průmysl v současné době nabízí dva elementární typy konstrukčních provedení tiskáren. Rámové 3D tiskárny, které využívají nejčastěji využívají kartézské polohování či delta a 3D tiskárny s robotickým ramenem, které využívají nejčastěji polární polohování viz obr. 13. [1] [3]



Obr. 13 Rozdělení 3D tiskáren dle polohování, zleva kartézská, polární, delta [1]

2.3.1 Rámové 3D tiskárny

Rámové tiskárny se vyznačují nejčastěji horizontálním vytlačováním směsi. U vertikálního smyslu tisku jsou značně omezeny. Nevytvářejí tudíž plně 3D, ale spíše 2,5D topologie. Jako řešení tohoto problému byly vyvinuty 3D tiskárny s robotickým ramenem. Velikost portálových tiskáren se dá relativně snadno zvětšit, zatímco robotická ramena mají častěji pevný rozměr. [3]

Vysoká únosnost konstrukce umožňuje použití těžší tiskové hlavy. U rámové tiskárny je možné zrealizovat tisk i více podlaží za sebou. Kvůli svým rozměrům nachází využití především ve venkovním prostředí. Aplikace in situ je omezeno topografií pozemku. Rámové tiskárny nejsou vhodné do náročného terénu, neboť pro zajištění snadného pohybu tiskárny po kolejové dráze je nutný přímý povrch. Dále se aplikují pro výrobu prefabrikátů ve výrobních halách. [1]

Dále rozlišujeme rámové tiskárny dle souřadnicového systému, se kterým daný typ tiskárny pracuje.

2.3.1.1 Kartézské souřadnice (portálová tiskárna)

Portálová tiskárna se běžně skládá z mobilní portálové konstrukce, tiskové hlavy, systému pro míchání a dodávky betonové směsi. Využívá se velká škála velikosti od malých verzí, které se používají v laboratořích, až po velké verze, které lze použít v in situ pro úplný tisk budov. [3]

Tisková hlava portálové tiskárny se pohybuje dle kartézského souřadnicového systému $X Y Z$. Hlavní pohyb je vertikální a koná ho tisková hlava, která pojíždí po příčnici. Tiskový prostor zaujímá tvar kvádra s využitím 96 % svého prostoru. [1] [4] [5]

Díky své jednoduché konstrukci je snadné portálové tiskárny programovat. Portálové tiskárny jsou celkově velmi dobře konfigurovatelné, přes velkou škálu motorů po převodovky, materiály či jiné komponenty, které se vyskytují na trhu. Kartézský souřadnicový systém je obecně velmi přímočarý, což vede ke snadnému ovládní. Jednotlivé osy lze snadno vyměnit, čímž dochází k minimálním nákladům na údržbu a také ke zkrácení prostožů. Po cenovém srovnání jednotlivých typů tiskových zařízení, portálové tiskárny zaujímají spodní příčky. [5]

Zástupci portálových tiskáren

Tiskárna Luyten Platypus Expeditionary

3D tiskárna Platypus Expeditionary je jedna ze čtyř konceptů, které dosud představila australská společnost Luyten. Společným znakem všech variant je konstrukce portálového tvaru. Jednotlivé řady se od sebe odlišují zejména stavebními rozměry, velikostí nebo typem podvozku. Verze Platypus, Platypus Expeditionary a Platypus X2 se od sebe zásadně neliší. Základní verze Platypus je koncipována spíše pro přístup, který má ověřit různé architektonické projekty. Naopak verze Expeditionary využívá lepší flexibilitu, díky kolovému podvozku. Edice Platypus X12 má poloportálovou konstrukci a je navržena s ohledem na vysokou mobilitu a přesnost. Její flexibilní rozměry, které dalece přesahují ostatní verze, umožňují postavit mohutné stavby kompaktně bez napojování či tisku prefabrikátů. [12] [19]

Jedním z hlavních charakteristických znaků je tisk profilů neomezené délky. To umožňuje testovat složité koncepty. Technologie 3D tisku, kterou firma Luyten využívá, dokáže snížit výrobu emisí oxidu uhličitého o 40 %, a to díky originální receptuře tiskové směsi, která spotřebuje méně cementu a o 50–70 % za pomoci logistiky. [12] [20]

Parametry 3D tiskárny Platypus Expeditionary: [12] [13]

- Stavební rozměry: výška=1 000 mm, šířka=1 000 mm, neomezená délka
- Rychlost tisku: max 200 mm/s
- Rozměry vrstvy: max výška 40 mm, max šířka 40 mm
- Pohon: krokový motor
- Zdroj napájení: trojfázové napětí 230 V s frekvencí 60 Hz
- Příkon: 1 kW
- Časové parametry: Kalibrace tiskárny cca 20 min, demontáž cca 20 min
- Obsluha: min 2 pracovníci
- Pořizovací cena: 820 tisíc Kč



Obr. 14 3D tiskárna Luyten, zleva Platypus Expeditionary, Platypus X12 [12]

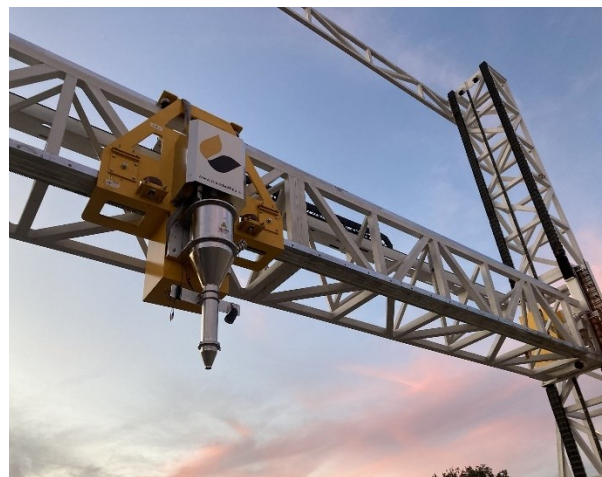
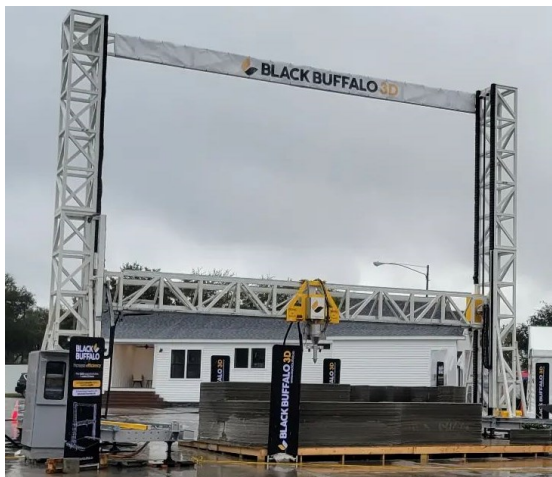
Tiskárna Black Buffalo 3D NexCon 1-1

Tiskárnu NexCon 1-1 uvedla na trh americká společnost Black Buffalo 3D začátkem roku 2022. Firma patří mezi světové dodavatele velkoplošných 3D tiskáren a také své vlastní patentované receptury tiskové směsi, která je na bázi betonu. Společnost Black Buffalo 3D se snaží držet vize, která má vést k neustálé podpoře zlepšování udržitelnosti nových staveb a to zejména eliminací přebytečného odpadu a investice do výzkumu nových tiskových materiálů. Nové směsi by se měly skládat, podle společnosti, především z obnovitelných zdrojů, které výrazně sníží dopad na životní prostředí a uhlíkovou stopu. [17]

Víceosý modulární portálový systém se specializuje na tisk vícepatrových projektů (zpravidla 3 patrových v závislosti na konstrukci střechy). Uplatní se nejen při tisku komerčních či obytných budov, ale také při tisku prefabrikátů nebo důležitých komponent infrastruktury. Jedna z hlavních předností, která značně dokáže snížit náklady a pracovní čas, je variabilita konfigurace modulárních kolejnic. Při tisku rozsáhlejších staveb lze využít škálovatelnost velikostí kolejnic. K základní konfiguraci lze přidávat další kolejnice, které usnadní přemístění tiskárny bez její bezprostřední demontáže. Trysky jsou konstruovány s otevřenou násypkou, která dovoluje obsluhu ručně vložit i malé množství směsi. Otevřenost násypky poskytuje přímou vizuální kontrolu nebo kontrolu prostřednictvím videozáznamu. Ovládací prvky tiskárny umožňují bezprostřední přerušování tisku, které najde využití např. pro okenní či dveřní otvory. [18]

Parametry 3D tiskárny: [17] [18]

- Fyzické rozměry: 14 500×11 400×10 600 mm
- Stavební rozměry: 8 000×8 000×8 000 mm
- Rychlost tisku: v ose X,Y–250 mm/s, zdvih v ose Z–50 mm/s
- Průměr trysky: 35 až 50 mm
- Doba montáže: 1–3 dny
- Hmotnost: 19 000 kg
- Příkon: 10 kW
- Zdroj napájení: AC trojfázové napětí 220 V s frekvencí 50/60 Hz
- Jmenovitý vypínací proud: min 35 kA, max 50 kA
- Kapacita sila: 10 tun
- Cena: začíná na 8,7 milionu Kč



Obr.15 Konstrukce tiskárny Black Buffalo 3D NexCon 1-1 [17] [18]

Tiskárna Constructions-3D MiniPrinter EDU

Koncepce tiskárny EDU byla navržena společností Constructions-3D zejména pro stavebně-vzdělávací sektor. Jedná se tedy o komplexní vzdělávací nástroj, který lze využít i jako školení nových pracovníků k porozumění celého výrobního procesu na menším stroji. Tiskárnu využívají také výzkumné a vývojové laboratoře, které mohou experimentovat s novými recepturami tiskové směsi a hledat optimální řešení tiskových problematik. [16]

Konstrukce tiskárny se vyznačuje použitím kartézské kinematiky s trojosým portálem a otevřeným odolným rámem. Směs je dopravována automatizovaným čerpacím systémem, který vyžaduje přimísení materiálu. Mezi kompatibilní materiály patří tiskové malty, směsi omítek a lepidel či jiné monokomponentní směsi, které vyhovují parametrům čerpacího systému. Mimo jiné je součástí koncepce také speciálně navržený software pro danou konkrétní tiskárnu. Slicer umožňuje nastavit parametry procesu tisku jako jsou např. výška vrstvy nebo rychlost pohybu extrudéru. Mezi další funkce patří také nejrůznější editační nástroje nebo možnost zpracování souborů typu STL, DXF či G-code. [15] [16]

Parametry 3D tiskárny: [15] [16]

- Fyzické rozměry: 1 430×1 060×1 260 mm
- Stavební rozměry: 615×520×600mm
- Rychlost tisku: max 300 mm/s
- Maximální přesnost: 5 mm
- Hmotnost: 53 kg (celková hmotnost 168 kg)
- Zdroj napájení: jednofázové napětí 220 V
- Materiály: kompatibilní se všechny typy jedno komponentních tisknutelných konstrukčních materiálů
- Cena: začíná na 1,7 milionu Kč

Parametry čerpacího systému: [15] [16]

- Průtok: běžně 5 l/min (1 až 50 l/min – lze měnit v průběhu tisku)
- Max velikost zrna kameniva: 6 mm
- Podpora zpevnění tisku vlákny: max délka vláken 25 mm s obsahem do 2% hmotnosti materiálu
- Max tlak: 30 barů
- Max přepravní vzdálenost: 30 m
- Zdroj napájení: jednofázové napětí 230 V s frekvencí 50 Hz
- Výkon: max 4 kW

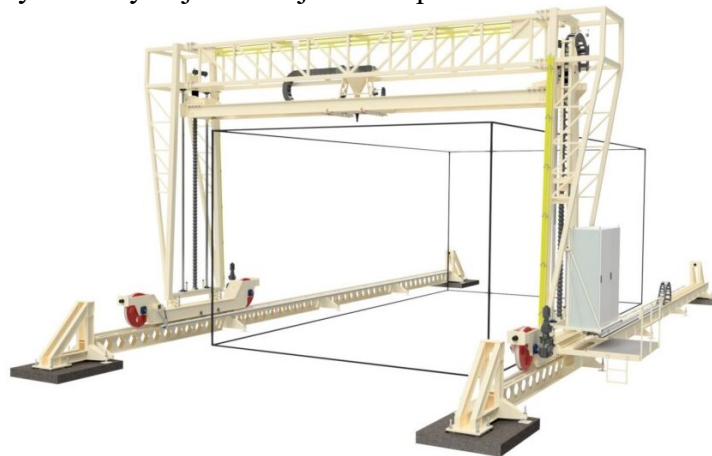


Obr. 15 Konstrukce tiskárny Constructions-3D MiniPrinter EDU [15]

Portálová tiskárna v České republice

První portálová tiskárna v České republice vznikla za spolupráce mezi univerzitou ČVUT v Praze a firmou Strojírny Podzimek a společností Podzimek a Synové. Dokázali navrhnout nejen stavbu celé tiskárny jako takové, ale společně vyvinuli vlastní plnicí směs na cementové bázi. Jako řešení dopravy směsi do tiskové hlavy zvolili vřetenové čerpadlo. Vzhledem ke zvolenému typu čerpadla bylo nutné vyvinout jemnozrnnou směs, která je vhodná pro zvolený druh čerpadla, čímž též eliminovali nežádoucí jev zvýšené pórovitosti mezi navazujícími vrstvami. Pracovní prostor kvádru má rozměry na délku 15m, šířku 7,5m a výšku 5,5m. Pro obsluhu tiskárny se předpokládají dvě osoby. Jedna má na starosti přípravu směsi a druhá dohlíží na průběh samotného tisku [4]

Další parametry tiskárny nejsou veřejně dostupné.



Obr. 16 Konstrukce první portálové tiskárny v ČR [4]

2.3.1.2 Delta souřadnice

Podobně jako u portálových tiskáren, delta tiskárny se pohybují v kartézské rovině. Odlišují se však popisem polohy umístění tiskové hlavy. Konstrukční uspořádání delta souřadnicové tiskárny se skládá ze tří nastavitelných ramen, které se pohybují vůči sobě nezávisle vertikálně nahoru a dolů po třech svislých kolejnicích. Tyto kolejnice zaujímají vrcholy v půdorysu tvaru rovnostranného trojúhelníka. Na konci ramen je umístěna tisková hlava. Software pro popis přesného umístění tiskové hlavy a její navigaci využívá trigonometrické funkce, které jsou založeny na úhlech, jenž ramena nesoucí extrudér vytváří. Prostor tisku je, na rozdíl od portálových tiskáren, ve tvaru polokoule. [1] [6]

Kinematika systému delta je velmi výhodná. Pracuje pouze s pohybem extrudéru a tím vzniká malá spotřeba elektrické energie a také menší náchylnost opotřebení mechanických částí. Kinematika tiskové hlavy vyžaduje synchronní práci všech motorů současně. V porovnání s kartézskými tiskárnami jsou tiskárny delta navrženy pro vyšší rychlost přesunu tiskové hlavy¹ a samotného tisku. Mezi další výhody lze zařadit poměrně malou velikost. Tiskárny jsou sice vysoké, ale jinak nevyžadují mnoho místa. Díky své konstrukci tak vynikají v tisku do výšky. [6] [7] [8]

S rostoucí rychlostí ovšem klesá přesnost tiskárny. Vytisknutý objekt má často hrubší povrchovou úpravu než je tomu u kartézských tiskáren. Často vznikají také chyby v polohování souřadnic, díky synchronnímu provozu všech tří motorů, jenž umožňují pohyb ramen. Jednou z nevýhod může pro některé být složité sestavení tiskárny a její kalibrace. [6] [7]

¹ Konstrukce tiskové hlavy je značně odlehčená, aby umožňovala co nejrychlejší přesun.

Zástupci delta tiskáren

Tiskárna Delta WASP 3MT CONCRETE

Cílem firmy WASP na rozdíl od jiných konkurenčních firem, které se zpravidla nejvíce zaměřili na výzkum portálových tiskáren schopné postavit celý vícepodlažní dům, bylo vyvinout systém, který dokáže 3D tisk aplikovat v nejrůznějších podmínkách, dokonce i v těch extrémních, které se objevují např. ve střední Africe. Společnost WASP se soustředila na výzkum systému delta, od kterého si slibovala menší velikost tiskárny jako celku a také vyšší energetickou účinnost. [9]

Velkorozměrná tiskárna využívá šnekový extrudér, který je koncipován nejen pro cementovou maltu, ale také pro porcelán či materiály na bázi jílu a surové zeminy. Směs je dopravována přes maltové čerpadlo do extrudéru. Čerpadlo obsahuje tlakový senzor, který je namontován na vstupu extrudéru. Díky tlakovému senzoru lze snadno řídit průtok extruze a tím se dosahuje nejvýhodnějších podmínek pro daný typ směsi. [10]

Receptura směsi na bázi cementu, kterou firma WASP vyvíjela, se skládá ze základních přísad jako jsou cement (CEM 32.5 / 42.5 R), křemičitý písek o zrnitosti do 1 mm a voda. Dále se do směsi přidávají superplastifikační aditiva, která podporují lepší čerpatelnost a udržení soudržnosti směsi při vytlačování. Poměr složek je ovlivněn mnoha činiteli mezi něž patří např. předpokládaný výkon, omezení smržitelnosti nebo doba tuhnutí. WASP dále doporučuje poměr voda/cement=3/10 a poměr cement/písek=1/2. [10]

Parametry 3D tiskárny a čerpacího zařízení: [10]

- Stavební rozměry: Ø 1 000 mm, výška=1 000 mm,
- Rychlost tisku: max 200 mm/s
- Rychlost pojezdu: max 200 mm/s
- Průměr trysky: 18 až 30mm (beton, materiály na bázi zeminy), 8 až 30mm (hlína)
- Rozměry vrstvy: výška vrstvy 9 až 15 mm, tloušťka vrstvy 20 až 40 mm
- Maximální průtok: 250 l/hod.
- Maximální tlak: 35 barů
- Hmotnost stroje: 350 kg
- Provozní teplota: 15 až 30 °C, skladová teplota: 0 až 30 °C
- Cena: začíná na 1,5 milionu Kč



Obr. 17 3D tiskárna Delta WASP 3MT CONCRETE [10]

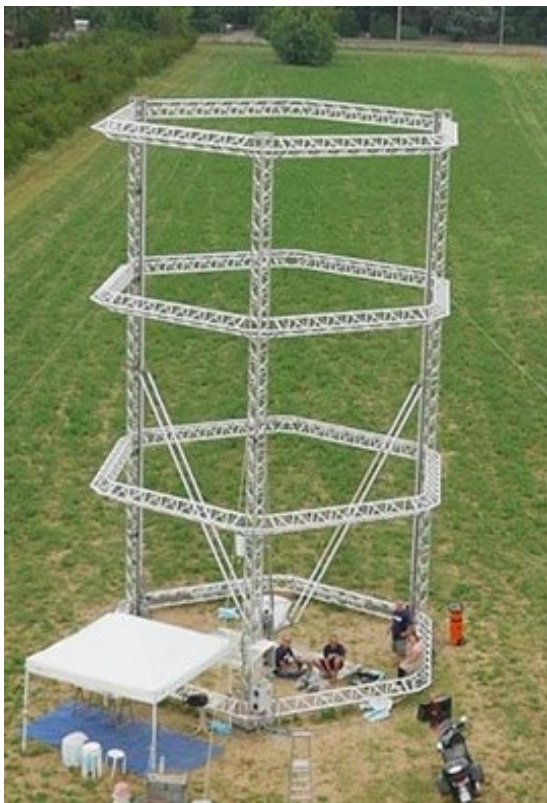
Tiskárna BigDelta WASP 12MT

Jak již z názvu plyne, jedná se o 3D tiskárnu využívající systém delta o výšce 12 metrů, čímž se uchází o jednu z nejvyšších 3D tiskáren na světě. Je koncipována pro tisk vícepodlažních domů či bytů. Všechny komponenty 3D tiskárny mají omezený maximální rozměr o velikosti 3 metry a to z důvodu snadné přepravy. Jako elektrický zdroj využívá motory pracující s maximálním napětím 220 V. Motory a další elektronické části mohou být zároveň poháněny solárními panely pro práci s napětím o velikosti 60 V. [10]

Tiskárna dokáže pracovat s mnoha materiály, výzkum byl ale zaměřen primárně na zeminu a slámu. Další vhodné materiály mohou být syntetické a technické směsi na bázi vápna s přísadou foukaného skla nebo umělého kameniva. Firma WASP v reportu výzkumu² uvedla uspokojivé výsledky, které byly dosaženy přidáním polystyrenu do cementu. Směs byla poté lehčí a levnější. [10]

Parametry 3D tiskárny: [10]

- Rozměry tiskárny: 12×7×6 m
- Nosnost extruderu: max 200 kg směsi
- Výkon všech motorů (včetně extruderu): 400 W
- Spotřeba elektrické energie: ~1 kW/h
- Rychlost tisku: max 400 mm/s



Obr. 18 3D tiskárna BigDelta WASP 12MT [10]

² Součástí výzkumu byly testovány různé variace směsi hlíny nebo slámy s aditivem konopí popř. konopných derivátů či dokonce foukaných materiálů jako je popcorn pro vytvoření vzduchových bublin. [10]

2.3.2 3D tiskárny s robotickým ramenem

Robotická ramena jsou univerzální zařízení, která bez problému zvládají, po výměně koncovky, funkce jako jsou manipulování, svařování, lakování, frézování a mimo jiné také 3D tisk. 3D tiskárna s robotickým ramenem může mít až 6 stupňů volnosti. Prostor tisku tvoří obecná 3D plocha s parametry délek jednotlivých článků a úhlů natočení v kloubech, kterými jsou články spojeny. [1] [7]

Robotická ramena umožňují tisk pouze z jedné strany, tudíž se používají především k tisku v omezeném prostoru jako jsou např. tunely. Smysl použití najdou také pro tisk svislých konstrukcí v in situ, prefabrikátů, přenosných produktů (jako je např. betonové sezení, odpadkový koš aj.) a při různých dokončovacích pracích. [1]

Tiskárny s robotickým ramenem vynikají menšími rozměry, váhou a často i pořizovací cenou. Díky těmto výhodným vlastnostem je jednodušší dostat 3D tiskárnu na pracoviště. Tiskárna je po ustavení vhodná také do náročnějšího terénu. V porovnání s rámovou tiskárnou, robotické rameno nabízí rozsáhlejší škálu použitelnosti spojené se způsobem tisku, který se dá, u složitějších a rozsáhlejších objektů, rozdělit i na více částí. Robotická ramena nevyžadují stavební komory a nemají tak omezený pracovní prostor. Mohou se tak pohybovat ve třech osách po složitých trajektoriích a natáčet se ve třech směrech, což zjednodušuje tvorbu složitých modelů. [1] [7]

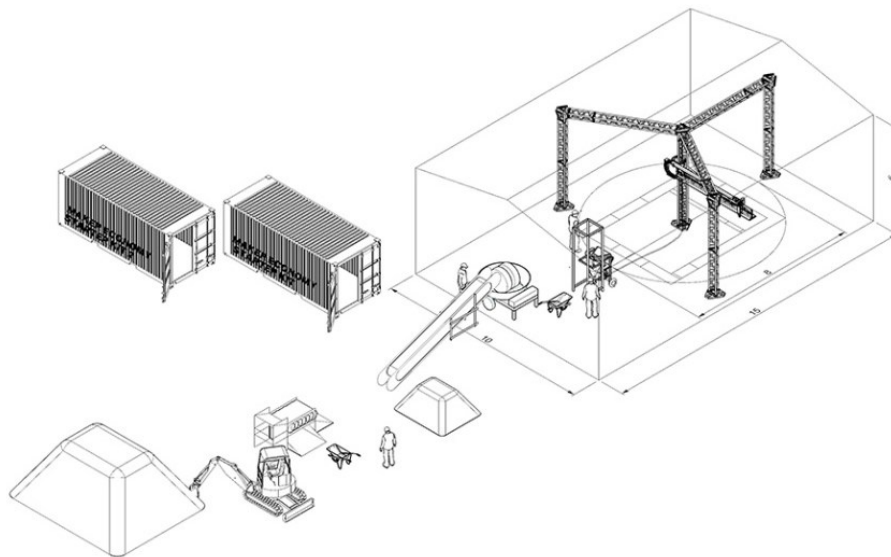
Na druhou stranu přesnost není srovnatelná s rámovými 3D tiskárnami, ale díky své variabilitě funkcí se stávají nenahraditelnými v oblasti průmyslového 3D tisku. Jako nevýhodu můžeme také vnímat omezený tiskový prostor v závislosti na velikosti robotického ramene. To se dá ale snadno eliminovat připojením tiskárny na kolejovou dráhu popř. spojením robotického ramena s podvozkem. Tímto řešením se tiskový prostor ve dvou osách stane teoreticky nekonečně velký. [1] [7]

Zástupci tiskáren s robotickým ramenem

Tiskárna Crane WASP

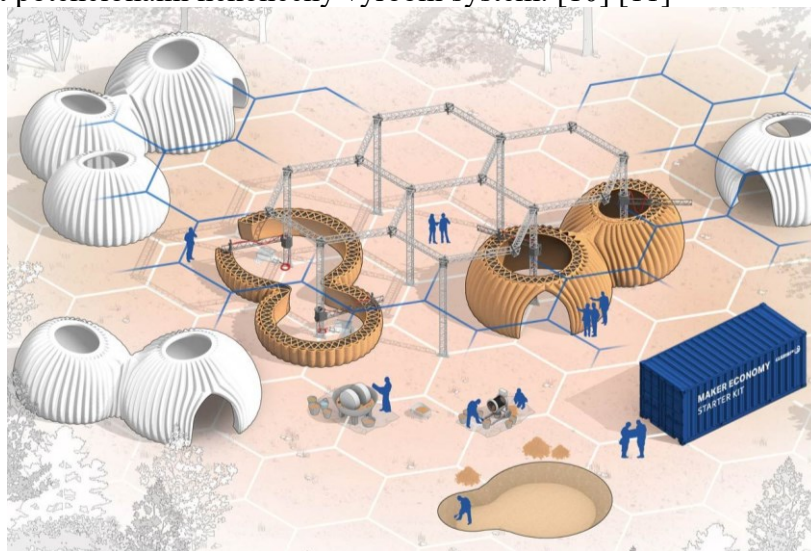
Konstrukce tiskárny CRANE WASP připomíná konvenční stavební jeřáby. Všechny díly, stejně jako u BigDelta WASP 12MT, jsou navrženy pro snadnou montáž, demontáž a rychlou dopravu. Jedna tisková jednotka je koncipována tak, aby byla soběstačná pro tisk cementu, bio cementu či dokonce přírodní směsi na bázi hlíny. Tiskárna byla využita v projektu Shamballa, který pojednával o budování ekologicky technologické vesnice s využitím aditivní technologie. Firma WASP z pohledu velikosti tiskové plochy nabízí tři základní konfigurace. [10] [11]

První a druhá konfigurace je navržena pro tiskovou plochu o velikosti 50 m². Základní varianta sestává z jedné jeřábové jednotky, ve které je zahrnuto sedm příhradových sloupů o délce 4 metry, tiskové rameno dlouhé 4,2 metru, pohybové jádro, kontrolní systém a LDM WASP Extruder XXL. Součástí základní varianty je také kontinuální podavač vybavený čistícím systémem a kontejner. Druhá konfigurace pouze doplňuje základní variantu o diskový třídič, systém míchání směsi s kapacitou 200 litrů, pásový dopravník a další kontejner. [10]



Obr. 19 3D tiskárna Crane WASP – druhá konfigurace [10]

Třetí varianta je určena pro tiskovou plochu větší než 100 m². Obsahuje 2 a více jeřábových jednotek. Díky třicestné spojnici příhradových sloupů lze přidáním více ramen a traverz vytvořit potenciálně nekonečný výrobní systém. [10] [11]



Obr. 20 3D tiskárna Crane WASP – třetí konfigurace [10]

Parametry 3D tiskárny: [10]

- Stavební rozměry: Ø 6 300 mm, výška=3 000 mm
- Rychlost tisku: max 300 mm/s
- Rychlost pojezdu: max 500 mm/s
- Průměr trysky: 8 až 16 mm (hlína), 16 až 30 mm (cementová malta)
- Rozměry vrstvy: min výška vrstvy 9 mm
- Příkon: 1 500 W
- Hmotnost stroje: 150 kg
- Provozní teplota: 10 až 40 °C, skladová teplota: 0 až 30 °C
- Cena: začíná na 3,2 milionu Kč

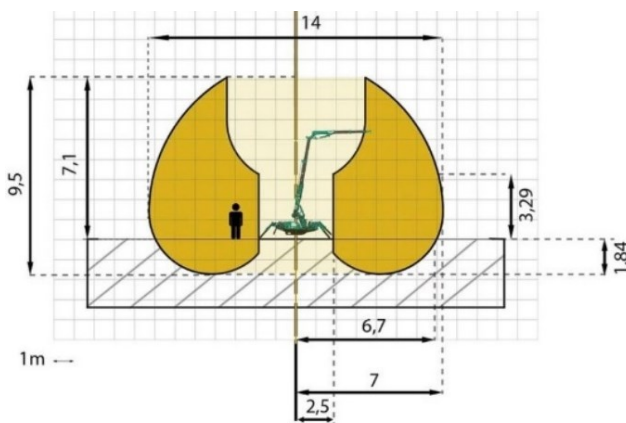
Tiskárna Constructions-3D Maxi Printer

Tiskárnu Maxi Printer vyvinula francouzská společnost Constructions-3D. Společnost se při vývoji opřela o tři základní principy a těmi jsou: robustnost, pragmatismus a snadné použití. Využívá válcový souřadnicový systém, který vytváří modifikovaný válcový stavební objem omezený pohybem robotického ramene viz *obr. 21*. Tiskárna má 5 stupňů volnosti a je opatřena pásovým robotickým podvozkem, který slouží k přesunu tiskárny na místo ustavení. K ustavení tiskárny jsou využity čtyři opěrné hydraulicky ovládané stojky. Tiskárna má sice omezené stavební rozměry, ale díky pásovému podvozku ji lze jednoduše přemístit a rozšířit tak stavební plochu rozdělením tisku na více částí. [14] [15]

Jednou z hlavních předností je poměrně rychlá instalace a inicializace, kterou obsluha zvládne do 2 hodin. Demontáž tiskárny a její čištění zabere obsluhu maximálně hodinu a půl. Součástí kompletu, mimo samotnou tiskárnu, je také klasický přepravní kontejner, automatický čerpací systém vybavený zásobníkovým silem, software a obrazovka dálkového ovládání. Tiskárnu společně s dalšími částmi je pak možné přepravit na místo tisku, díky kontejneru pomocí železnice, kamionu či zaoceánského plavidla. Kontejner slouží nejen k přepravě, ale také k uskladnění před nepříznivými povětrnostními podmínkami. [14]

Parametry 3D tiskárny: [14] [15]

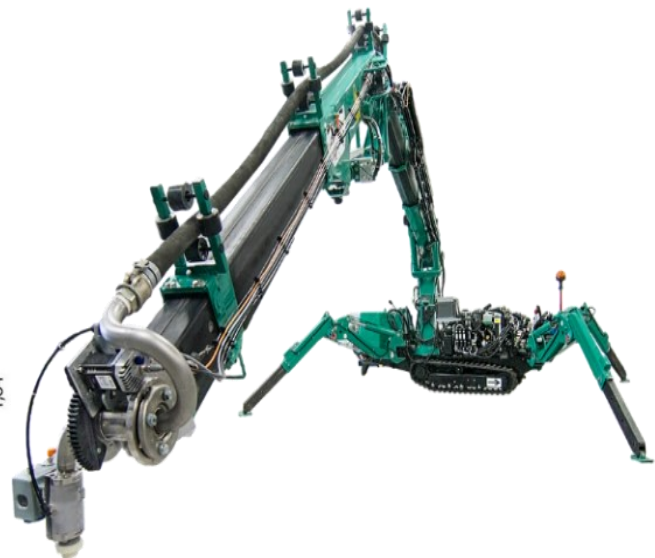
- Fyzické rozměry: 3 000×850×2 000 mm
- Stavební rozměry: max Ø 14×9,5 m
- Rychlost tisku: 100 až 150 mm/s
- Rychlost pásového podvozku: max 3 km/h
- Rozměry vrstvy: 25 mm (10 až 40 mm)
- Maximální přesnost: 5 mm
- Hmotnost: 2 500 kg (6 tun včetně příslušenství)
- Výkon elektrického motoru: max 7 kW
- Zdroj napájení: trojfázové napětí 380 V s frekvencí 50 Hz
- Pohon podvozku: spalovací vznětový motor
- Materiály: Cementová malta, nátěry (omítka), lepidlo (pojivo)
- Provozní podmínky: teplota –5 až 50 °C
- Cena: začíná na 11,8 milionu Kč



Obr. 21 Tiskový prostor [14]

Parametry čerpacího systému: [14] [15]

- Průtok: běžně 10l/min (1 až 32 l/min – lze měnit v průběhu tisku)
- Max velikost zrna kameniva: 5 mm
- Podpora zpevnění tisku vláknou: max délka vláken 25 mm s obsahem do 2% hmotnosti celkového materiálu
- Max tlak: 50 barů
- Délka hadice: 26 m
- Zdroj napájení: trojfázové napětí s frekvencí 50 Hz
- Výkon: max 10 kW
- Kapacita sila: 1,2 m³ (suchého materiálu)



Obr. 22 Tiskárna Constructions-3D Maxi Printer [15]

Tiskárna PotterBot Scara Elite v2

Model 3D tiskárny Scara Elite pochází od americké společnosti 3D Potter. Koncept je navržen pro tisk menších objektů s použitím extrudéru o maximální kapacitě 4 litry nebo pro velkoplošný tisk pomocí připojení automatického kontinuálního čerpacího systému. [21]

I při poměrně vysokých rychlostech tisku si tiskárna udržuje snesitelnou hlučnost a může se tedy používat v různých oblastech bez obav rušení okolí. Koncept tiskárny si udržuje relativně vysokou přesnost a to především, díky své robustní konstrukci. Jako primární materiál pro konstrukci je použit těžký letecký hliník třídy 6061, který se v kombinaci s CNC obráběním a svařováním vyznačuje maximální pevností a tuhostí. Pro pohon ramen se využívají hybridní sofistikované krokové motory s uzavřenou smyčkou. Úkolem palubního počítače s telemetrií, který každý motor zahrnuje, je aktualizovat svou polohu a tím eliminovat chybu polohy. [21]

Robotické rameno je schopné se otáčet o 360 stupňů. Půdorys tiskového prostoru má pak tvar mezikruží viz *obr. 23 a*). Přidáním kolejnicového systému Roardrunner se tiskovému zařízení umožní řízení další osy pohybu a tím se také rozšíří tiskový prostor viz *obr. 23 b*). [21]

Parametry 3D tiskárny: [21]

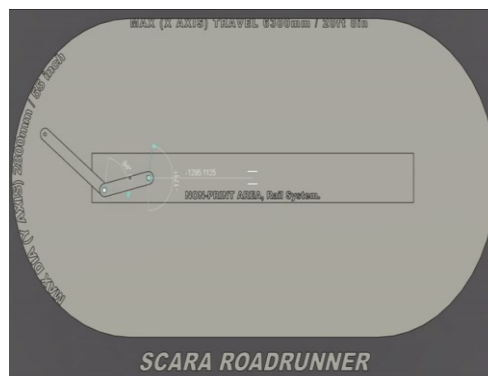
- Fyzické rozměry: 1 574,8×1 016×812,8 mm
- Stavební rozměry: max Ø 2,92×1,72 m
- Rychlost tisku: 30 až 130 mm/s
- Velikost trysky: 6–51 mm
- Hmotnost: 45 kg
- Zdroj napájení: napětí 110–220 V s frekvencí 50–60 Hz
- Spotřeba energie: 192 W/h
- Materiály: Cementová malta, keramika, jíla
- Cena: začíná na 640 tisíc Kč

Parametry čerpacího systému: [21]

- Rozměry: 1 270×711×635 mm
- Hmotnost: 50 kg
- Průtok: 0,8 až 25,5 l/min
- Max velikost zrna kameniva: 6,35 mm
- Max pracovní tlak: 31 barů
- Zdroj napájení: napětí 110–220 V s frekvencí 50–60 Hz
- Výkon: 2,2 kW
- Spotřeba energie: 240 W/h
- Kapacita zásobníku: 50 l



a)



b)



c)

Obr.23 a) tiskový prostor Scara Elite, b) systém Roardrunner, c) 3D tiskárna Scara Elite [21]

2.4 Beton

Beton je vícesložkový materiál, který se skládá z těchto základních částí: pojivo, plnivo a voda. Mezi doplňkové složky, které nejsou nezbytné k vytvoření betonu, řadíme přísady a příměsi. Poměr jednotlivých složek se odvíjí od typu aplikace. [35]

2.4.1 Pojivo

Pojivem v betonové směsi rozumíme nejčastěji cement. Cement je jemně mleté práškové hydraulické pojivo, které po kontaktu s vodou začíná tuhnout na vzduchu i ve vodě. Po ztuhnutí je schopen si uchovat svoji pevnost a stálost. Vyrábí se pomletím tzv. slínku s různými variacemi přísad. Slínek je částice, která se vytváří pálením určitých surovin při teplotách nad mezí slinutí (~1450 °C). Velmi jemná zrna cementu zaujímají velikost od 1 do 250 μm. Cement lze klasifikovat do pěti základních skupin viz *tabulka 2*. [35]

Tabulka 2 Druhy cementu [35]

| Název | Označení |
|---------------------------|----------|
| portlandský cement | CEM I |
| portlandský cement směsný | CEM II |
| vysokopeční cement | CEM III |
| pucolánový cement | CEM IV |
| směsný cement | CEM V |

Cement dále rozdělujeme dle počtu základních složek. Portlandský, jednosložkový, cement obsahuje směs mletého portlandský slínku smíchaného se 3 až 5 % sádrovce. Cementy II–V jsou cementy vícesložkové, kde je určitá část slínku nahrazena jinou hydraulicky aktivní látkou (typicky vysokopeční struska, křemičitý úlet, popílků a vápenec). Vysokoteplotní struska vzniká jako vedlejší produkt při výrobě surového železa ve vysoké peci. Má latentně hydraulické vlastnosti. Aby se chovala jako hydraulické pojivo, je potřeba přítomnost aktivátoru (např. CaO neboli oxid vápenatý, který je obsažen ve sklínku). Křemičitý úlet rovněž mikrosilika jsou charakterizována jako velmi jemné částice kulovitěho tvaru s velikostí 0,1–2 μm, které se tvoří při zpracování křemíku v obloukové elektrické peci. Popílků jsou částice často kulovitěho tvaru s velikostí 1–100 μm, které se tvoří při spalování uhlí v tepelných elektrárnách. [35]

Mezi další pojiva patří asfalt (asfaltobeton), syntetická pryskyřice (polymerbeton), sádra (sádrobeton) či síra (sírobeton). [35]

2.4.2 Plnivo

Plnivo respektive kamenivo je sypký zrnitý anorganický, přírodní nebo umělý stavební materiál (písek, štěrky, drť, granule), který se vyrábí z přírodních hornin a zemin popřípadě z průmyslových odpadů (typicky strusky, popílků, skla či škváry). V betonové směsi zaujímá 70 až 80 % objemu. Dle velikosti částic se kamenivo dělí na tři skupiny viz *tabulka 3*. [35]

Tabulka 3 Druhy kameniv dle velikosti zrn [35]

| Název | Velikost zrn [mm] |
|-----------------|-------------------|
| Hrubé kamenivo | 4–125 |
| Drobné kamenivo | < 4 |
| Jemné částice | < 0,063 |

Normativní postup pro klasifikaci kameniva dle velikosti zrn se provádí pomocí síťového rozboru. Síta jsou kruhového tvaru opatřené oky tvaru čtvercového. Základní sestavení je sloupové, kde nejmenší síto 0,063 mm je umístěno nejniž. Postupem nahoru se síta zvětšují na 0,125; 0,250; 0,500; 1; 2; 4; 8; 16; 32; 63 mm. Částice, které nepropadnou daným sítím a

jsou zachyceny v rozmezí dvou sít, tvoří frakci kameniva. Frakce jsou značeny čísla, které představují velikost rozhraní dvou sít např. 8/16 značí frakci zrna, která prošla sítmem s oky velikostí 16 mm a zachycena sítmem s oky velikostí 8 mm. [35]

Jeden z požadavků na kamenivo, použité pro betonovou směs, je nízká mezerovitost. To se dosáhne pomocí mísení různých velikostí zrn, kde menší zrna zapadnou do mezer zrn větších. Nízká mezerovitost se vyznačuje vyšší pevností a trvanlivostí betonu. Dále dochází také k úspoře cementu, který je jednoznačně nejdražší položkou při výrobě betonu. Existují nežádoucí látky, které by kamenivo do betonu nemělo obsahovat. Tyto látky mohou mít negativní dopad na tuhnutí betonu, způsobit vnitřní pnutí či objemové změny aj. Přehled škodlivých látek je uveden v tabulce 4. [35]

Tabulka 4 Přehled nežádoucích látek v kamenivu [35]

| Označení nežádoucí látky | Význam |
|--|---|
| Hlinité, jílovité nebo prachovité jemné částice menší než 0,063 mm | Tvoří tenký povlak na povrchu zrn, který znemožňuje pevné spojení plniva a pojiva. Tolerance částic je do 3 % celkového obsahu. |
| Humusovité látky a látky obsahující cukry | Dochází ke zpomalení tuhnutí a tvrdnutí betonu. |
| Živočišné schránky | Tolerance částic je do hmotnostních 10 %. |
| Sírany (sulfáty) | Způsobují nebezpečné rozpínáním betonu. Mají negativní vliv na tuhnutí směsi. Podporují korozi ocelové výztuže. |
| Chloridy (sodné a draselné soli) | Ve vyztuženém betonu způsobují korozi. |
| Látky podléhající alkalicko-křemičité reakci | Reakce způsobuje porušení struktury a snížení materiálových charakteristik. |

2.4.3 Voda

Voda, která se využívá při výrobě betonu, se rozděluje dle technologického faktoru na záměsovou a ošetřovací. Voda záměsová je jednou ze tří základních pilířů pro tvorbu betonu, přidává se při míchání čerstvého betonu. Tvrdnoucí beton je potřeba po určitou dobu mírně zvlhčovat (z důvodu hydratace cementu), k tomuto účelu slouží voda ošetřovací. [35]

Záměsová voda má v betonu dvojí funkci, a to hydratační a reologickou. Pro správné tuhnutí a tvrdnutí betonové směsi je nutná hydratace cementu jakožto pojiva, pro kterou je záměsová voda nepostradatelná. Reologické vlastnosti betonové směsi jako jsou čerpatelnost, koheze či konzistence jsou ovlivněny množstvím dodané vody do čerstvého betonu. Dodané množství vody se charakterizuje tzv. vodním součinitelem. Ten je definovaný jako poměr hmotnosti vody vůči hmotnosti cementu v čerstvém betonu. Teoretický vodní součinitel, který je postačující pro ideální hydrataci cementu, je stanoven na 0,23–0,25. Taková směs je ale příliš tuhá a nekomfortní pro manipulaci. V technické praxi se využívá vyššího vodního součinitele (typicky 0,45–0,70). [35]

Požadovaná konzistence betonové směsi se dá výrazně ovlivnit použitím přísad, konkrétně superplastifikátorů, které umožňují aplikovat vodní součinitel v intervalu 0,27–0,35. Čím více záměsové vody betonová směs obsahuje, tím vyšší bude pórovitost ztvrdlého betonu. Zvýšená pórovitost přináší do betonové směsi negativními vlastnosti jako jsou: nižší pevnost a trvanlivost nebo vyšší nasákavost. [35]

V průběhu tuhnutí a tvrdnutí betonu dochází k vypařování záměsové vody. Je nutné vypařenou vodu dodat betonové směsi zpět ve formě ošetřovací vody. V případě absence hydratace cementu ošetřovací vodou dochází ke vzniku kapilárních napětí a smršťování betonu v době, kdy ještě nemá přijatelnou pevnost v tahu. Vytvářejí se tak v betonu trhliny, a ty snižují pevnost a trvanlivost. [35]

2.4.4 Přísady

Přísady chápeme jako chemikálie (typicky kapaliny), které přidáváme do betonu za účelem zlepšení určitých vlastností v čerstvém nebo ztvrdlém stavu. Vhodnou kombinací přísad můžeme dosáhnout např. zpomalení či urychlení tuhnutí směsi, změnu viskozity čerstvého betonu, zvýšení mrazuvzdornosti ztvrdlého betonu nebo snížení propustnosti betonu vůči tekutinám. Přehled nejběžnějších přísad do betonu je uveden v *tabulce 5*. [35]

Tabulka 5 Přehled přísad do betonu [35] [36]

| Název přísady | Význam | Zastupující látky |
|---------------------------------------|--|--|
| Plastifikátory a superplastifikátory | Redukce množství záměsové vody při zachování konzistence čerstvého betonu. Popřípadě zlepšení zpracovatelnost čerstvého betonu při zachování stejného množství vody. | Lignosulfonany, hydrolyzovaný škrob |
| Provzdušňovací přísady | Zvýšení odolnosti vůči proměnlivému zmrazování a rozmrazování, zpracovatelnosti a soudržnosti směsi. Snížení pevnosti betonu. | Polymerní mikrodutinky, MICROPORAN |
| Urychlovače tuhnutí a tvrdnutí betonu | Urychlení vývoje pevnosti betonu, dochází ke zkrácení přechodu čerstvého kapalného betonu do tuhého stavu. | Chlorid vápenatý, triethanolamin |
| Retardační přísady | Zpomalení tuhnutí a tvrdnutí betonové směsi, dochází tak k prodloužení přechodu čerstvého kapalného betonu do tuhého stavu. | Methanol, cukr, deriváty sacharidů, rozpustné boritany |
| Hydrofobizační přísady | Zabránění pronikání vody a ochrana před navlhnutím. Dochází zároveň k provzdušnění a zlepšení zpracovatelnosti směsi. | Mýdla mastných kyselin, hydrolyzovatelné oleje, asfaltové emulze |
| Biocidní přísady | Zabránění biologické koroze a nežádoucího zbarvení směsi způsobeného organismy, jako jsou bakterie, houby či hmyz. | Síran měďnatý, pentachlorfenol |

2.4.5 Příměsi

Příměsi charakterizujeme jako nejemno mleté práškovité minerální látky, jejichž cílem je kupříkladu zlepšení zpracovatelnosti směsi (kamenné moučky), změna odstínu směsi (práškové pigmenty), eventuálně zvýšení pevnosti a trvanlivosti (vysokopecní struska a pucolány³). Příměsi dále rozdělujeme na dva typy. [35]

Typ I představuje látky chemicky inertní, které se přímo nezúčastňují žádné hydratační reakce. Reologické vlastnosti mění prostřednictvím fyzikálních účinků. Příměsi typu I slouží ke zlepšení zpracovatelnosti, zvyšují soudržnost a přilnavost betonové směsi vůči podkladu. Pro aplikaci příměsí typu I je zvýšený požadavek množství vody, které v konečném efektu snižuje pevnost betonu a zvyšuje jeho smrštění. Jsou vhodné pro aplikace, kdy není primární požadavek vysoké pevnosti betonu. Mezi zástupce příměsí typu I spadají např. kamenné moučky a práškové pigmenty. [35]

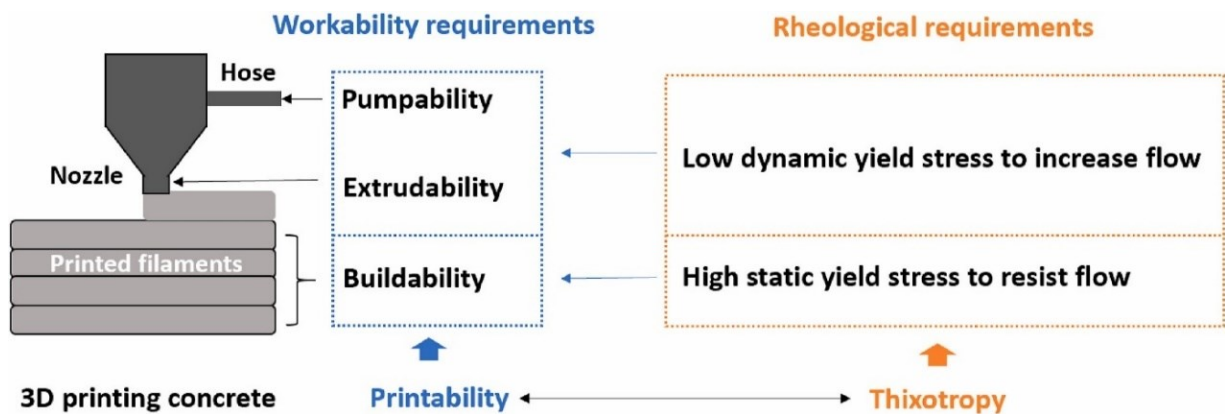
Typ II reprezentují látky vykazující pucolánové nebo latentně hydraulické vlastnosti, které na rozdíl od příměsí typu I aktivně vstupují do hydratačního procesu. Příměsi typu II zlepšují zpracovatelnost betonové směsi, zvyšují pevnost a trvanlivost betonu. Mezi zástupce příměsí typu II řadíme popílky, mikrosilika či vysokopecní strusku. [35]

³ Pojem pucolány označují přírodní nebo průmyslové anorganické látky, které samostatně s vodou nereagují. Pokud jsou však jemně rozemleté, vytváří ve vodě s rozpuštěným hydroxidem vápenatým kalcium-silikát-hydráty, které vznikají např. při hydrataci portlandského cementu. [35]

2.5 Tisková směs

Aditivní metoda 3D tisku umožňuje eliminovat potřebu bednění. Tento fakt přináší mnoho výhod, ale především komplikací. Výhodou se stává úspora času, nákladů a materiálů potřebných k výstavbě bednění. Na druhou stranu fakt výstavby stavební struktury bez bednění přivádí specifické požadavky na tiskovou směs. Při absenci bednění je velmi důležité řízení hydratačních a reologických vlastností směsi. [37]

Existují čtyři základní vlastnosti, na které betonová tisková směs klade důraz při návrhu jejího složení: 1) čerpatelnost neboli extrudovatelnost, je charakterizována jako bezproblémový průchod směsi dopravním potrubím a tryskou tiskové hlavy; 2) zpracovatelnost, která umožňuje směs míchat, ukládat a provádět dokončující operace ve smyslu vytvoření konzistentní směsi; 3) otevřená doba, představuje dobu, po kterou jsme schopni směs uskladnit a udržovat její požadovanou viskozitu potřebnou k čerpání a vytlačování ze zásobníku do trysky; 4) sestavitelnost, popisuje schopnost směsi po vytlačení udržet si svůj tvar. Uvedené vlastnosti jsou navzájem závislé a také protichůdné, což komplikuje optimální návrh tiskové směsi. [23]



Obr. 24 Protichůdné reologické požadavky procesů 3D tisku betonu [38]

Materiály na bázi cementu doprovází v průběhu tisku časově závislé chemické reakce a fázové změny. Tisková směs se přeměňuje z tekuté pasty tuhým tak, aby po nanesení vrstvy zůstala stabilní a vydržela zatížení od návazných vrstev. Fázová transformace je ovlivněna návrhem směsi (tj. volba typu cementu, příměsí, přísad a vodního součinitele), reakční kinetikou, vnějším prostředím (tj. teplota a relativní vlhkost) a parametry tiskového procesu (tj. vytlačovací tlak, rychlost tisku a tloušťka vrstvy). [3]

Tisková směs, použitá pro extruzi, se patrně odlišuje od konvenčního betonu. Mezi hlavní specifické nároky na vlastnosti tiskové směsi přísluší: malá velikost kameniva (typicky do 4 mm) způsobí snadnější průchod potrubím či tryskou a zvýší rozlišitelnost tisku; urychlení tuhnutí tak, aby vrstva byla schopna unést vrstvu návaznou bez či s minimální deformací; nízký vodní součinitel; zvýšený obsah příměsí (typicky mikrosilika a popílek) a přísad (typicky urychlovače a plastifikátory). [1]

2.5.1 Vývoj vlastností tiskové směsi

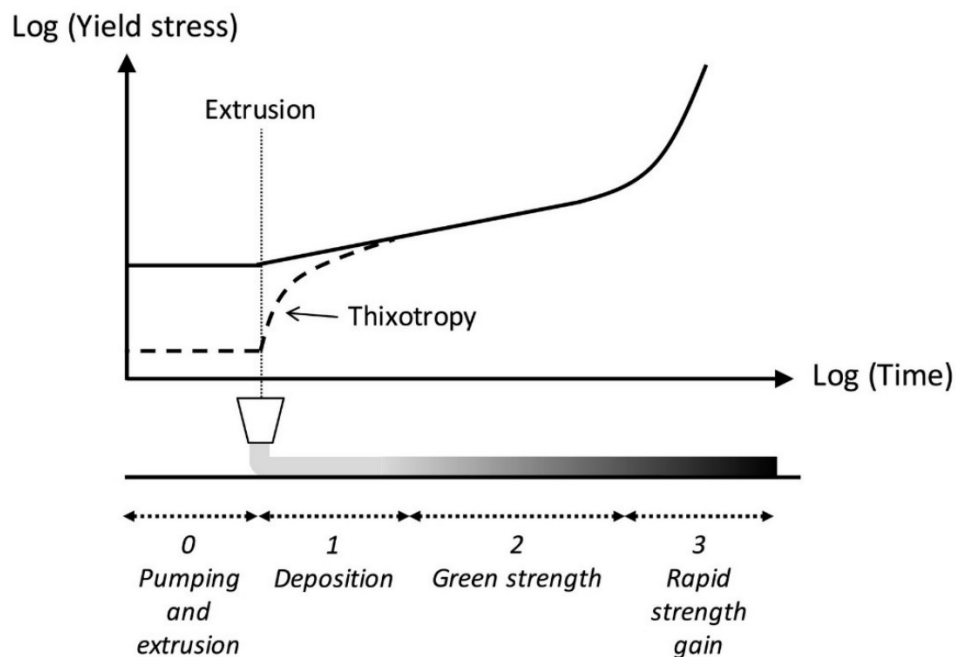
Předpokládaný vývoj tekutosti, vyjádřený jako mez kluzu, tištěné betonové směsi popisuje schematicky *obr. 25*. Proces je rozdělen do čtyř fází. Dynamická mez kluzu označuje napětí nezbytné k ukončení toku pod smykem, na rozdíl od statické meze kluzu, která určuje napětí nezbytné k zahájení toku z klidného stavu. Tixotropie je časově závislá vlastnost, kterou se vyznačují čerstvé materiály na bázi cementu. Průběh vývoje tekutosti směsi, která obsahuje tixotropní činidla je označen čárkovaně. Na *obr. 25* je vyznačena závislost statické meze kluzu, která je kritická z pohledu tvarové stability a únosnosti. Směr ukládání betonu je schematicky znázorněn pohybem zprava doleva, přičemž čerstvý beton je světle šedý a tvrdnoucí beton je černý. [37]

Nultá fáze určuje časový interval, kdy je na betonovou tiskovou směs vyvíjen vysoký smyk při míchání, čerpání a vytlačování. V této fázi splňuje betonová směs podmínky stability a vysoké tekutosti. [37]

Fáze 1 charakterizuje mez kluzu bezprostředně po vytlačení směsi z trysky a její uložení. Tisková směs ve fázi 1, na rozdíl od fáze 0, je v klidu vykazující vlastní strukturální narůstání. Prioritou vrstvy, poté co je uložena, je schopnost zachovat si svůj tvar. Použitím tixotropních popř. flokulačních činidel lze také zajistit strukturální stabilitu. Lze tak uvažovat nižší počáteční mez kluzu a rychlé vytvoření struktury ihned po nanesení. [37]

Fáze 2 znázorňuje přechodovou etapu, kdy dochází k téměř lineárnímu růstu statického napětí na mezi kluzu v průběhu času. Betonová tisková směs ve fázi 2 vykazuje stále konstantní dynamické napětí na mezi kluzu. Směs lze stále snadno ukládat a tvarovat. Interval doby lze v dané fázi vyladit kombinací retardérů a urychlovačů. [37]

Fáze 3 představuje klíčovou etapu v případě extruzivního 3D tisku. Okamžik přechodu z fáze 2 na fázi 3 značí, že materiál velmi rychle nabývá dostatečné pevnosti potřebné pro únosnost dalších vrstev. Tento proces by měl být zároveň dostatečně rychlý, aby se předešlo vzniku povrchových vad. [37]



Obr. 25 Vývoj statické meze kluzu v závislosti na čase [37]

2.5.2 Receptury tiskové směsi

2.5.2.1 Receptura 1–Dr. Khoshnevis

Směs CC, kterou využil Dr. Khoshnevis v polovině 90. let obsahovala 37 % hydraulického portlandského cementu typu II, 41 % písku, 3 % změkčovadla a 19 % vody, vytvrzení na maximální pevnost během několika hodin [23]

2.5.2.2 Receptura 2–Lim a kol.

Lim a kol. uvedli, že jejich tiskařská malta na bázi cementu se skládala z 54 % písku, 36 % reaktivních cementových sloučenin a 10 % vody, což je zcela odlišné od konvenční betonové směsi. [23]

2.5.2.3 Receptura 3–Gosselin a kol.

Gosselin a kol. vyvinuli směs z 30–40 % portlandského cementu, 40–50 % krystalického křemene, 10 % křemičitého úletu a 10 % vápencového plniva s poměrem voda/cement 0,1. Konzervativní odhad pevnosti v tlaku byl stanoven na 120 MPa. [23]

2.5.2.4 Receptura 4–Ducoulombier a kol.

Výzkumný tým Ducoulombier a kolektiv představili novou reologickou metodu, která umožňuje vyhodnotit namáhání tiskových směsí na výstupu z trysky při extruzi. Daná metoda vychází z konceptu nonnewtonského proudění, které popisuje výstup materiálu z trysky. Výstupem studie je vývoj měření viskozitních parametrů pomocí modifikované metody odkapávání. Výsledky zkoušky a materiálové složení jednotlivých testovacích směsí najdeme v tabulce 6. [40]

Tabulka 6 Složení receptury 6 a výsledky zkoušky odkapávání [40]

| Označení mixu | Manuální test | | | Automatický test | | | |
|----------------------------------|---------------|------|------|------------------|------|-----|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Premix [kg] | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Skleněná vlákna [g] | - | - | - | - | - | 4 | 4 |
| Voda [g] | 105 | 105 | 105 | 96 | 96 | 96 | 96 |
| Fluid Optima [g] | 3,7 | 3 | 3 | 4,3 | 4,6 | 4,3 | 4,3 |
| Polyakrylamid (PAM) [g] | - | - | - | - | - | 6 | 7,5 |
| Hmotnostní průtok [g/s] | 3,5 | 3,9 | 3,3 | 7 | 15 | 12 | 22 |
| Mez kluzu po jednom měření [Pa] | 170 | 260 | 500 | 300 | 190 | 410 | 1380 |
| Neurčitost po jednom měření [Pa] | 40 | 50 | 100 | 60 | 50 | 80 | 70 |
| Počet experimentů / Kapek | 4 | 4 | 4 | 24 | 30 | 22 | 39 |
| Mez kluzu [Pa] | 210 | 290 | 520 | 350 | 270 | 400 | 1353 |
| Standartní odchylka [Pa] | 9,4 | 11,1 | 34,7 | 50 | 44 | 120 | 190 |
| Variační koeficient [%] | 4,5 | 4 | 6,5 | 11,5 | 16,2 | 30 | 14 |
| Neurčitost [Pa] | 10 | 11 | 34 | 20 | 20 | 50 | 60 |

2.5.2.5 Receptura 5–Le a kol.

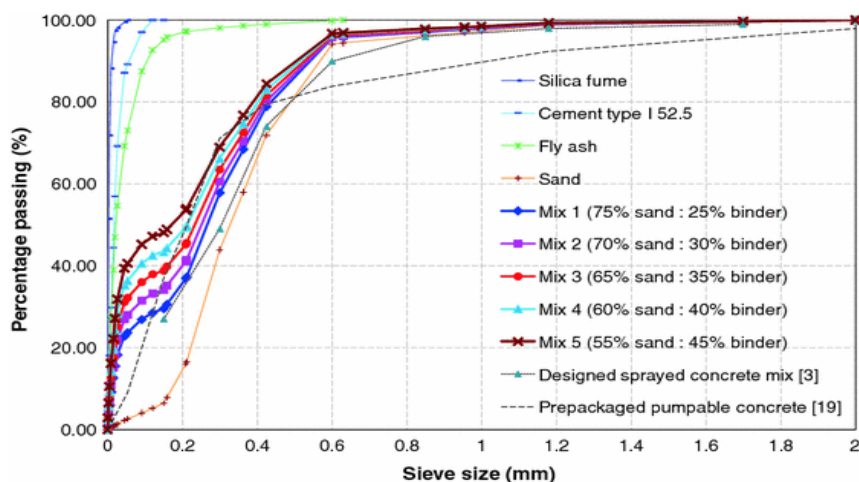
Le a kolektiv zkoumali celkem 5 testovacích směsí, které navrhli pomocí kombinace výsledků analýzy částic viz *obr. 26*. Pro srovnání je také uvedena čerpatelná stříkaná malta a komerční balená malta. Maximální velikost agregátu (písku) byla stanovena na 2 mm z důvodu dosažení vysoké rozlišitelnosti a snadného průchodu 9 mm tryskou extrudéru. Hlavní složkou pojiva tvořil cement CEM typu I s označením 52.5, dále popílek a křemičitý úlet. Pro zvýšení zpracovatelnosti a pevnosti způsobené snížením poměru vody a pojiva byla přidána superplastifikační přísada na bázi polykarboxylátu. Pro udržení konstantního toku směsi během fáze extruze směs obsahovala retardér skládající se z kyseliny methylenfosfonové, kyseliny citronové a formaldehydu. V neposlední řadě byl do směsi přidán urychlovač na bázi síry, hliníkové soli a diethanolaminu. Poslední přísada byla tvořena vlákny z polypropylenu o délce 12/0,18 mm, která způsobovala snížení smrštění a deformace směsi v plastickém stavu. [44]

Jednotlivé testovací směsi se odlišovali obsahem agregátu a pojiva, který byl odstupňován po 5 %. Obsah agregátu Mixu 1 zaujímal hmotnostních 75 % suché směsi, kdežto obsah pojiva zastával zbylých 25 % hm. suché směsi. Obsah agregátu u Mixu 5 klesl na 55 % hm. suché směsi zatímco obsah pojiva vzrostl na 45 % hm. suché směsi. Pojivo všech směsi se skládalo z 70 % cementu, 20 % popílku a 10 % mikrosilik. Cílem studie bylo vyvinout vysokopevnostní beton s pevností v tlaku vyšší než 100 MPa. Proto byl poměr voda/pojivo zvolen jako 0,28. [44]

Provedené testy extrudovatelnosti stanovily Mix 4 jako optimální směs. Poměr voda/pojivo byl přehodnocen na 0,26 a poměr písek/pojivo zvolen 3/2. Bylo použito 1,2 kg/m³ mikro polypropylenových vláken, 1 a 0,5 % hm. pojiva superplastifikátoru a retardéru pro dosažení ideální zpracovatelnosti 0,55 kPa pevnosti ve smyku a otevřené doby až 100 minut. Pevnost v tlaku tištěného testovacího vzorku byla stanovena po 1, 7, 28 a 56 dnech na 20, 80, 110 a 125 MPa. [44]

Tabulka 7 Základní složky tvořící recepturu směsi 5- Le a kol. [44]

| Materiál | Proporce směsí [kg/m ³] | | | | |
|----------------|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| | Mix 1 | Mix 2 | Mix 3 | Mix 4 | Mix 5 |
| Agregát | 1612 | 1485 | 1362 | 1241 | 1123 |
| Cement | 376 | 446 | 513 | 579 | 643 |
| Popílek | 107 | 127 | 147 | 165 | 184 |
| Křemičitý úlet | 54 | 64 | 73 | 83 | 92 |
| Voda | 150 | 178 | 205 | 232 | 257 |



Obr. 26 Distribuce velikosti částic směsi receptury 5 [44]

2.5.2.6 Receptura 6–Tao Ding a kol.

Výzkumná studie v provedení Tao Ding a kolektivem zkoumala aplikaci recyklovaného písku namísto přírodního písku. Recyklovaný písek má rozdílné vlastnosti a charakteristiky viz *tabulka 8* oproti přírodnímu. Odlišuje se nižší hustotou a vyšší absorpcí vody, díky porézním vlastnostem a kontaktem s již použitou tiskovou směsí. Mimo základní složky tisková směs obsahuje přísady jako jsou HPMC⁴, glukonát sodný, superplastifikátor na bázi polykarboxylátů a nanojíl. [39]

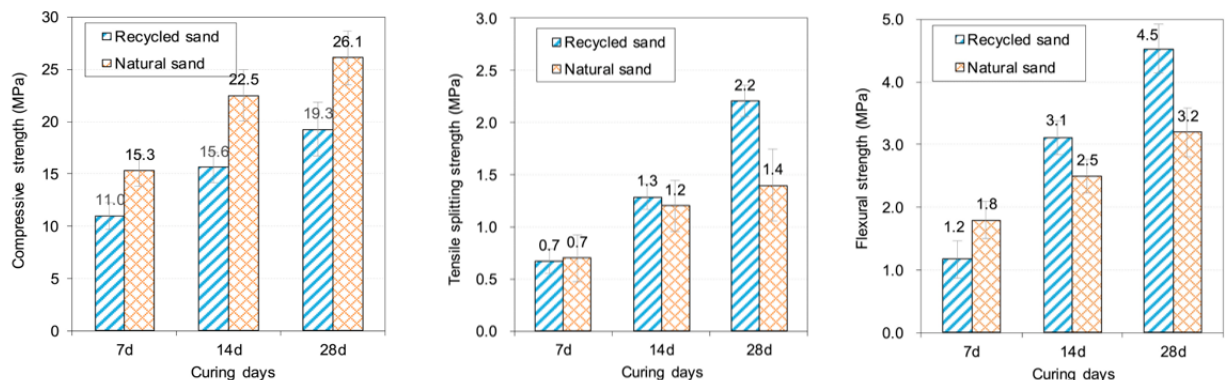
Výsledkem studie bylo zjištění, že pevnost v tlaku tištěné struktury s použitím recyklovaného písku je nižší než při použití přírodního kameniva. Dále bylo zjištěno, že mechanické vlastnosti se výrazně zvýšily se stářím daného vzorku. *obr. 27* ukazuje nárůst mechanických vlastností směsi s použitím 25 % recyklovaného kameniva po 7, 14 a 28 dnech. [39]

Tabulka 8 Materiálové charakteristiky použitého kameniva receptury 6 [39]

| Kamenivo | Modul jemnosti [-] | Maximální velikost zrna [mm] | Zdánlivá hustota [kg/m ³] | Volná/zhuštěná hustota balení [kg/m ³] | Obsah vlhkosti [%] | Nasákavost [%] |
|-------------------|--------------------|------------------------------|---------------------------------------|--|--------------------|----------------|
| Přírodní písek | 1,62 | 0,9 | 2586,5 | 1399/1491 | 0,2 | 4,5 |
| Recyklovaný písek | 1,53 | 0,9 | 2410,7 | 1014/1070 | 0,6 | 13,5 |

Tabulka 9 Složení receptury 6-Tao Ding a kol. [39]

| Mix | Poměr recyklovaného písku [%] | Přírodní kamenivo [g] | Recyklované kamenivo [g] | Portlandský cement [g] | Voda [g] | Superplastifikátor [g] | HPMC [g] |
|-----|-------------------------------|-----------------------|--------------------------|------------------------|----------|------------------------|----------|
| M1 | 0 | 1000 | 0 | 1000 | 350 | 0,83 | 1,28 |
| M2 | 12,5 | 875 | 125 | 1000 | 361,25 | 1,03 | 1,28 |
| M3 | 25 | 750 | 250 | 1000 | 372,5 | 1,25 | 1,28 |
| M4 | 50 | 500 | 500 | 1000 | 395 | 1,85 | 1,28 |



(a) Compressive strength with various curing age (b) Splitting tensile strength with various curing age (c) Flexural strength with various curing age

Obr. 27 Vliv stárnutí betonové směsi M3 na mechanické vlastnosti [39]

⁴ HPMC neboli hydroxypropylmethylcelulóza se používá ve stavebním průmyslu jako přísada ke zlepšení zpracovatelnosti, přilnavosti a zadržování vody. [39]

2.5.2.7 Receptura 7–Xiao a kol.

Cílem výzkumné studie Xiao a kol. byl návrh a zkoumání pěti různých betonových směsí. Určité směsi obsahovali přírodní i recyklované kamenivo s maximální velikostí 0,9 mm. Říční písek byl využit jako přírodní kamenivo s hustotou 2,59 g/cm³. Recyklované kamenivo mělo nižší hustotu a to 2,59 g/cm³ a nasákavost 13,5 %. Dvě směsi obsahovaly taky polyethylenová (PE) vlákna. Polyethylen vyniká v odolnosti vůči korozi, smáčivosti a nárazu. [41]

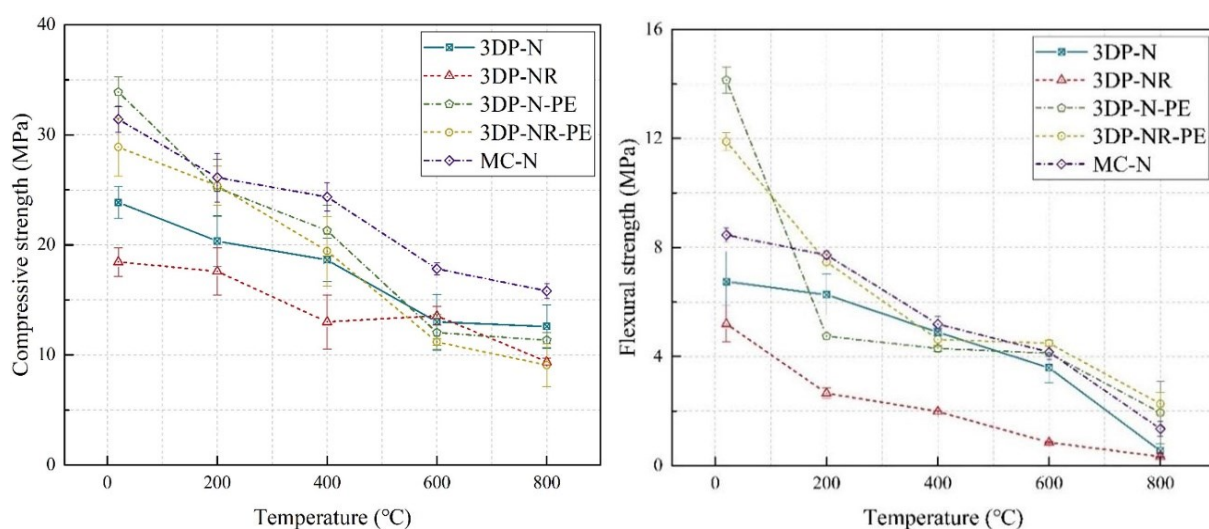
Výzkum se dále zaměřil na změny mechanických vlastností a mikrostruktury tiskové směsi v aplikaci 3D tisku a metody lití do formy při různých teplotách viz *obr. 28*. Výstupem studie bylo zjištění, že pevnost v tlaku i ohybu u 3D tisku byla o 20–25 % nižší než při lití do formy. Zvýšením teploty došlo k poklesu mechanických vlastností u vzorku vyrobeného 3D tiskem i litím do formy. Recyklovaný písek ve směsi způsobil vyšší pórovitost a špatnou adhezi mezi jednotlivými návaznými vrstvami. Aplikace PE vláken naopak dokázala zvýšit mechanické vlastnosti o 1,4–2 krát v porovnání se směsí bez těchto vláken. Při zvýšené teplotě 200 °C již nedocházelo ke zlepšení mechanických vlastností. [41]

Tabulka 10 Fyzikální a mechanické vlastnosti PE vlákna [41]

| Materiál | Průměr [μm] | Délka [mm] | Síla [GPa] | Modul pružnosti [GPa] | Hustota [g/cm] |
|-----------|-------------|------------|------------|-----------------------|----------------|
| PE vlákno | 27 | 12 | 2.50 | 117 | 0.97 |

Tabulka 11 Složení receptury 7-Xiao a kol. [41]

| Materiál | 3DP-N | 3DP-NR | 3DP-N-PE | 3DP-NR-PE | MC-N |
|---|-------|--------|----------|-----------|------|
| Cement [kg/m ³] | 320 | 320 | 320 | 320 | 320 |
| Nanojíl [kg/m ³] | 1,60 | 1,60 | 1,60 | 1,60 | 1,60 |
| Přírodní písek [kg/m ³] | 320 | 160 | 320 | 160 | 320 |
| Recyklovaný písek [kg/m ³] | 0 | 160 | 0 | 160 | 0 |
| PE vlákno [kg/m ³] | 0 | 0 | 3,20 | 3,20 | 0 |
| Superplastifikátor [kg/m ³] | 0,24 | 0,27 | 0,42 | 0,49 | 0,24 |
| HPMC [kg/m ³] | 0,41 | 0,41 | 0,41 | 0,41 | 0,41 |
| Voda [kg/m ³] | 112 | 134 | 112 | 134 | 112 |



Obr. 28 Závislost mechanických vlastností na teplotě, zleva pevnost v tlaku, pevnost v ohybu [41]

2.5.2.8 Receptura 8–Yao a kol.

Studie pod odborným vedením čínského vědce Xiaofei Yao a jeho kolektivem zkoumala vliv vytvrzování pomocí páry a výkonnostní vlastnosti tiskové betonové směsi v různém stádiu stárnutí. Pojivo směsi obsahuje celkem 4 složky (cement, popílek, křemičitý úlet a vysokopecní struska), které v součtu tvoří 100 hmotnostních %. Poměr kameniva vůči pojivu je 13/10, zaručuje tak dobrou vytlačitelnost směsi. Mezi hlavní příměsi tiskové směsi patří PVA vlákna, jež vlastnosti jsou uvedeny v *tabulce 12*, celulóza a činidlo snižující obsah vody. Cílem těchto příměsí je zlepšení tekutosti směsi a retence vody. Složení směsi bylo stanoveno na základě různých výzkumných testů. [42]

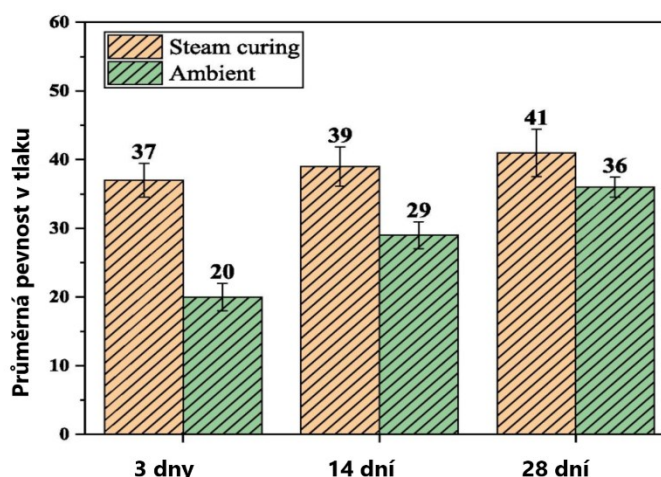
Výstupem studie bylo zjištění ohledně zvýšení počáteční pevnosti betonu pomocí vytvrzování párou. Pára zvyšuje hydratační teplotu směsi na bázi cementu a se zvyšující se teplotou se zrychluje hydratační reakce. Pevnost v tlaku za podmínek vytvrzení párou je ve srovnání s vytvrzováním v konvenčních okolních podmínkách téměř dvojnásobná po bezprostředním ukončení tisku a jeho raném věku viz *obr. 29*. Během stárnutí se pevnosti postupně srovnávají. [42]

Tabulka 12 Fyzikální a mechanické vlastnosti PVA vlákna [42]

| Materiál | Průměr [μm] | Délka [mm] | Pevnost v tahu [MPa] | Modul pružnosti [GPa] | Hustota [kg/m ³] | Prodloužení [%] |
|------------|-------------|------------|----------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------|
| PVA vlákno | 39 | 18 | 1950 | 76,5 | 1,2 | 6 |

Tabulka 13 Složení kontrolní směsi 8 [42]

| Materiál | Mix 1 [hm. %] |
|---------------------|---------------|
| Cement | 56 |
| Popílek | 9 |
| Křemičitý úlet | 15 |
| Vysokopecní struska | 20 |
| PVA vlákno | 0,21 |
| Kamenivo | 130 |
| HPMC | 0,016 |
| Voda | 36 |
| Reduktor vody | 0,23 |



Obr. 29 Kompresa pevnosti v tlaku za podmínek vytvrzování párou a okolních podmínek [42]

2.5.2.9 Receptura 9–Wang a kol.

Stavba tiskové směsi sestává ze základních surovin (pojivo, plnivo a voda). Pojivo zde představuje portlandský cement s označením P.O 42.5. Říční písek s modulem jemnosti 1,6 a maximálním průměrem 2,36 mm se využívá v tiskové směsi jako plnivo. Tisková směs vyžaduje modifikátory reologických vlastností mezi které patří hydroxypropylmethylcelulóza, nano-silika a polykarboxylátové superplastifikátory s obsahem vody 27 %. Mezi jednotlivé vrstvy byly uloženy žebrované ocelové výztužné tyče s označím HRB400 o průměrech 6 mm a 10 mm s minimální mezí kluzu 400 MPa. Pro zvýšení pevnosti spojení ocel/beton byly ocelové výztuže opatřeny nátěrem na bázi cementové malty (složení viz *tabulka 14*). [43]

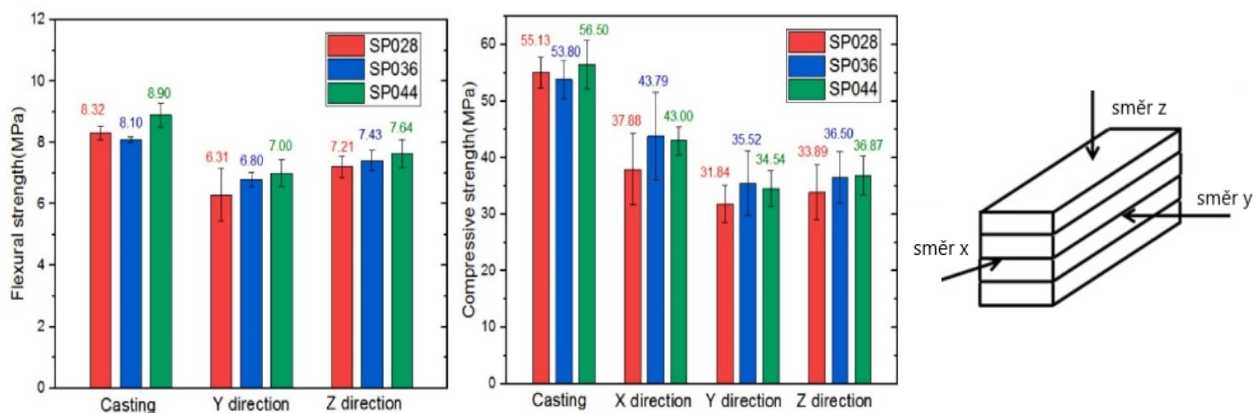
Studie zkoumala tři různé receptury směsi, které se liší různými poměry složek viz *tabulka 15*, za použití dvou různých výrobních technologií (3D tisk a lití betonu do bednění). Pevnost v tahu i ohybu byla v obou případech vyšší u testovaných litých vzorků v porovnání s 3D tištěnými. Pevnosti v tlaku tištěných vzorků SP036 ve směrech X, Y a Z jsou o 15,6 %, 11,6 % a 7,7 % vyšší než u tištěných vzorků SP028. Platí zde nepřímá úměra čím vyšší je mez kluzu a plastická viskozita, tím nižší je mechanická pevnost. Tištěné vzorky vykazují anizotropní mechanické vlastnosti v různých směrech zatěžování. Pevnost v ohybu u všech testovaných vzorků je v ose Y nižší než ve směru Z. Analogicky pevnost v tlaku se schyluje k následující tendenci: směr X > směr Z > směr Y. Hlavním důvodem je zatížení tištěných vzorků prostřednictvím gravitace návazné vrstvy tiskové směsi a také vytlačovací tlaku z tiskové hlavy ve směru X a Z. Ve směru Y je nižší napětí způsobené absencí bednění. [43]

Tabulka 14 Složení nátěru cementové malty [43]

| Cement [g] | Voda [g] | Superplastifikátor [g] | HPMC [g] |
|------------|----------|------------------------|----------|
| 500 | 135 | 0,63 | 0,63 |

Tabulka 15 Složení receptury 9 [43]

| Označení směsi | Písek [g] | Portlandský cement [g] | Voda [g] | Superplastifikátor [g] | HPMC [g] | Nano-silika [g] |
|----------------|-----------|------------------------|----------|------------------------|----------|-----------------|
| SP028 | 750 | 500 | 150 | 1,6 | 0,25 | 5 |
| SP036 | 750 | 500 | 150 | 1,8 | 0,25 | 5 |
| SP044 | 750 | 500 | 150 | 2,2 | 0,25 | 5 |



Obr. 30 Mechanická pevnost (v ohybu a tlaku) různých směsí po 28 dnech stárnutí [43]

2.6 Proces mísení betonové směsi

Je velmi důležité, aby tisková betonová směs byla řádně promíchána. Cílem míchání je zajištění rovnoměrného rozložení všech složek v objemu betonu a dokonalého rovnoměrného pokrytí povrchu kameniva cementovým tmelem. Díky tomu má beton jednotné vlastnosti v celém objemu a je homogenní. Míchání může probíhat buď v jedné fázi, kdy jsou všechny složky přidány do míchačky najednou, nebo v několika fázích, kdy jsou složky postupně přidávány. [35] [36]

2.6.1 Druhy míchacích zařízení

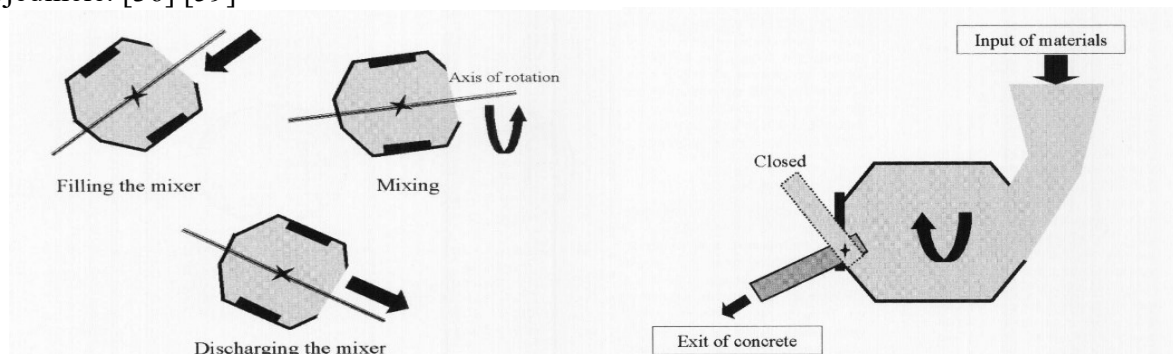
Míchací zařízení určené pro tvorbu čerstvé betonové směsi musí nejen dosáhnout homogenity směsi, ale také zajistit, aby tato homogenita nebyla narušena na výstupu z míchacího zařízení. Právě podle výstupu směsi z míchacího zařízení klasifikujeme několik typů míchaček betonu. [36]

2.6.1.1 Míchačky gravitační

Míchačky gravitační (samospádové) jsou vhodné pro menší množství betonu a míchají přesypáváním. Tyto míchačky se obvykle používají přímo na staveništi a do bubnu se dávkuje nejprve suché složky (kamenivo a cement) a po jejich promíchání se přidávají kapalné složky. Gravitační míchačky rozdělujeme na sklopné a nesklopné. [35]

Ve sklopné míchačce viz *obr. 31 a*) je míchací komora, známá jako buben, která se naklání pro vypouštění směsi. Sklopné míchačky betonu mají typicky kónický nebo mísovitý buben se zabudovanými lopatkami uvnitř, které vynášejí složky do horní polohy, odkud přepadají volným pádem. Jejich účinnost míchání závisí na konstrukčním provedení. Výhodou sklopných míchaček je umožnění snadného výstupu směsi, protože beton může být vysypán rychle a v nesegregované hmotě, bezprostředně po naklonění bubnu. Tento typ míchaček je vhodnější pro směsi s nízkou zpracovatelností a pro směsi obsahující kamenivo velkých rozměrů. [36]

Nesklopná míchačka viz *obr. 31 b*) má osu míchačky vždy vodorovně a vypouštění směsi je dosaženo vložením skluzu do bubnu nebo změnou směru otáčení bubnu popřípadě rozštěpením bubnu. K vnitřním stěnám bubnu jsou připevněny dva typy lopatek. Jedna sada táhne betonovou směs nahoru a ke středu míchačky, když se buben otáčí jedním směrem; druhá sada lopatek tlačí beton směrem k otvoru, když se buben otáčí v opačném směru. Lopatky mají spirálové uspořádání pro dosažení požadovaného účinku pro vypouštění a míchání. Beton může být náchylný k segregaci, díky poměrně pomalému výstupu z bubnu míchačky bez naklápění. Tento problém se obzvláště týká největších kameniv, která mají tendenci zůstat v mísiči. To může vést k tomu, že beton začne vystupovat nejprve jako malta a nakonec se vypouští jako hromada hrubých částic kameniva. V současné době se nesklopné míchačky používají ojedinelé. [36] [59]

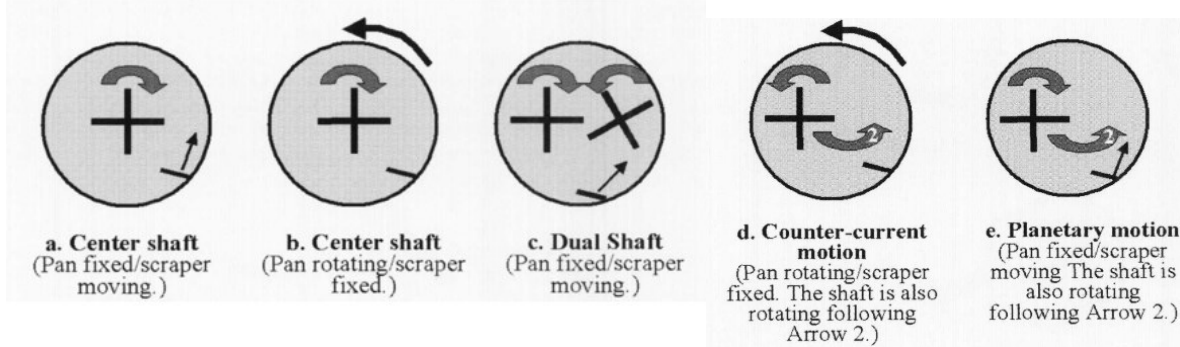


Obr. 31 Princip míchacího zařízení a) sklopné, b) nesklopné [59]

2.6.1.2 Míchačky s nuceným chodem

Míchačky s nuceným mícháním se používají pro výrobu většího množství betonu v betonárnách. Míchání probíhá pomocí rotujících lopatek, namontovaných na jedné nebo více hřídelích, které přehrabávají beton. Existují talířové a žlabové míchačky s nuceným mícháním. Je vhodné vkládat do nich nejprve cement, vodu a jemné frakce kameniva při vyšších rychlostech míchání a po jejich promíchání přidat hrubé kamenivo při nižších otáčkách. Takto zamíchaný beton má vyšší odolnost proti segregaci. [35]

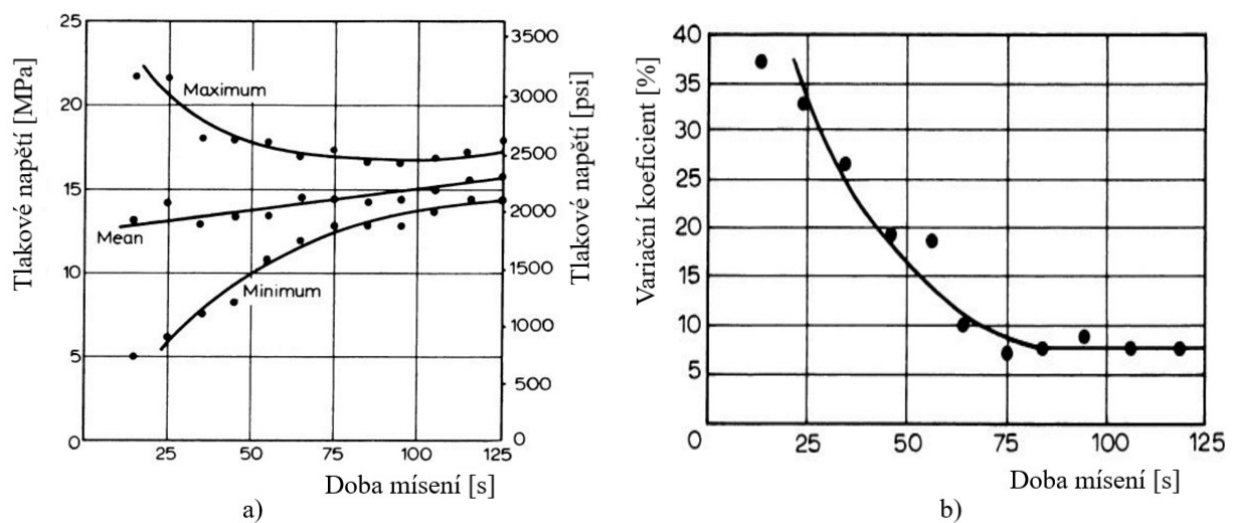
Míchačky talířové nebo jinak známé pánvové jsou obecně stacionární, a proto se používají v betonárně prefabrikátů nebo v malé verzi v betonářské laboratoři. Mixér sestává v podstatě z kruhové pánve otáčející se kolem své osy s jednou nebo dvěma hvězdicemi lopatek otáčejících se kolem svislé osy, která není shodná s osou pánve. Někdy je pánev statická a osa hvězdice se pohybuje po kruhové dráze kolem osy pánve. V obou případech je relativní pohyb mezi lopatkami a betonem stejný a směs v každé části pánve je důkladně promíchán. Stěrky v pánvových míchačkách zabraňují přilnutí malty na stěnách a lopatky lze nastavit tak, aby se na dně míchačky neuchytila vrstva malty. Tyto mixéry jsou vhodné pro hutné a pevné směsi, což je ideální pro výrobu betonových prefabrikátů. Výhodou je, že umožňují pozorování betonové směsi během míchání, což umožňuje úpravy směsi. [36]



Obr. 32 Různá konstrukční provedení talířové míchačky [59]

2.6.2 Doba míchání

Na staveništi je často tendence míchat beton co nejrychleji, a proto je důležité vědět, jaká je minimální doba míchání potřebná k vytvoření homogenní směsi a v důsledku toho k získání uspokojivé pevnosti. Tato doba se liší podle typu mixéru. Hlavním kritériem ideálního promísení je ovšem počet otáček mixéru. Obecně stačí asi 20 otáček. Výrobce daného míchacího zařízení doporučuje optimální rychlost otáčení, pak jsou počet otáček a doba míchání vzájemně závislé parametry. Typická data jsou uvedena na *obr. 33 a)*, na základě zkoušek Shalona a Reinitze variabilita je reprezentována jako rozsah pevností vzorků vyrobených z dané směsi po stanovené době míchání. *obr. 33 b)* ukazuje výsledky stejných testů vynesené jako variační koeficient v závislosti na době míchání. Je zřejmé, že mícháním po dobu kratší než 60 sekund vzniká zřetelně variabilnější beton, ale prodloužení doby míchání nad tuto hodnotu nevede k žádnému významnému zlepšení homogenity směsi. [36]



Obr. 33 Grafické znázornění závislosti doby míchání na a) pevnosti tlaku, b) variačním koeficientu ([36], upraveno)

V případě, kdy se směs mísí po příliš dlouhou dobu dochází k odpařování vody ze směsi, což způsobuje snížení její zpracovatelnosti a zvýšení pevnosti. Avšak rychlost nárůstu pevnosti klesá rychle po první minutě a po dvou minutách už není významná. Někdy byl pozorován i mírný pokles pevnosti. Nicméně v první minutě má doba míchání významný vliv na pevnost betonu. Dalším vedlejším efektem je mletí kameniva, zejména pokud je kamenivo měkké. To má za následek jemnější zrnitost kameniva a nižší zpracovatelnost. Výsledkem je také zvýšení teploty směsi způsobené třením. [36]

2.7 Doprava betonové směsi

Doprava betonové směsi je jedna z klíčových, ale komplikovaných částí 3D tisku. Je nutné brát v potaz potenciální problémy a hrozby spojené s dopravou směsi, mezi které patří nehody způsobené zablokovaním či ucpáním dopravních cest (potrubí a hadice) vlivem segregace částic v hadici/potrubí. Segregaci částic může vyvolat špatně navrhnutá tisková směs nebo nedostatečné promíchání před čerpáním. Metoda 3D tisku je obzvláště citlivá na prostoje respektive technologické pauzy v procesu extruze. Dále může dojít k prasknutí čerpadla nebo potrubí aj. [45] [46]

Dopravu betonové směsi lze klasifikovat do dvou částí: primární a sekundární. Primární doprava zahrnuje dopravu betonu ze vzdálené betonárny na staveniště, zatímco sekundární doprava se týká dopravy betonu po staveništi. [35]

Primární doprava betonové směsi může být provedena několika způsoby, včetně dopravy na ocelových vyklápěcích korbách nákladních automobilů, ve vanových přepravnících, ve vanových domíchávačích či v auto-domíchávačích. Každá z těchto metod má své výhody a omezení, například ocelové vyklápěcí korby jsou vhodné pouze pro velmi tuhé betony, které nejsou náchylné k segregaci a lze je převážet pouze na krátké vzdálenosti po kvalitních cestách. [35]

Sekundární doprava betonové směsi může mít několik podob. Pokud je místo, kde se beton má uložit, níže než výsypka auto-domíchávače lze použít skluzy a roury. Je-li potřeba beton dopravit na delší vzdálenost, lze použít nádoby, které se zvedají pomocí jeřábu nebo výtahu. Jestliže jde o horizontální dopravu tužšího betonu, používají se pásové dopravníky. Podvěsné vozíky viz *obr.34* na jednokolejových drážkách mají omezený výkon a přepravní vzdálenost, ale mohou přepravovat betonovou směs s jakoukoliv konzistencí, nejčastěji ve výrobně prefabrikátů. Nejběžnější způsob sekundární dopravy čerstvé betonové tiskové směsi je pomocí čerpadel a potrubí. [35]

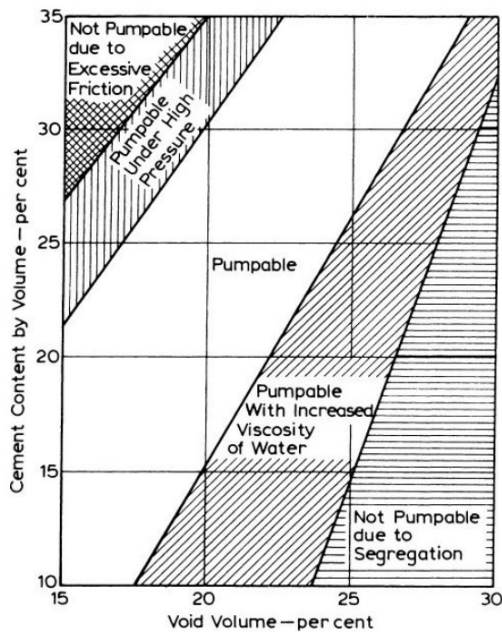


Obr. 34 Sekundární doprava betonové směsi zleva, jeřábem v koši, podvěsnými vozíky [35]

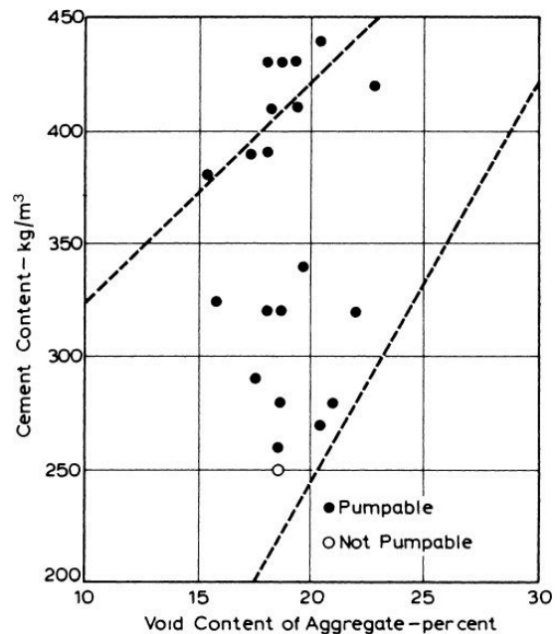
2.7.1 Čerpadla

Je nezbytné aby betonová směs, která má být čerpána, byla velmi dobře promíchána. Některá konstrukční řešení umožňují promíchat směs v násypce pomocí míchadla. Důležitým faktorem pro čerpání je konzistence betonu, která nesmí být příliš suchá nebo mokrá, drsná či lepkavá. Při určování konzistence směsi je nutné brát v potaz, že čerpání může způsobit ztuhnutí betonu. Pokud obsah vody v betonu není správný, hrubé částice mohou vyvíjet tlak na stěny potrubí. Správná nebo kritická hodnota obsahu vody zajišťuje, že se beton bude pohybovat stejnou, kontinuální rychlostí a tření se bude vyvíjet pouze na povrchu trubky v tenké mazací vrstvě o tloušťce 1 až 2,5 mm. [36]

Britské studie dokázali, že obsah cementu (při předpokládané hustotě 2450 kg/m^3) musí být alespoň roven obsahu dutin v kamenivu. Charakteristika vlivu obsahu cementu a pórovitosti na čerpatelnost je znázorněna na *obr.35*. Je nutné se pozastavit nad tím, že teoretické výpočty mohou být nepřesné, protože různorodý tvar agregátů může mít velký vliv na čerpatelnost směsi. Na *obr. 36* jsou prezentována některá experimentální data, která dokazují, že velmi bohatá betonová směs může být úspěšně čerpána i přes horní hranici čerpatelnosti, stanovenou studií. [36]



Obr. 35 Čerpatelnost betonové směsi ve vztahu k obsahu cementu a pórovitosti kameniva [36]



Obr. 36 Překonání hranice čerpatelnosti pomocí příznivého tvaru agregátu [36]

Metoda 3D tisku vyžaduje kontinuální průtok betonové tiskové směsi. Pro tuto aplikaci je vhodné využít objemová čerpadla jako jsou pístová, šneková či peristaltická. [45]

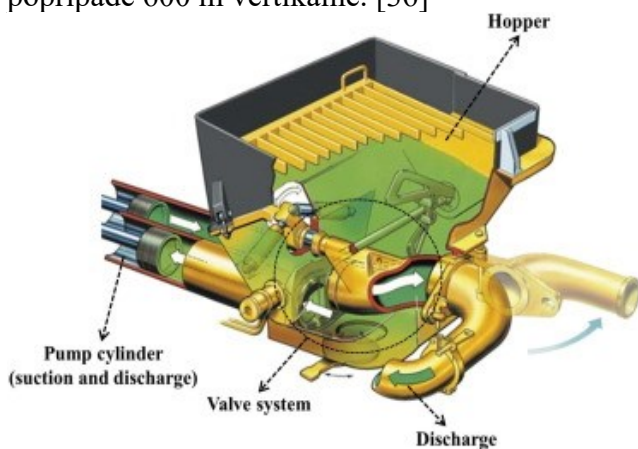
2.7.1.1 Pístová čerpadla

Pístová čerpadla se dělí na jednočinná a dvočinná podle toho, zda čerpají kapalinu jen v jednom směru nebo v obou směrech pohybu pístu. Tato čerpadla se dále kategorizují podle počtu válců, například simplexové má jeden válec, duplexové má dva válce a triplexové má tři válce. [47]

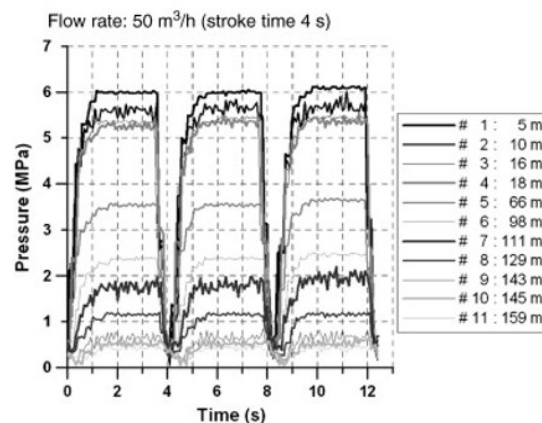
Písty duplexového (dvoupístového) čerpadla jsou připojeny k ventilovému systému a konají synchronní střídavý pohyb. Zatímco jeden píst tlačí směs k výtlačnému ventilu, druhý píst absolvuje sání směsi a plnění komory. Dvoupístová čerpadla jsou upřednostňována pro čerpání betonové směsi. Dnes je obvykle umožněno postupné řízení tlaku a průtoku prostřednictvím systému dálkového ovládání. V závislosti na konstrukčním provedení, pístová čerpadla umožňují čerpání betonové směsi s větší velikostí kameniva (až 16 mm) a zvládají velmi vysoké tlaky. [45] [48]

Nevýhodou je, že při střídání pohybu pístů dochází ke krátkému přerušení dosud kontinuálního proudu betonu a tlakovým špičkám. To lze zpozorovat na *obr. 37*, který zobrazuje měření tlaku pomocí 11 manometrů, které jsou umístěny na zkušebním čerpacím okruhu o celkové délce 170 metrů. První manometr se nachází 5 metrů od začátku čerpací trati a poslední 11 metrů před koncem okruhu. [45] [49]

Použitím pístových čerpadel je možné dopravit beton vodorovně až o 1000 m nebo vertikálně o 120 m, v závislosti na kombinaci vzdálenosti a zdvihu. Nicméně je třeba mít na paměti, že poměr ekvivalentních horizontálních a vertikálních vzdáleností se liší v závislosti na konzistenci směsi a rychlosti betonové směsi v potrubí. Speciální čerpadla pracující při vysokých tlacích jsou schopna čerpat beton dokonce až na vzdálenost 1400 m horizontálně popřípadě 600 m vertikálně. [36]



Obr. 38 Princip dvoupístového čerpadla Putzmeister [48]



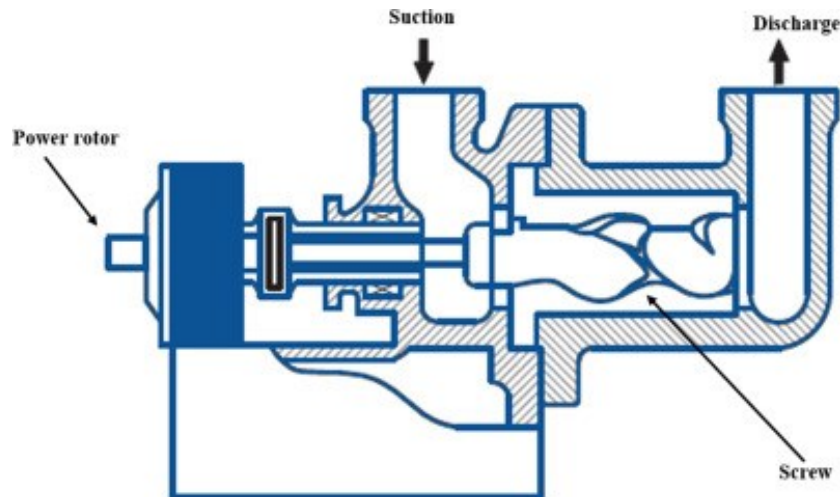
Obr. 37 Průběh tlaku podél čerpacího okruhu čerpadla Putzmeister [49]

2.7.1.2 Šroubová čerpadla

Šroubová jinak známá šneková čerpadla lze klasifikovat na jednošroubová, dvoušroubová či tříšroubová. Pro čerpání betonové směsi se využívají výhradně jednošroubová. Jednošroubové čerpadlo, někdy označované jako progresivní dutinové čerpadlo, se skládá z jednoho šroubu otáčejícího se v elastomeru nebo pryžovém statoru. Tyto čerpadla fungují na principu rotujícího šroubu, který zachycuje dopravovanou látku mezi závity vnitřní stacionární části a závity otočného šroubu a pozitivně posouvá materiál. Tím umožňuje kontinuální průtok směsi s plynule regulovatelným tokem. [47]

Tato čerpadla jsou pomalá, mají obrovskou fyzickou velikost a používají se pro viskózní kapaliny s vysokým obsahem pevných látek. Maximální velikost agregátu však bývá omezena na 4–8 mm, proto se tato čerpadla častěji používají pro malty a velmi jemné betonové směsi.

Zvládnou čerpat také širokou škálu kapalin od kalu přes beton po čistou vodu bez nutnosti výměny součástí. Poskytují konzistentní výstupní tlak s minimální pulzací. Jejich výhodou je, že umožňují nepřetržitý průtok, ale na druhou stranu jsou nákladné, objemné a náročné na údržbu, přičemž náhradní díly jsou také velmi drahé. [45]

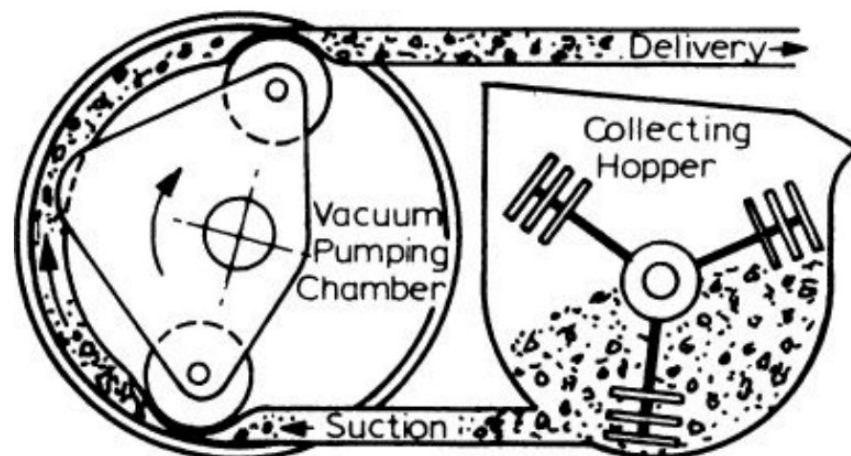


Obr. 39 Princip jednošroubového čerpadla[47]

2.7.1.3 Peristaltická čerpadla

Peristaltická čerpadla známé také jako stlačovací či hadicová čerpadla se používají pro trubky o malém průměru 75 až 100 mm. Betonová směs, který se nachází v sběrné násypce, se pomocí rotujících lopatek přivádí do ohebné trubky nebo hadice, která je umístěna v čerpací komoře pod vakuem. Trubka, s výjimkou stlačení, si drží normální válcový tvar čímž je zajištěn kontinuální průtok směsi. Postupné stlačování trubky dvěma rotujícími válci pumpuje beton v sacím potrubí směrem k výtlačnému potrubí a umožňuje přepravu betonu na vzdálenost až 90 metrů vodorovně nebo 30 metrů vertikálně. [36]

Tato čerpadla neobsahují žádné ventily, hřídele ani ložiska. Pro betonové směsi je aplikace výrazně omezena. Typicky jsou peristaltická čerpadla využívána v potravinářském průmyslu, vědeckých laboratořích, lékařských aplikacích a dalších průmyslových procesech, které vyžadují přesnou distribuci kapalin s nízkou úrovní rizika kontaminace. [47]



Obr. 40 Schéma peristaltického čerpadla [36]

2.7.2 Dopravní potrubí a hadice

Čerpací potrubí obvykle bývá vyrobeno z oceli. Použití hliníkových trubek se nedoporučuje, protože hliník reaguje s alkáliemi v cementu, vytváří vodík a v betonu vznikají dutiny, což způsobuje ztrátu pevnosti. [45]

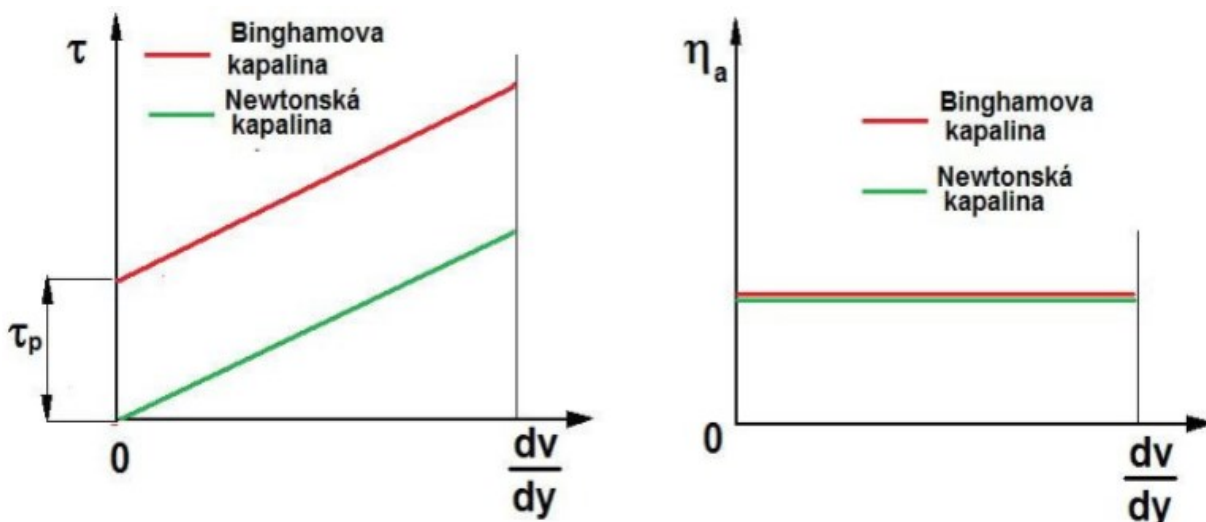
Změny potrubního systému se provádějí rychle. Pro spojení jednotlivých částí potrubí se využívají rychlospojky opatřené těsněním. Směr proudění se reguluje pomocí kolen. Je třeba mít na paměti, že ohyby v potrubí vedou ke ztrátám tlaku a mohou způsobit ucpaní. Pokud jsou ohyby nezbytné, mělo by jich být co nejméně a neměli by být nikdy ostré. Tlakové ztráty jsou pravděpodobně způsobeny dynamickými účinky hrubších částic agregátu, jako je například smykem indukovaná migrace a setrvačné účinky. Bifurkace nebo přidání ventilů a trysek také přispívají k tlakovým ztrátám v potrubí. [35] [45]

Průměr potrubí musí být alespoň trojnásobek maximální velikosti kameniva, aby se zabránilo ucpaní v ohybech. Existuje velká škála různých průměrů potrubí v závislosti na aplikaci a požadovaném průtoku. 3D tisk využívá rozměry průměru potrubí od 80 do 200 mm. Větší průměry mohou být užitečné pro čerpání smykových zahušťovacích materiálů, jako je například samozhutňující beton. Umožňují dosažení srovnatelných průtoků s nižšími rychlostmi proudění a tím i nižšími tlaky. Na konec potrubí je často namontována hadice, která se používá k připojení čerpadla k hlavnímu potrubí nebo pohyblivé tiskové trysce. [35] [45]

2.7.2.1 Proudění betonu v potrubí

Pohyb betonu v potrubí se vyznačuje výraznými odlišnostmi od toku běžných viskózních kapalin, jako jsou voda nebo olej. Při čerpání betonu se v literatuře obvykle pro beton používá reologický model Binghamovy tekutiny respektive Herschel-Bulkleyovy tekutiny. [49]

Binghamova tekutina je plastická tekutina, která má v klidovém stavu třírozměrnou strukturu s tuhostí, schopnou vzdorovat libovolnému napětí menšímu než počáteční smykové napětí τ_p , které se také označuje jako dynamická mez toku. Po dosažení tohoto napětí se struktura rozpadne a tekutina se chová jako newtonovská tekutina. Tento typ tekutin zahrnuje koncentrované kašovitě a zrnité suspenze, průmyslové, odpadní, vrtné a stokové kaly, bahno, řídké kaše, pasty a další látky. Ideální Binghamovy tekutiny se vyznačují lineární závislostí mezi tečným napětím a rychlostním gradientem, kde přímka vychází z bodu na ose tečného napětí určeného napětím na mezi trvalé deformace τ_p viz *obr 41*. [50]



Obr. 41 Závislost smykového napětí a dynamické viskozity na gradientu rychlosti [50]

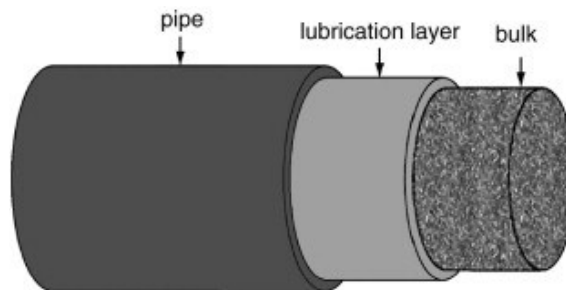
Turbulentní proudění betonové směsi v potrubí je nepravděpodobné, díky vysoké hodnotě dynamické viskozity (10^1 až 10^2 Pa · s). Reynoldsovo podobnostní číslo, které je kritériem pro volbu typu proudění, pro beton je o jeden až dva řády menší než horní hranice Reynoldsova čísla pro laminární režim ($Re = 2000\text{--}2500$). V každé tekutině, která proudí potrubím, se smykové napětí lineárně vyvíjí od nuly ve středu potrubí ke maximální hodnotě na stěně, díky rovnováze sil. Smykové napětí stěny je přímo úměrné tlakové ztrátě na jednotku délky a poloměru potrubí. Tlaková ztráta představuje rozdíl mezi tlaky, který musí být překonán, aby byl materiál přepraven na určitou vzdálenost. [45]

Avšak tyto přístupy téměř vůbec systematicky nedokázaly předpovědět správné průtoky betonu na velkém rozsahu tekutosti, aniž by byla zohledněna existence lubrikační vrstvy na rozhraní mezi betonem a potrubím. [49]

2.7.2.2 Lubrikační vrstva

Mezi sypkým betonem a stěnou potrubí se vytváří lubrikační vrstva viz *obr.42*, která je v literatuře označována také jako mazací nebo prokluzová vrstva. Tato vrstva je klíčová pro usnadnění dopravy betonu a její tloušťka závisí na složení betonu, jako je například poměr vody a cementu (w/c) a obsah přísad redukujících vodu. Tloušťka vrstvy se pohybuje v rozmezí 1–5 mm. Výsledky čerpacích testů potvrdily, že složky tvořící kluznou vrstvu jsou voda, cement a jemný písek menší než 0,25 mm. [48] [51]

Při čerpání betonu dochází k redistribuci částic v potrubí působením smyku. Jedná se o další rozdíl mezi čerpáním běžných látek a betonovou směsí. Tento jev je typický pro suspenze částic, kde se dobře promíchané částice v koncentrovaných tocích přemísťují z oblastí s vysokou smykovou rychlostí do oblastí s nízkou smykovou rychlostí. Po teoretické stránce by nebylo možné čerpat beton bez vytvoření mazací vrstvy. Čerpaná směs musí být schopna si mazací vrstvu vytvořit. [49]



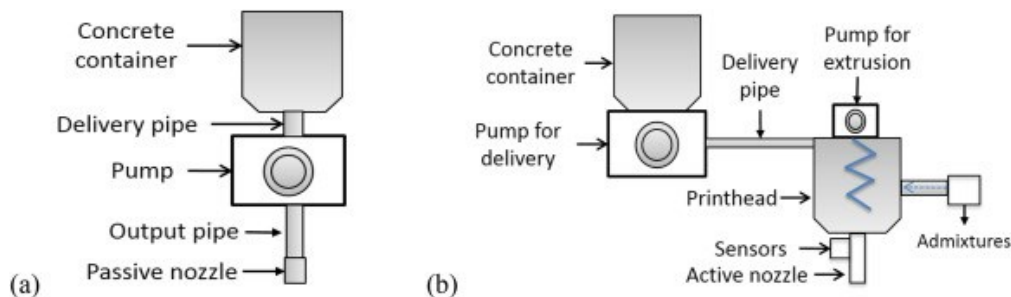
Obr. 42 Schéma proudění betonu v potrubí [49]

2.8 Tiskové hlavy a extrudéry

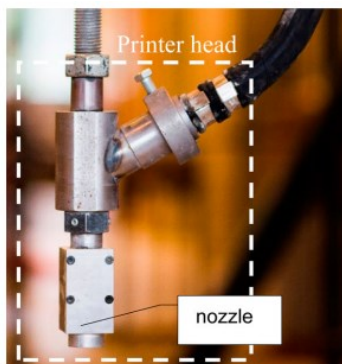
Existují dva různé procesy pro dodávání a vytlačování tiskové směsi podle kterých klasifikujeme tiskové hlavy. [52]

První je sjednocený proces, kdy se v prvním kroku procesu smísí beton s přísadami v betonové nádobě. Dodávání i vytlačování tiskové směsi zastupuje jediné čerpadlo. V tomto případě se využívá tzv. pasivní tisková hlava viz *obr. 43 a*). Pasivní tisková hlava má pouze jedinou funkci, a to zajistit průchod betonové tiskové směsi přes určitý tvarový otvor. Koncovou částí tiskové hlavy je tryska, dutý ocelový prvek s geometrií, ze kterého betonový filament opouští tiskárnu viz *obr. 44* a ukládá se na tiskovou plochu. Je nezbytné aby čerpadlo dodávalo konstantní kontinuální průtok směsi. Uvedený přístup se obvykle používá v laboratořích, kde dopravní vzdálenost není příliš velká a reologie směsi u malých tištěných objektů je tak snadno kontrolovatelná. [52] [54]

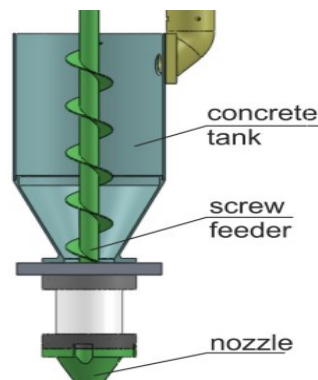
Pro velkoplošné 3D tiskové systémy je riziko diskontinuálního a nestabilního vytlačování betonu vyšší, protože vzdálenost mezi betonovým zásobníkem směsi a tištěným objektem je delší a může dojít k možným změnám reologie betonu a segregaci tiskové směsi během čerpání. V některých 3D tiskových systémech jsou procesy dodávání a vytlačování odděleny viz *obr. 43 b*). Pro distribuci tiskové směsi se využívají dvě čerpadla (dopravní a dávkovací). Dávkovací čerpadlo přivádí betonovou směs do aktivní tiskové hlavy, odkud je následně vytlačován aktivní tryskou. Tryska aktivní tiskové hlavy disponuje sofistikovanými řídicími systémy, které umožňují zlepšení kvality a efektivity tisku. Aktivní tisková hlava umožňuje přidávat příměsi a přísady do tiskové směsi bezprostředně před vytlačováním z trysky. Mezi další implementace řídicích systémů patří měření průtoku či tvarování výsledné vytlačené struktury. U systému, kde jsou procesy dodávky a vytlačování odděleny, není třeba synchronizovat rychlost dodávky betonu pro dálkovou dopravu s rychlostí vytlačování betonu nebo zajistit nutný kontinuální průtok dopravního čerpadla. [52]



Obr. 43 Schéma procesu dodávky a vytlačování technologie 3D tisku betonu a) sjednocený s pasivní tiskovou hlavou, b) oddělený s aktivní tiskovou hlavou [52]



Obr. 44 Pasivní tisková hlava [54]



Obr. 45 Aktivní tisková hlava [52]

2.8.1 Metody nanášení tiskové vrstvy

Extruze betonové směsi neboli 3D tisk prostřednictvím vytlačování betonové směsi je technologie spojující různé procesy, které se liší způsobem, jakým jsou vrstvy materiálu nanášeny. Tisknuté objekty jsou výsledkem progresivního vrstvení, které využívá specifické depoziční strategie. [40]

2.8.1.1 Nekonečné vytlačování cihel

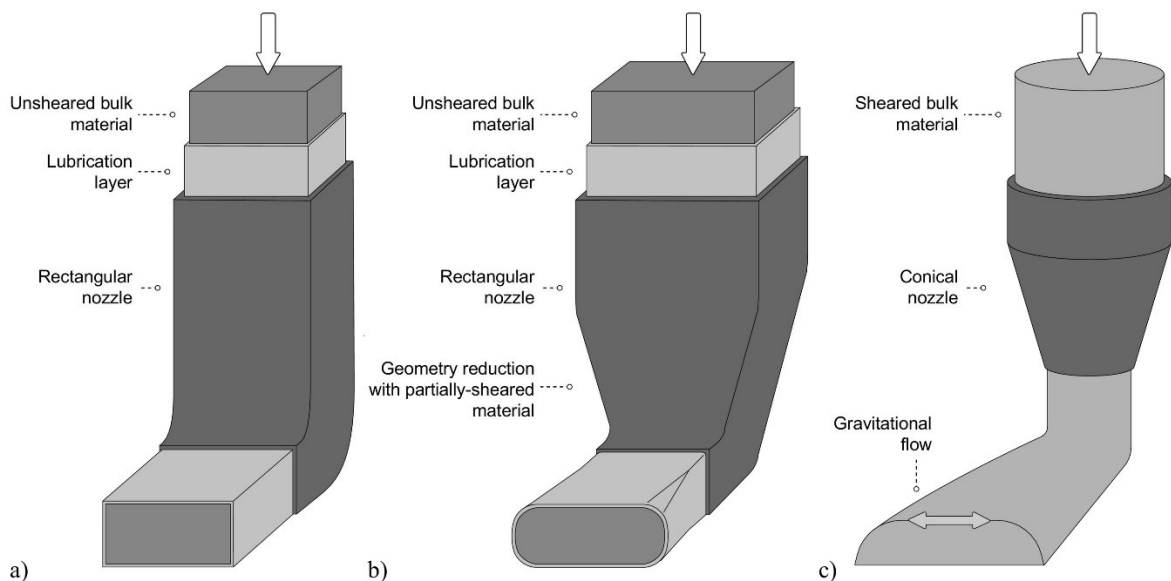
Nekonečné vytlačování cihel je jednou ze čtyř možných strategií nanášení tiskové vrstvy. Tato strategie je plně založena na geometrii trysky, která určuje průřez vrstvy nebo filamentu. Materiál je vytlačován z trysky při dostatečně vysokém napětí, což umožňuje, aby vlákno zůstalo po nanesení nedeformované. Výsledkem je tuhé, kontinuální a téměř nedeformované vlákno, které vychází z trysky viz *obr. 46 a*). [40] [53] [55]

2.8.1.2 Orientované lisování

Druhou strategií pro 3D tisk betonu je orientované lisování. Tvar vlákna na výstupu trysky je určen vzdáleností mezi tryskou a podporou nebo předchozí vrstvou viz *obr. 46 b*), jelikož rychlost vytlačování je vyšší než rychlost pohybu tiskové hlavy. Tato metoda poskytuje lepší geometrickou kontrolu tištěného objektu, ale současně způsobuje dodatečné napětí na předchozí vrstvy, které odpovídá mezi kluzu tištěné směsi. Proto by měla být hodnota meze kluzu na trysce dostatečně nízká. Další faktor, který ovlivňuje mez kluzu na výstupu z trysky, je umístění podpory nebo orientace trysky. [40]

2.8.1.1 Depozice volného toku

Třetí z tiskových strategií je běžnější a zahrnuje proces nanášení směsi, při kterém se materiál deformuje. Tento přístup se nazývá depozice volného toku. Tvar filamentu v tomto případě není závislý na tvaru trysky a vytváří se díky gravitačním silám a mezi kluzu. Filament se rozprostírá na tiskové podpěře nebo na předchozí vrstvě, vytváří strukturu a mez kluzu, dokud nedosáhne finálního tvaru viz *obr. 46 c*). Přechod mezi oběma zmíněnými situacemi závisí na reologii materiálu, průtoku a geometrii trysky. [40] [53] [55]

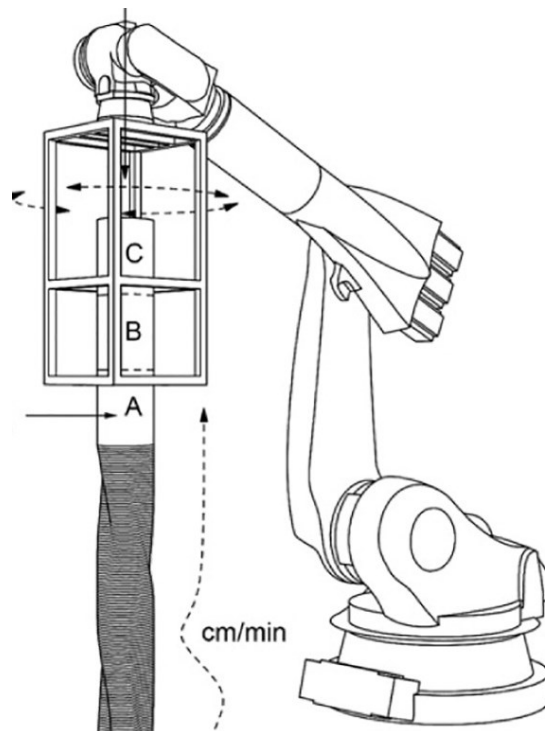


Obr. 46 Vybrané strategie nanášení pro aditivní výrobu založenou na extruzi [55]

2.8.1.2 Formování kluzem

Metoda slipforming neboli formování kluzem je způsob tisku, který nelze použít pouze s cementovou pastou nebo betonovou směsí. V roce 1899 inženýr Charles F. Haglín ve spolupráci s majitelem obilné společnosti Frankem Peaveyem vynalezli proces dynamického lití slipforming. Tento proces je jednostupňový a zahrnuje nepřetržité umísťování betonu do ohraničeného bednění, které se svisle pohybuje s rychlostí závislou na rychlosti hydratace betonu, čímž se zajišťuje, že materiál je při uvolnění bedněním samonosný. Na rozdíl od extruze betonové směsi není beton protlačován bedněním tlakem. Tuto strategii používá také metoda Contour crafting, která je popsána v kapitole 2.2.1.1. [56] [57]

Patentovaný proces, který využívá danou strategii je technologie Smart Dynamic Casting. Tento proces zkombinoval slipforming s digitálními technikami výroby. V rámci procesu je výrazně menší aktivní bednění, které se během plnění zvedá, připevněno k 6osému robotickému ramenu viz *obr. 47*, které nahrazuje tradiční hydraulické zvedáky. Díky tomu lze přesně řídit rychlost a pohyb v prostoru. Robotické řízení je založeno na fyzikálních vlastnostech materiálu, které jsou monitorovány pomocí zpětnovazebního systému. Systém měří kinetiku tuhnutí a tvrdnutí betonu a umožňuje optimalizaci tvarování materiálu v jemné fázi, kdy se mění z měkkého na tvrdý. [56] [57]

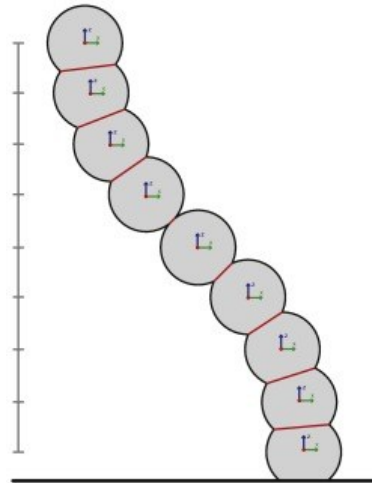


Obr. 47 Ilustrace robotického ramene při metodě Smart Dynamic Casting [57]

2.8.2 Tvarování trysky

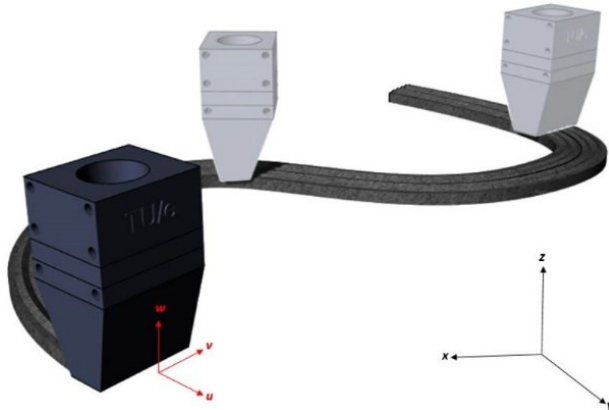
Tryska představuje koncovou část tiskové hlavy a má velký význam při vytlačování betonu, protože ovlivňuje nejen tvorbu vrstev, ale i celkový vzhled během tisku. Existuje několik typů trysek s různými tvary otvorů, jako jsou obdélníkové, čtvercové, kruhové a eliptické. [38]

Kruhové trysky jsou vhodné pro tisk v rohových oblastech nebo při změně úhlu konstrukce, ale mohou mít menší kontaktní plochu mezi extrudovanými vrstvami, což může ovlivnit stabilitu vrstev viz *obr. 48*. [38]



Obr. 48 Schematický řez kolmý na vrstvy kruhového průřezu [46]

Obdélníkové otvory v tryskách vytváří lepší povrchovou úpravu a usnadňují konstrukci než kruhové nebo eliptické otvory, ale vyžadují, aby byl pohyb hlavy tiskárny naprogramován tak, aby tryska vždy zůstávala tečná k dráze nástroje viz *obr. 50*. Pokud tryska netiskne ve správné orientaci, může dojít ke zkroucení vlákna viz *obr. 49*. [38] [54]

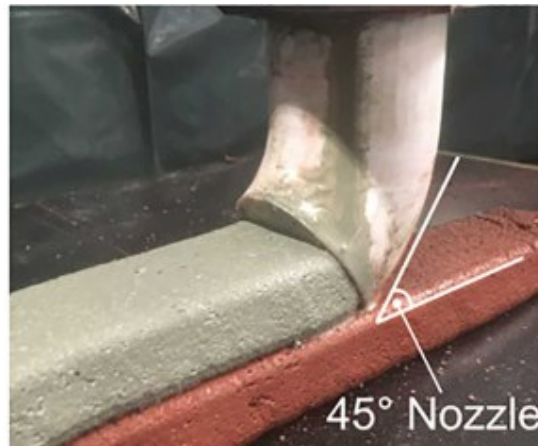


Obr. 50 Zobrazení tečné dráhy trysky s obdélníkovým průřezem [54]



Obr. 49 Zkroucení vlákna obdélníkového průřezu [54]

Nastavení trysky pod úhlem 45° ke stavební plošině viz *obr. 51* přineslo pozitivní výsledky. Tento návrh způsobuje menší vertikální kontakt vazby a tlaku na extrudované vrstvy, a to vedlo ke konzistentnější povrchové struktuře při tisku na extrudovaných vzorcích v porovnání s konvenčními 90° tryskami. [58]



Obr. 51 Nastavení úhlové trysky 45° [58]

Při bližším pohledu na fyzikální vlastnosti tiskových strojů, průměr trysky a tloušťka vrstvy obvykle vypovídají o rychlosti tisku a výsledné kvalitě. Průměr trysky ovlivňuje, kolik materiálu lze vytlačit na rovný povrch při jednom průchodu, zatímco tloušťka vrstvy určuje, jak vysoko lze každou vrstvu postavit vertikálně. Tyto dvě vlastnosti také ovlivňují rychlost tisku a rozlišení tisku. Čím větší je průměr trysky a tloušťka vrstvy, tím méně času zabere dokončení tisku. Rychlost však přichází na úkor rozlišení; čím větší je průměr trysky a tloušťka vrstvy, tím méně detailní a složitý bude hotový návrh. Optimalizace tiskových cest má také potenciál zkrátit dobu tisku až o 30 % a zlepšit efektivitu materiálu propojením začátku jedné tiskové cesty s další, která končí na stejném místě. [23]

3 Systémový rozbor

3.1 Problémová situace

V oblasti 3D tisku betonových dílů se vyskytuje problémová situace způsobená kombinací několika faktorů. Prvním z nich je rozmanitost tiskových zařízení dostupných na trhu. Existuje velké množství různých tiskáren, které se liší svými technickými specifikacemi a schopnostmi.

Dalším faktorem je skutečnost, že každý dodavatel tiskáren má zpravidla vlastní receptury směsí, které je nutné použít při tisku. Tato specifická složení betonových směsí jsou optimalizována pro dané tiskové zařízení a zajišťují požadované vlastnosti výsledného tisknutého objektu. Neexistuje ale univerzální postup pro volbu správných prvků 3D tiskárny (tj. čerpadlo, tryska aj.), které by byly přizpůsobeny různým recepturám betonových směsí.

Tento nedostatek standardizace a harmonizace mezi tiskovými zařízeními a recepturami směsí ztěžuje volbu správných parametrů pro tisk a může vést k nedostatečné kvalitě tisknutých objektů. Není snadné určit, jaký typ tiskárny a jaké prvky budou nejlépe vyhovovat konkrétnímu složení betonové směsi a požadovanému výsledku. To vytváří výzvy pro výrobce a uživatele tiskových zařízení, kteří se musí spoléhat na zkoušky, experimentování a neustálé optimalizace nastavení a parametrů tisku.

3.2 Formulace problému

Problém spočívá v potřebě identifikovat a porozumět souvislostem mezi recepturami nebo složkami betonové směsi, konstrukčními prvky 3D tiskárny a výrobou např. rámu výrobních strojů. Při tisku 3D betonových dílců je důležité nalézt optimální kombinaci těchto faktorů, která povede k dosažení požadovaných vlastností a kvality tisknutých objektů. Je třeba zohlednit specifické požadavky a parametry tisknuté součásti a zvolit odpovídající složení směsi, které tyto požadavky splní.

3.3 Formulace cílů a řešení

Pro tuto bakalářskou práci byly stanoveny následující cíle:

- Přehled současného stavu poznání
- Systémový rozbor zjištěných poznatků
- Porovnání hlavních nalezených parametrů multikriteriální analýzou
- Zhodnocení zjištěných informací na základě systémového rozboru a multikriteriální analýzy
- Vlastní doporučení pro praxi a závěr

3.4 Popis řešené soustavy

Jednotlivé aplikace 3D betonového tisku vyžadují odlišné požadavky. Každá daná aplikace vyžaduje individuální výběr směsi a konstrukčních prvků 3D tiskárny. Specifickou aplikací pro tuto bakalářskou práci byl zvolen 3D tisk betonového rámu stroje. Pod pojmem rám stroje si lze představit například rám hydraulického lisu. Dále pomocí multikriteriální analýzy budou zvoleny vhodné prvky, které budou odpovídat specifickým požadavkům této zvolené aplikace.

3.5 Systém podstatných parametrů

- **Materiálové vlastnosti**

Tento parametr zohledňuje technické vlastnosti samotné betonové směsi, která se používá při 3D tisku. Materiálové vlastnosti tiskové směsi zahrnují trvanlivost, pevnost, zrnitost, reologické vlastnosti aj. Vlastnosti směsi ovlivňují kvalitu tisknutých objektů.

- **Parametry 3D tiskárny**

Parametry tiskárny se zaměřují na technické specifikace tiskového zařízení mezi které zejména patří: průměr trysky, tloušťka vrstvy, rychlost tisku, přesnost, velikost tiskového prostoru a spotřeba energie. Tyto parametry ovlivňují produktivitu, kvalitu a efektivitu tiskového procesu.

- **Náklady**

Tento parametr se týká nákladů spojených s výrobou 3D tisku betonu, včetně nákladů na tiskový materiál, energii, údržbu, vývoj a výrobu/pořízení tiskového stroje. Je důležité zvážit náklady v souvislosti s výkonem a výslednou kvalitou tisku. Nižší náklady mohou vést k ekonomicky efektivnějšímu využití 3D tisku betonu.

- **Estetické vlastnosti**

Dané kritérium se týká vizuálních a estetických vlastností hotového tisku, jako je hladkost povrchu, textura, detaily, barva či jednotnost vzhledu. Estetika vytištěného produktu je individuální podle aplikace. Je důležitá zejména při tisku architektonických nebo designových prvků.

- **Bezpečnost**

Bezpečnost provozu tiskového stroje je velmi důležitý aspekt, který zahrnuje stabilitu a pevnost výsledného vytištěného produktu či schopnost tiskového stroje odolávat vnějším vlivům (např. požár, povodně) atd.

- **Funkčnost**

Hodnocení funkčnosti zahrnuje jednoduchost montáže, výkonnost a účinnost konstrukčních uzlů, přesnost, praktickou použitelnost, rychlost. Vyšší funkčnost přispívá k praktickému využití tisku betonu ve stavebním odvětví a dalších oblastech.

- **Ekologický dopad**

Pohled na ekologii při 3D tisku z betonu zahrnuje faktory jako jsou množství odpadu, emise skleníkových plynů, energetická náročnost výroby a možnosti recyklace. Hodnocení ekologických vlastností pomáhá zohlednit udržitelnost a environmentální dopady 3D tisku betonu.

4 Multikriteriální analýza

Multikriteriální analýza je analytická metoda, která umožňuje hodnotit a porovnávat různé alternativy na základě více kritérií. V dnešní době, kdy je rozhodování často složité a komplexní, multikriteriální analýza poskytuje užitečný rámec pro systematické zhodnocování a rozhodování v různých oblastech, jako je průmysl, obchod, veřejná správa nebo výzkum. [22]

Hlavním cílem multikriteriální analýzy je překonat omezení tradičního jednokriteriálního přístupu, který se soustředí pouze na jedno kritérium a ignoruje ostatní důležité faktory. Multikriteriální analýza umožňuje zahrnout více proměnných, které mají vliv na rozhodování, a přiřadit jim váhu podle jejich důležitosti. Přiřazení vah jednotlivým kritériím umožňuje reflektovat preferenční priority rozhodovacího subjektu. [22]

V průběhu multikriteriální analýzy se využívají různé metody, jako jsou vážené součty, analytické hierarchie, grafické metody nebo rozhodovací stromy (myšlenkové mapy). Tyto metody umožňují kvantifikovat hodnoty kritérií, vyhodnocovat alternativy a identifikovat optimální řešení na základě předem definovaných preferencí a cílů. [22]

4.1 Stanovení váhy kritéria

V této bakalářské práci je využita bodovací metoda. Princip metody spočívá v přiřazení bodů z určené stupnice každému kritériu. Stupnice může mít různé rozsahy, v této bakalářské práci je využita stupnice 1–10. Čím vyšší počet bodů je přiřazen, tím více je dané kritérium preferované. Výhodou bodovací metody je možnost přiřadit stejný počet bodů více kritériím. To umožňuje, aby několik kritérií mělo stejný význam nebo důležitost. Váhy jednotlivých kritérií uvedených v *tabulce 16* se potom stanoví dle vzorového výpočtu.

Vzorový výpočet váhy pro 1. řádek tabulky 16:

$$v_j = \frac{b_j}{\sum_{j=1}^n b_j}$$

$$v_2 = \frac{b_2}{\sum_{j=1}^7 b_j} = \frac{b_2}{b_1 + b_2 + b_3 + b_4 + b_5 + b_6 + b_7}$$

$$v_2 = \frac{9}{8 + 9 + 6 + 3 + 7 + 9 + 5}$$

$$v_2 = 0,1915$$

Kde b_j je počet přiřazených bodů j -tému kritériu, n je počet kritérií a $j = 1, 2, \dots, n$.

Tímto výpočtem se získá relativní váha jednotlivých kritérií, která určuje jejich důležitost ve výsledné analýze. Vyšší váha znamená větší důraz na dané kritérium při hodnocení alternativ. Bodovací metoda je přehledná a snadno použitelná, což usnadňuje rozhodovací proces. Nicméně je důležité mít na paměti, že výběr příslušného rozsahu bodování a správné přiřazení bodů kritériím je klíčové pro dosažení spravedlivého a objektivního hodnocení.

Tabulka 16 Kritéria rozhodování a stanovení jejich vah

| Označení kritéria [j] | Kritérium | Odůvodnění přiřazené váhy | Body [b _j] | Váha [v _j] |
|-----------------------|------------------------|---|------------------------|------------------------|
| 1 | Materiálové vlastnosti | Hodnocení materiálových vlastností pomáhá posoudit, jak kvalitní a vhodný beton je pro danou aplikaci. Například vyšší pevnost může znamenat lepší odolnost hotového produktu. Materiálové vlastnosti tiskové směsi jsou pro tisk rámu stroje klíčovým parametrem v rozhodování, proto byla zvolena vysoká preference kritéria. | 9 | 0,1915 |
| 2 | Parametry 3D tiskárny | Přiřazení vyšší váhy technickým vlastnostem tiskového stroje je opodstatněno tím, že tyto vlastnosti mají přímý vliv na kvalitu, rychlost a přesnost tisku betonu. Vyšší rychlost tisku může zkrátit dobu tisku a tím snížit náklady, zatímco vyšší přesnost může zajistit lepší detaily v hotovém výrobku. | 7 | 0,1489 |
| 3 | Náklady | Zvolení střední váhy nákladům je založeno na ekonomickém hledisku, které nemusí být fundamentálním faktorem při rozhodování. Nízké náklady mohou přispět k ekonomické efektivitě a konkurenceschopnosti procesu 3D tisku betonu | 6 | 0,1277 |
| 4 | Estetické vlastnosti | Stanovení nižší váhy estetickým vlastnostem je opodstatněno tím, že estetické faktory mohou být důležité pro některé aplikace 3D tisku betonu, zejména pokud se jedná o vytváření vizuálně atraktivních produktů. Pochopitelně při tisku rámu stroje nejsou estetické vlastnosti prioritou. | 3 | 0,0638 |
| 5 | Bezpečnost | Vyšší váha, protože bezpečnost je důležitá pro minimalizaci rizik a zachování integrity a spolehlivosti tiskového procesu, ale předpokládá se, že výrobci tiskových strojů a doplňujících prvků (čerpadel, míchaček aj.) splňují bezpečnostní normy. | 8 | 0,1702 |
| 6 | Funkčnost | Přiřazení vysoké váhy funkčnosti je opodstatněno tím, že funkčnost konstrukčních uzlů a celého systému tisku betonu je klíčová pro praktické využití a úspěšné dokončení tisku. | 9 | 0,1915 |
| 7 | Ekologický dopad | Vzhledem k rostoucímu důrazu na udržitelnost je důležité zohlednit ekologický dopad 3D tisku betonu. Ekologické aspekty nemusí být primárními faktory rozhodování, přesto by měly být brány v úvahu a mohou mít dopad na konečné rozhodnutí, avšak s nižší prioritou. | 5 | 0,1064 |
| Celkem | | | 47 | 1 |

4.2 Vyhodnocení konstrukčních uzlů pomocí zvolených kritérií

V této fázi dochází k hodnocení jednotlivých konstrukčních uzlů na základě přiřazených vah hodnotících kritérií. Pro hodnocení je použit pětibodový škálový systém, kde hodnota 1 představuje nejhorší hodnocení a hodnota 5 nejlepší hodnocení.

4.2.1 Stanovení optimální směsi

Je velmi obtížné stanovit optimální složení tiskové směsi dle aplikace, v daném případě tisk rámu stroje. Zde nebude provedena multikriteriální analýza pro všechny zmíněné receptury směsi. Lze připustit, že tisková směs, která bude použita pro 3D tisk rámu by měla vykazovat tyto vlastnosti: vyšší pevnost ve vytvrzeném stavu, vyšší trvanlivost a střední frakci kameniva.

Dle konkrétních požadavků lze doporučit porovnání vhodnosti následujících receptur:

- Receptura 5–Le a kol. (mix 4)
- Receptura 7–Xiao a kol. (3DP-NR-PE)
- Receptura 9–Wang a kol. (SP036)

4.2.1.1 Receptura 5–Le a kol.

Tabulka 17 Zhodnocení vhodnosti Receptury 5–Le a kol. (mix 4)

| Označení kritéria [j] | Kritérium | Váha [v _j] | Známka [L _j] | Odůvodnění přiřazené známky |
|-----------------------|------------------------|------------------------|--------------------------|--|
| 1 | Materiálové vlastnosti | 0,1915 | 5 | Směs dosahuje velmi vysoké pevnosti v tlaku (125 MPa). |
| 2 | Parametry 3D tiskárny | 0,1489 | 3 | Čím menší velikost kameniva tím vyšší rozlišitelnost tisku. Zde je maximální velikost 2 mm. |
| 3 | Náklady | 0,1277 | 1 | Portlandský cement typu I 52,5 obsažený v této směsi je asi 6× dražší než cement typu I 42,5. |
| 4 | Estetické vlastnosti | 0,0638 | 4 | Maximální velikost agregátu (2 mm) by mohla nepatrně zhoršit drsnost povrchu. |
| 5 | Bezpečnost | 0,1702 | 5 | Velmi dobré pevnostní vlastnosti zajišťují vysokou úroveň bezpečnosti. |
| 6 | Funkčnost | 0,1915 | 3 | Malá velikost kameniva způsobí snadnější průchod dopravními cestami a tryskou. Zde je použita střední velikost 2 mm. |
| 7 | Ekologický dopad | 0,1064 | 4 | Směs obsahuje nízký hmotnostní podíl cementu ⁵ (~25 % hm.). |

Vzorový výpočet výsledné známky:

$$Z_{Le} = \frac{\sum_{j=1}^7 v_j \cdot L_j}{\sum_{j=1}^7 v_j}$$

$$Z_{Le} = \frac{0,1915 \cdot 5 + 0,1489 \cdot 3 + 0,1277 \cdot 1 + 0,0638 \cdot 4 + 0,1702 \cdot 5 + 0,1915 \cdot 3 + 0,1064 \cdot 4}{1}$$

$$Z_{Le} = 3,6382$$

⁵ Výroba cementu představuje významný zdroj emisí skleníkových plynů, zejména CO₂. Proces výroby cementu je energeticky náročný a vyžaduje spalování fosilních paliv, což přispívá k uvolňování skleníkových plynů. Dalším problémem je těžba surovin potřebných pro výrobu cementu, zejména vápence a jílu, která může mít negativní dopady na životní prostředí a ekosystémy, včetně narušení krajiny a ztráty biodiverzity. [60]

4.2.1.2 Receptura 7–Xiao a kol.

Tabulka 18 Zhodnocení vhodnosti Receptury 7–Xiao a kol. (3DP-NR-PE)

| Označení kritéria [j] | Kritérium | Váha [v _j] | Známka [X _j] | Odůvodnění přiřazené známky |
|-----------------------|------------------------|------------------------|--------------------------|---|
| 1 | Materiálové vlastnosti | 0,1915 | 2 | Vyšší pórovitost a špatná adheze mezi jednotlivými vrstvami, díky použití recyklovaného písku. PE vlákna zvýšily mechanické vlastnosti (pevnost v tlaku ~28 MPa a pevnost v ohybu ~11 MPa). |
| 2 | Parametry 3D tiskárny | 0,1489 | 5 | Čím menší velikost kameniva tím vyšší rozlišitelnost tisku. Zde je maximální velikost 0,9 mm. |
| 3 | Náklady | 0,1277 | 4 | Obsahuje levnější typ cementu I 42,5, ale navíc obsahuje PE vlákna. |
| 4 | Estetické vlastnosti | 0,0638 | 4 | PE vlákna mohou způsobit mírné zhoršení drsnosti povrchu. Jemný písek naopak přispěje k hladšímu povrchu. |
| 5 | Bezpečnost | 0,1702 | 3 | Dostatečné pevnostní vlastnosti zajišťují vyšší úroveň bezpečnosti vytištěného objektu. |
| 6 | Funkčnost | 0,1915 | 5 | Malá velikost kameniva způsobí snadnější průchod dopravními cestami a tryskou. Dojde též k menšímu opotřebení trysky. |
| 7 | Ekologický dopad | 0,1064 | 2 | Směs obsahuje vysoký hmotnostní podíl cementu (~41 % hm.). Částečná kompenzace na straně ekologie je díky použití recyklovaného písku. |

4.2.1.3 Receptura 9–Wang a kol.

Tabulka 19 Zhodnocení vhodnosti Receptury 9–Wang a kol. (SP036)

| Označení kritéria [j] | Kritérium | Váha [v _j] | Známka [W _j] | Odůvodnění přiřazené známky |
|-----------------------|------------------------|------------------------|--------------------------|---|
| 1 | Materiálové vlastnosti | 0,1915 | 3 | Směs vyztužena ocelovými vlákny vykazuje nejvyšší pevnost v tlaku 44 MPa a pevnost v ohybu 7,5 MPa. |
| 2 | Parametry 3D tiskárny | 0,1489 | 2 | Čím menší velikost kameniva tím vyšší rozlišitelnost tisku. Zde je maximální velikost 2,36 mm. |
| 3 | Náklady | 0,1277 | 4 | Obsahuje levnější typ cementu I 42,5, ale navíc obsahuje ocelová vlákna. |
| 4 | Estetické vlastnosti | 0,0638 | 3 | Ocelová vlákna mohou způsobit mírné zhoršení drsnosti povrchu. Velikost kameniva by mohla nepatrně zhoršit drsnost povrchu. |
| 5 | Bezpečnost | 0,1702 | 3 | Dobré pevnostní vlastnosti zajišťují vyšší úroveň bezpečnosti tištěného objektu. |
| 6 | Funkčnost | 0,1915 | 3 | Malá velikost kameniva způsobí snadnější průchod dopravními cestami a tryskou. Zde je použita střední velikost 2,36 mm. |
| 7 | Ekologický dopad | 0,1064 | 1 | Směs obsahuje vyšší hmotnostní podíl cementu (~35,5 % hm.). Nátěr cementové malty pro obalení ocelových vláken obsahuje další cement. |

4.2.1.4 Vyhodnocení směsi

Na základě multikriteriální analýzy bylo zjištěno, že receptura 5 se jeví jako nejvhodnější volba směsi pro danou aplikaci. Vzápětí za ní se umístila receptura 7 a poslední místo zaujímá receptura 9. Výsledky analýzy jsou přehledně shrnuty v tabulce 20.

Tabulka 20 Stanovení vhodné směsi pro tisk rámu

| Varianta | Značení | Výsledná známka |
|-------------------------|-------------------|-----------------|
| Receptura 5–Le a kol. | Z _{Le} | 3,6382 |
| Receptura 7–Xiao a kol. | Z _{Xiao} | 3,5744 |
| Receptura 9–Wang a kol. | Z _{Wang} | 2,7660 |

4.2.2 Stanovení optimálního míchacího zařízení

Optimální míchací zařízení pro vznik konzistentní betonové tiskové směsi pro tisk rámu stroje by měl splňovat základní faktory. Snadná údržba a čištění jsou jedny z nejdůležitějších faktorů optimálního míchacího zařízení. Mělo by být snadno demontovatelné a přístupné pro čištění a údržbu, což zajistí dlouhou životnost a spolehlivost zařízení. Míchací zařízení by mělo mít přesné ovládání a možnost nastavení různých parametrů, jako je rychlost či čas míchání. Optimální míchací zařízení by mělo zajišťovat homogenní směs betonu bez přítomnosti hrudek, nečistot nebo nerovnoměrného rozložení materiálů.

Existuje několik typů míchacích zařízení pro betonové směsi. Budou porovnány následující druhy míchacích zařízení:

- Gravitační míchačky
- Míchačky s nuceným chodem

4.2.2.1 Gravitační míchačky

Tabulka 21 Zhodnocení vhodnosti gravitační míchačky

| Označení kritéria [j] | Kritérium | Váha [v _j] | Známka [G _j] | Odůvodnění přiřazené známky |
|-----------------------|------------------------|------------------------|--------------------------|---|
| 1 | Materiálové vlastnosti | 0,1915 | 4 | Vhodné pro směsi s nízkou zpracovatelností a směsi obsahující kamenivo větších rozměrů. |
| 2 | Parametry 3D tiskárny | 0,1489 | 5 | Jednoduchá konstrukce a provoz. |
| 3 | Náklady | 0,1277 | 5 | Nižší pořizovací náklady a nižší spotřeba energie. |
| 4 | Estetické vlastnosti | 0,0638 | 3 | Nižší rovnoměrnost míchání může lehce poznamenat estetické vlastnosti tištěného objektu. |
| 5 | Bezpečnost | 0,1702 | 4 | Nižší riziko mechanických poruch, nemají pohyblivé části, jako jsou míchací lopatky nebo míchací hřídele a to snižuje riziko úrazu. |
| 6 | Funkčnost | 0,1915 | 3 | Vhodné pro menší množství betonu, snadný a rychlý výstup směsi z míchačky, snadná údržba a čištění, nižší míchací efektivita |
| 7 | Ekologický dopad | 0,1064 | 3 | Nižší energetická náročnost. Možné plýtvání betonové směsi. |

4.2.2.2 Míchačky s nuceným chodem

Tabulka 22 Zhodnocení vhodnosti míchačky s nuceným chodem

| Označení kritéria [j] | Kritérium | Váha [v _j] | Známka [N _j] | Odůvodnění přiřazené známky |
|-----------------------|------------------------|------------------------|--------------------------|--|
| 1 | Materiálové vlastnosti | 0,1915 | 5 | Lepší homogenizace směsi, schopnost pracovat s různými typy betonových směsí a dosáhnout konzistence podle požadavků |
| 2 | Parametry 3D tiskárny | 0,1489 | 3 | Složitější konstrukce a nutná častější údržba. |
| 3 | Náklady | 0,1277 | 3 | Vyšší pořizovací náklady a spotřeba energie. |
| 4 | Estetické vlastnosti | 0,0638 | 5 | Rovnoměrné míchání může přispět k vyšší konzistenci směsi, což může mít pozitivní vliv na estetické vlastnosti tisknutého objektu |
| 5 | Bezpečnost | 0,1702 | 3 | Potenciální riziko rotujících částí může představovat nebezpečí pro obsluhu. Často ale obsahují bezpečnostní prvky a ochranné kryty. |
| 6 | Funkčnost | 0,1915 | 5 | Vhodné pro větší množství betonu, vysoká odolnost vůči segregaci, možnost přizpůsobit rychlost a intenzitu míchání |
| 7 | Ekologický dopad | 0,1064 | 4 | Stěrky zabraňují přilnutí směsi na dno míchačky a tím se zamezí zbytečnému plýtvání. Vyšší energetická spotřeba. |

4.2.2.3 Vyhodnocení míchacího zařízení

Na základě multikriteriální analýzy bylo zjištěno, že míchačka s nuceným chodem se jeví jako nejvhodnější volba míchacího zařízení pro danou aplikaci. Gravitační míchačka obdržela výslednou známku těsně za míchačkou s nuceným chodem. Výsledky analýzy jsou přehledně shrnuty v *tabulce 23*.

Tabulka 23 Stanovení vhodného míchacího zařízení pro tisk rámu

| Varianta | Značení | Výsledná známka |
|---------------------------|-------------------------|-----------------|
| Gravitační míchačka | Z _{Gravitační} | 3,9149 |
| Míchačka s nuceným chodem | Z _{Nucený} | 4,0000 |

4.2.3 Stanovení optimálního čerpadla

Pro vytvoření přesného a stabilního rámu je důležité, aby čerpadlo poskytovalo přesné a opakovatelné dávkování betonové směsi.

Pro tuto aplikaci budou srovnány tyto tři druhy čerpadel:

- Pístové
- Šroubové
- Peristaltické

4.2.3.1 Pístové čerpadlo

Tabulka 24 Zhodnocení vhodnosti pístového čerpadla

| Označení kritéria [j] | Kritérium | Váha [v _j] | Známka [P _j] | Odůvodnění přiřazené známky |
|-----------------------|------------------------|------------------------|--------------------------|---|
| 1 | Materiálové vlastnosti | 0,1915 | 5 | Mají velmi vysokou hranici maximální velikosti kameniva (až 16 mm) |
| 2 | Parametry 3D tiskárny | 0,1489 | 4 | Pracují s vysokým tlakem (25–40 MPa). |
| 3 | Náklady | 0,1277 | 2 | Vyšší náklady na údržbu kvůli velkým pohyblivým částem a pulzujícímu proudění, vysoké náklady na zařízení. |
| 4 | Estetické vlastnosti | 0,0638 | 5 | Poskytují vyšší konzistenci a homogenitu betonové směsi. To může přispět k rovnoměrnějšímu a hladšímu povrchu objektu. Často umožňují řízenou regulaci určitých parametrů (tlak, rychlost dávkování), lze tak přizpůsobit tiskové parametry pro dosažení požadovaných estetických vlastností. |
| 5 | Bezpečnost | 0,1702 | 4 | Pístová čerpadla mají často otevřenou konstrukci, která umožňuje přístup ke strojním částem, včetně pístů a válců. Je důležité zajistit, aby byly tyto části dobře chráněny a aby byl přístup omezen pouze pro opravy a údržbu. Často obsahují bezpečnostní prvky, jako jsou nouzové zastavení, ochranné kryty a pojistné prvky |
| 6 | Funkčnost | 0,1915 | 5 | Lze regulovat průtok čerpané směsi, menší hlučnost provozu, vyšší životnost, možnost sériové kombinace více čerpadel v tandemu. |
| 7 | Ekologický dopad | 0,1064 | 3 | Vyšší spotřeba energie znamená větší zátěž na energetické zdroje a může přispívat ke zvýšeným emisím skleníkových plynů, pokud je energie získávána z fosilních paliv. Při provozu pístových čerpadel mohou vznikat emise ve formě výfukových plynů, hluku a vibrací. |

4.2.3.2 Šroubové čerpadlo

Tabulka 25 Zhodnocení vhodnosti šroubového čerpadla

| Označení kritéria [j] | Kritérium | Váha [v _j] | Známka [S _j] | Odůvodnění přiřazené známky |
|-----------------------|------------------------|------------------------|--------------------------|--|
| 1 | Materiálové vlastnosti | 0,1915 | 4 | Mají vysokou hranici maximální velikosti kameniva (4–8 mm). |
| 2 | Parametry 3D tiskárny | 0,1489 | 4 | Pracují s vyšším tlakem (až 25 MPa) a vyššími otáčky (až 3000 min ⁻¹). |
| 3 | Náklady | 0,1277 | 3 | Vyšší pořizovací cena a také náhradní díly jsou dražší. Vyšší spotřeba energie při jejich provozu, ale nižší náklady na údržbu. |
| 4 | Estetické vlastnosti | 0,0638 | 4 | Mohou poskytovat hladší a konzistentnější proud betonové směsi. To může přispět k lepšímu zachování jemných detailů a textur vytisknutého objektu. Lze dosáhnout vyšší homogenity a konzistence směsi což může ovlivnit celkový vzhled tištěného rámu stroje. |
| 5 | Bezpečnost | 0,1702 | 4 | Vysoká bezpečnost, díky robustní konstrukci a ochranným opatřením, které minimalizují riziko úrazu nebo poškození. Jsou často vybavena různými bezpečnostními prvky, které zajišťují správný a bezpečný provoz (nouzové vypínače, pojišťovací prvky, krytování a systémy detekce poruch). Obvykle uzavřený mechanismus, který minimalizuje riziko úrazu při manipulaci. Přístupy k rotačním částem jsou často chráněny a zabezpečeny, aby se zabránilo nechtěným zraněním. |
| 6 | Funkčnost | 0,1915 | 5 | Rovnoměrné dodávání množství směsi, tichý a bez pulsační provoz, náročná údržba, objemné. |
| 7 | Ekologický dopad | 0,1064 | 4 | Mechanismus šroubového čerpadla a pevné vnitřní komory pomáhají zabránit úniku média do životního prostředí. Mohou vyžadovat určité konstrukční materiály, které mohou mít svůj ekologický dopad |

4.2.3.3 Peristaltické čerpadlo

Tabulka 26 Zhodnocení vhodnosti peristaltického čerpadla

| Označení kritéria [j] | Kritérium | Váha [v _j] | Známka [H _j] | Odůvodnění přiřazené známky |
|-----------------------|------------------------|------------------------|--------------------------|---|
| 1 | Materiálové vlastnosti | 0,1915 | 1 | Je vhodné pouze pro čerpání směsi s jemným zrnitým kamenivem. Schopnost manipulovat s různorodou viskozitou směsi. |
| 2 | Parametry 3D tiskárny | 0,1489 | 2 | Pracují s nízkým tlakem a nízkými otáčky (30–200 min ⁻¹). |
| 3 | Náklady | 0,1277 | 5 | Nižší pořizovací cena, díky své jednoduché konstrukci a nižší náklady na náhradní díly. Nižší spotřeba energie. |
| 4 | Estetické vlastnosti | 0,0638 | 4 | Schopnost poskytnout přesné dávkování betonové směsi, což může přispět k vysoké přesnosti a detailům tisku. |
| 5 | Bezpečnost | 0,1702 | 5 | Díky mechanismu stlačování hadice se minimalizuje riziko úniku, což zajišťuje bezpečnou manipulaci s betonem při 3D tisku. Nemají rotační části, které by mohly představovat riziko pro obsluhu. |
| 6 | Funkčnost | 0,1915 | 4 | Samonasávací schopnost, velmi tichý chod a bez rázů, životnost čerpadla je dána životností hadice. |
| 7 | Ekologický dopad | 0,1064 | 5 | Nepoužívají žádné chemikálie nebo maziva při svém provozu. Obvykle mají energeticky účinný design, který minimalizuje spotřebu energie při provozu. Přesná dávka betonu přispívá k minimalizaci odpadu a zajišťuje efektivní využití materiálu, dochází k menšímu znečištění prostředí v důsledku zabránění úniků nebo přebytku rozlitého betonu. |

4.2.3.4 Vyhodnocení čerpadla

Na základě multikriteriální analýzy bylo zjištěno, že pístové čerpadlo se jeví jako nejvhodnější volba pro danou aplikaci. Těsně za pístovým čerpadlem se umístilo šroubové čerpadlo a nakonec peristaltické čerpadlo. Výsledky analýzy jsou přehledně shrnuty v *tabulce 27*.

Tabulka 27 Stanovení vhodného čerpadla pro tisk rámu

| Varianta | Značení | Výsledná známka |
|------------------------|---------------------|-----------------|
| Pístové čerpadlo | $Z_{\text{píst}}$ | 4,0850 |
| Šroubové čerpadlo | $Z_{\text{šroub}}$ | 4,0638 |
| Peristaltické čerpadlo | Z_{hadice} | 3,5320 |

4.2.4 Stanovení optimální tiskové hlavy

Při tisku betonové směsi je klíčové stanovit optimální tiskovou hlavu, která zajistí přesný a stabilní výkon. Volba správné tiskové hlavy je zásadní pro dosažení kvalitních tiskových výsledků a optimálního průběhu celého tiskového procesu

Budou porovnány následující druhy tiskových hlav:

- Pasivní tisková hlava
- Aktivní tisková hlava

4.2.4.1 Pasivní tisková hlava

Tabulka 28 Zhodnocení vhodnosti pasivní tiskové hlavy

| Označení kritéria [j] | Kritérium | Váha [v _j] | Známka [P _j] | Odůvodnění přiřazené známky |
|-----------------------|------------------------|------------------------|--------------------------|---|
| 1 | Materiálové vlastnosti | 0,1915 | 3 | Omezená materiálová kompatibilita. Mají obvykle omezenou schopnost pracovat s různými materiály kvůli jejich jednoduché konstrukci a omezeným možnostem řízení průtoku materiálu. Vhodné pro tisk jednoduchých betonových směsí s konzistentními materiálovými vlastnostmi. |
| 2 | Parametry 3D tiskárny | 0,1489 | 3 | Mají obvykle pevnou trysku a omezenou možnost regulace průtoku materiálu. |
| 3 | Náklady | 0,1277 | 5 | Nižší pořizovací náklady, díky jednodušší konstrukci. Nižší náklady na údržbu spojené s absencí elektronických prvků či mechanismů. |
| 4 | Estetické vlastnosti | 0,0638 | 3 | Nemá možnost přesného řízení průtoku a tlaku tiskové směsi, může tak omezovat přesnost a detaily v tisku. I přes jednodušší konstrukci mohou produkovat uspokojivé výsledky s ohledem na estetiku, zejména u jednodušších geometrických tvarů. |
| 5 | Bezpečnost | 0,1702 | 5 | Vysoká bezpečnost. Obecně nemají pohyblivé části ani elektronické prvky, které by představovaly přímé riziko pro uživatele. |
| 6 | Funkčnost | 0,1915 | 3 | Vhodné pro jednodušší tisky s nižšími nároky na přesnost a kontrolu. |
| 7 | Ekologický dopad | 0,1064 | 4 | Obvykle nepotřebují elektrický pohon, což znamená nižší spotřebu energie během tiskového procesu. Jednoduchost konstrukce tiskové hlavy minimalizuje množství odpadu při výrobě a údržbě tiskového zařízení. |

4.2.4.2 Aktivní tisková hlava

Tabulka 29 Zhodnocení vhodnosti aktivní tiskové hlavy

| Označení kritéria [j] | Kritérium | Váha [v _j] | Známka [A _j] | Odůvodnění přiřazené známky |
|-----------------------|------------------------|------------------------|--------------------------|--|
| 1 | Materiálové vlastnosti | 0,1915 | 5 | Materiálová flexibilita. Často umožňují použití různých materiálů s různými viskozitami a vlastnostmi. |
| 2 | Parametry 3D tiskárny | 0,1489 | 4 | Mají obvykle vyměnitelné trysky a používají různé řídicí systémy a čidla. |
| 3 | Náklady | 0,1277 | 2 | Vyšší pořizovací cena, díky složitější konstrukci a hojnému příslušenství. |
| 4 | Estetické vlastnosti | 0,0638 | 5 | Směs může být znovu promísena a tím se zaručí, těsně před vytlačáním, správná konzistence směsi, která mohla být narušena v průběhu dopravní cesty. Dosahuje se vyšší přesnosti a úrovně detailů tištěného objektu, díky možnosti přesného řízení průtoku. |
| 5 | Bezpečnost | 0,1702 | 4 | Aktivní tiskové hlavy, které využívají elektroniku, vyžadují dodatečné opatření k zajištění elektrické bezpečnosti. To zahrnuje správnou izolaci a ochranu elektrických komponent, aby se minimalizovalo riziko úrazu elektrickým proudem pro uživatele. |
| 6 | Funkčnost | 0,1915 | 5 | Mohou být vybaveny systémy pro přesné řízení tlaku a průtoku materiálu, což umožňuje optimalizaci tisku pro konkrétní materiálové vlastnosti. Vhodnější pro složitější tisky. |
| 7 | Ekologický dopad | 0,1064 | 3 | Vyšší spotřeba energie, větší materiálový odpad spojený se složitou konstrukcí tiskové hlavy. Mohou poskytovat větší přesnost a kontrolu nad tiskem, což může vést k menšímu množství chyb a odpadu při tisku objektů |

4.2.4.3 Vyhodnocení tiskové hlavy

Na základě multikriteriální analýzy bylo zjištěno, že aktivní tisková hlava se jeví jako nejvhodnější volba druhu tiskových hlav pro danou aplikaci. Na druhou stranu, pasivní tisková hlava může být vhodná pro jednodušší tisky s nižšími nároky na přesnost a kontrolu, a zároveň může nabízet jednodušší a ekonomičtější řešení. Výsledky analýzy jsou přehledně shrnuty v tabulce 30.

Tabulka 30 Stanovení vhodného pro tisk rámu

| Varianta | Značení | Výsledná známka |
|-----------------------|----------------------|-----------------|
| Pasivní tisková hlava | Z _{Pasivní} | 3,7022 |
| Aktivní tisková hlava | Z _{Aktivní} | 4,0850 |

5 DISKUSE

Téma 3D tisku z betonu a jeho konstrukčních uzlů přináší do stavebnictví a architektury značný potenciál inovace a technologického pokroku. V rámci této práce bylo provedeno rozsáhlé studium a analýza, které umožnily zhodnotit vlastnosti a parametry konstrukčních uzlů pro 3D tisk z betonu. Diskuze k tomuto tématu je zaměřena na klíčové aspekty a důsledky, které vyplývají z této technologie.

V průběhu bádání bylo zjištěno, že 3D tisk z betonu přináší mnoho výhod, včetně zvýšené efektivity, přesnosti a rychlosti výroby. Tato technologie umožňuje vytvářet složité geometrické struktury a architektonické prvky, které byly dříve obtížné, ba dokonce nemožné realizovat tradičními metodami. To otevírá nové možnosti pro design a tvorbu unikátních a inovativních stavebních projektů.

Tato technologie umožňuje minimalizovat odpad a spotřebu materiálů, což přispívá ke snížení negativního dopadu na životní prostředí. Aditivní technologie myslí také na recyklaci nevyužitého materiálu. Některé receptury směsí obsahují právě recyklované kamenivo. Zároveň je třeba brát v úvahu energetickou náročnost samotného tiskového procesu a hledat způsoby, jak optimalizovat spotřebu energie a zdrojů.

Řešením problematické situace, kdy bylo zjištěno, že neexistuje univerzální postup pro volbu hlavních prvků, které by byly přizpůsobeny různým recepturám betonových směsí a jejich různorodou aplikací, bylo provedení multikriteriální analýzy.

Cílem multikriteriální analýzy bylo identifikovat a vybrat nejvhodnější prvky, které by umožnily úspěšný a kvalitní 3D tisk betonového rámu stroje. V rámci analýzy byla vybrána vhodná čerpadlová jednotka s pístovým mechanismem. Tento typ čerpadla je schopný pracovat s vysokou viskozitou betonových směsí a poskytuje dostatečný tlak pro správné vytlačování materiálu. Bylo zjištěno, že šroubové čerpadlo je také skvělou volbou pro tuto aplikaci a jeho použitím by se rovněž dosáhlo kvalitních výsledků. Tyto čerpadlové jednotky získaly v analýze velmi pozitivní hodnocení a lze je považovat za spolehlivé a efektivní prvky pro proces 3D tisku z betonu. Dále byla vybrána míchačka s nuceným chodem, která zajišťuje důkladné promíchání betonové směsi a rovnoměrné rozložení přísad. Aktivní tisková hlava byla také zařazena mezi vybrané konstrukční uzly, umožňuje přesné a kontrolované vytlačování betonové směsi při tvorbě vrstev. Z druhého pohledu lze konstatovat, že pasivní tisková hlava je vhodná pro méně náročné tisky, které nevyžadují vysokou přesnost a kontrolu. Současně poskytuje jednodušší a ekonomičtější alternativu.

Extruze betonové směsi je vhodná pro tvarově jednodušší rámy strojů, kde není potřeba složitých geometrických prvků nebo speciálního designu. Tato metoda umožňuje přesné a opakované vytlačování betonové směsi, což je výhodné pro výrobu právě jednodušších konstrukčních prvků.

Na druhou stranu, pokud by bylo požadováno, aby betonový rám stroje obsahoval speciální design např. s integrovaným lineárním vedením nebo jinými složitými tvarovými prvky, byla by vhodnější volba metody s práškovým ložem. Tato metoda umožňuje tisk složitých geometrických objektů s vysokou přesností a úrovní detailů. Práškové lože poskytuje flexibilitu v tvorbě různých tvarů a umožňuje dosažení požadovaného vzhledu a funkčnosti konstrukce.

Volba metody tisku by měla být provedena na základě konkrétních požadavků na tvarové vlastnosti a design rámu stroje. Extruze betonové směsi je vhodná pro méně náročné tvarové struktury, zatímco metoda s práškovým ložem je vhodnější pro složitější a designově výrazné prvky. Tímto způsobem lze zvolit optimální metodu, která odpovídá požadavkům dané aplikace výroby rámu stroje.

6 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo provést důkladnou rešerši a zhodnotit vlastnosti a parametry konstrukčních uzlů pro tisk betonu při různých metodách tisku. Na základě zjištěných informací byly popsány jednotlivé uzly, které se používají při přípravě betonové směsi a vytlačování materiálu z tiskové trysky. Multikriteriální analýza byla použita k vyhodnocení vhodnosti jednotlivých konstrukčních uzlů a vybrání vhodných prvků pro tisk rámu výrobního stroje.

V této bakalářské práci byla provedena rešerše a popis konstrukčních uzlů pro 3D tisk z betonu. Byly popsány jednotlivé metody 3D tisku betonu a představeny některé komerční typy tiskových zařízení. Dále byly vysvětleny rozdíly mezi betonem a tiskovou směsí a proveden podrobný popis jednotlivých procesů výroby, jako je míchání, čerpání a vytlačování.

Hlavním výstupem práce byla multikriteriální analýza, která poskytla zhodnocení vhodnosti konstrukčních uzlů pro tisk betonových struktur. Na základě této analýzy byly vybrány vhodné prvky, jako je pístové čerpadlo, míchačka s nuceným chodem a aktivní tisková hlava, pro tisk rámu výrobního stroje.

Závěrečná práce dosáhla svého cíle, který spočíval v důkladné rešerši a popisu konstrukčních uzlů pro 3D tisk z betonu. Byly provedeny vícekritériální analýzy a zhodnocení vhodných prvků pro tisk betonových struktur. Tím byla poskytnuta ucelená přehledová studie, která přispívá k lepšímu porozumění a aplikaci 3D tisku z betonu. Zároveň byla identifikována a zdůrazněna důležitost volby správných konstrukčních uzlů pro dosažení kvalitního a efektivního tisku betonu.

Výsledky práce nabízejí potenciál pro využití 3D tisku z betonu v různých oblastech, jako je architektura, stavebnictví a další průmyslové odvětví. Možnosti minimalizace odpadu a spotřeby materiálů přinášejí ekologické výhody a zlepšení udržitelnosti v těchto oblastech. Práce tedy přispívá k rozvoji a aplikaci moderních technologií ve stavebnictví.

Dalším směrem pro navazující výzkum a vývoj by mohlo být studium optimalizace procesů tisku, včetně zlepšení energetické efektivity a zkoumání nových materiálů pro 3D tisk z betonu. Tyto oblasti mohou přinést další pokrok a inovace v oblasti 3D tisku betonu a rozšířit jeho využití v průmyslovém a stavebním sektoru.

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] KOVÁŘÍK, Michal, Pavel SVOBODA a Petr ŠTEMBERK. PŘEHLED DOSTUPNÝCH TECHNOLOGIÍ 3D TISKU Z CEMENTOVÝCH MALT. *BETON* [online]. Katedra technologie staveb Fakulta stavební ČVUT v Praze, 2018, **18**(2) [cit. 2023-02-17]. Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/clanky/2018-2-03-prehled-dostupnych-technologii-3d-tisku-z-cementovych-malt/>
- [2] VAN WOENSEL, Remco, Teun VAN OIRSCHOT a Mats BURGMANS. Printing Architecture: An Overview of Existing and Promising Additive Manufacturing Methods and Their Application in the Building Industry. *The International Journal of the Constructed Environment* [online]. University of Illinois Research Park, 2018, **9**(1) [cit. 2023-02-17]. ISSN 2154-8595. Dostupné z: doi:10.18848/2154-8587/CGP/v09i01/57-81
- [3] KHAN, Mohammad, Florence SANCHEZ a Hongyu ZHOU. 3-D printing of concrete: Beyond horizons. *Cement and Concrete Research* [online]. 2020, **133** [cit. 2023-02-17]. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2020.106070
- [4] ŠTÁDLER, Marek, Josef KAMENICKÝ a Jiří KOTRBA. První česká portálová 3D tiskárna. *BETON* [online]. 2022, **22**(1) [cit. 2023-02-17]. Dostupné z: https://www.ebeton.cz/clanky/2022_1_12-prvni-ceska-portalova-3d-tiskarna/
- [5] Gantry Systems: Working Outside the Envelope. In: *Macron Dynamics* [online]. London (Croydon): MACRON DYNAMICS, 2023 [cit. 2023-02-17]. Dostupné z: <https://www.macrondynamics.com/job-stories/gantry-systems-overview>
- [6] How to Choose Between Cartesian and Delta 3D Printers. In: *FARGO 3D PRINTING* [online]. FARGO (North Dakota): Fargo 3D Printing, 2017 [cit. 2023-02-17]. Dostupné z: <https://www.fargo3dprinting.com/choose-cartesian-delta-3d-printers/>
- [7] Core-XY VS Cartesian. In: *CREALITY 3D* [online]. China: Creality3D, 2023 [cit. 2023-02-17]. Dostupné z: <https://creality3d.shop/blogs/choose-your-3d-printer/core-xy-vs-cartesian>
- [8] 3D printing technology – Delta versus Cartesian. In: *TRACTUS 3D* [online]. Waardenburg (Netherlands): Tractus 3d, 2020 [cit. 2023-02-17]. Dostupné z: <https://tractus3d.com/knowledge/learn-3d-printing/3d-printing-technology-delta-versus-cartesian/>
- [9] SHER, Davide. NEW EXTRUDER IS ONE MORE BRICK IN WASP’S 3D PRINTED HOUSE PROJECT. In: *3D Printing Industry: the authority on additive manufacturing* [online]. 3D Printing Industry, 2015 [cit. 2023-02-17]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/news/one-brick-wasps-3d-printed-house-project-44098/>
- [10] DELTA WASP 3MT CONCRETE. In: *WASP* [online]. Italy: WASP, 2020 [cit. 2023-02-18]. Dostupné z: <https://www.3dwasp.com/en/concrete-3d-printer-delta-wasp-3mt-concrete/>
- [11] VIALVA, Tia. WASP RELEASES “INFINITY 3D PRINTER” FOR CONSTRUCTION. In: *3D Printing Industry* [online]. 3D Printing Industry, 2018 [cit. 2023-02-18]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/news/wasp-releases-infinity-3d-printer-for-construction-139814/>

- [12] MOBILE ROBOTIC SYSTEM PLATYPUS EXPEDITIONARY. In: *LUYTEN 3D* [online]. Melbourne (AUSTRALIA): LUYTEN, 2023 [cit. 2023-02-18]. Dostupné z: <https://www.luyten3d.com/platypusexpeditionary>
- [13] WAKEFIELD, Edward. Luyten 3D launches the Platypus X12 concrete printer: Believed to be the world's largest mobile AI-powered concrete 3D printer. *VoxelMatters* [online]. [cit. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://www.voxelmatters.com/luyten-3d-launches-the-platypus-x12-concrete-printer/>
- [14] STEVENSON, Kerry. The Maxi Printer By Constructions 3D. In: *Fabbaloo* [online]. Fabbaloo, 2022 [cit. 2023-02-18]. Dostupné z: <https://www.fabbaloo.com/news/the-maxi-printer-by-constructions-3d>
- [15] Constructions-3D Maxi Printer. In: *Concreteo3D* [online]. Bayreuth (GERMANY): concreteo3D, 2023 [cit. 2023-02-18]. Dostupné z: <https://concreteo3d.com/produkte/constructions-3d-maxi-printer/>
- [16] Constructions-3D MiniPrinter EDU 3D Printer. In: *Top3dshop* [online]. Bakersfield, CA (USA): Top 3D Shop, c2019-2023 [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://top3dshop.com/product/constructions-3d-miniprinter-edu-3d-printer>
- [17] Introducing Black Buffalo 3D's Modular Construction Printer: The NEXCON™ 1G the Future of Construction. *PR Newswire* [online]. Orlando (FLORIDA): Black Buffalo 3D Corporation, 2022 [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://www.prnewswire.com/news-releases/introducing-black-buffalo-3ds-modular-construction-printer-the-nexcon-1g-the-future-of-construction-301477366.html>
- [18] The NEXCON™ Printer Family: MULTI STORY GANTRY PRINTER. In: *Black Buffalo* [online]. East Stroudsburg, PA: Black Buffalo 3D Corporation, 2023 [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://bb3d.io/products-services/>
- [19] HANAPHY, Paul. STARFLEET INNOTECH TO 3D PRINT REAL ESTATE IN THE PHILIPPINES WITH LUYTEN TECHNOLOGY. *3D Printing Industry* [online]. 3D Printing Industry, 2022 [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/news/starfleet-innotech-to-3d-print-real-estate-in-the-philippines-with-luyten-technology-206777/>
- [20] AUSTRALIAN COMPANY LAUNCHES WORLD'S LARGEST MOBILE 3D CONCRETE PRINTER. *Realty+* [online]. Noida (INDIA): REALTY+, 2022 [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://www.rprealtyplus.com/international/australian-company-launches-worlds-largest-mobile-3d-concrete-printer-108069.html>
- [21] Scara Elite v2. In: *3D POTTER* [online]. Stuart, (FLORIDA): 3D Potter, Inc. [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://3dpotter.com/printers/scara-elite>
- [22] BROŽOVÁ, Helena, Milan HOUŠKA a Tomáš ŠUBRT. *Modely pro vícekriteriální rozhodování*. Vyd. 1. Praha: Credit, 2003. ISBN 978-80-213-1019-3.
- [23] YIN, Hongxi, Ming QU, Haiyan ZHANG a YeChan LIM. 3D Printing and Buildings: A Technology Review and Future Outlook. *Technology|Architecture + Design* [online]. 2018, 2(1), 94-111 [cit. 2023-05-18]. ISSN 2475-1448. Dostupné z: doi:10.1080/24751448.2018.1420968

- [24] NEWMAN, John. Architecture Experiments with Additive Manufacturing. *Digital Engineering* [online]. 2012 [cit. 2023-05-18]. Dostupné z: <https://www.digitalengineering247.com/article/architecture-experiments-with-additive-manufacturing>
- [25] LOWKE, Dirk, Enrico DINI, Arnaud PERROT, Daniel WEGER, Christoph GEHLEN a Benjamin DILLENBURGER. Particle-bed 3D printing in concrete construction – Possibilities and challenges. *Cement and Concrete Research* [online]. 2018, **112**, 50-65 [cit. 2023-05-18]. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2018.05.018
- [26] YU, Shiwei, Hongjian DU a Jay SANJAYAN. Aggregate-bed 3D concrete printing with cement paste binder. *Cement and Concrete Research* [online]. 2020, **136** [cit. 2023-05-18]. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2020.106169
- [27] YU, Shiwei, Jay SANJAYAN a Hongjian DU. Effects of cement mortar characteristics on aggregate-bed 3D concrete printing. *Additive Manufacturing* [online]. 2022, **58** [cit. 2023-05-18]. ISSN 22148604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2022.103024
- [28] TALKE, Daniel, Bettina SAILE, Niklas MEIER, Friedrich HERDING, Inka MAI, Harald ZETZENER, Arno KWADÉ a Dirk LOWKE. Particle-bed 3D printing by selective cement activation – Influence of process parameters on particle-bed density. *Cement and Concrete Research* [online]. 2023, **168** [cit. 2023-05-18]. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2023.107140
- [29] LOWKE, Dirk, Daniel TALKE, Inka DRESSLER, Daniel WEGER, Christoph GEHLEN, Claudia OSTERTAG a Ronald RAEL. Particle bed 3D printing by selective cement activation – Applications, material and process technology. *Cement and Concrete Research* [online]. 2020, **134** [cit. 2023-05-18]. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2020.106077
- [30] LOWKE, Dirk, Inka MAI, Emmanuel KEITA et al. Material-process interactions in particle bed 3D printing and the underlying physics. *Cement and Concrete Research* [online]. 2022, **156** [cit. 2023-05-18]. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2022.106748
- [31] MIN, Kyung-Sung, Kwang-Min PARK, Bong-Chun LEE a Young-Sook ROH. Chloride Diffusion by Build Orientation of Cementitious Material-Based Binder Jetting 3D Printing Mortar. *Materials* [online]. 2021, **14**(23) [cit. 2023-05-18]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma14237452
- [32] JAKUPOVIC, Anes. *D-SHAPE - Visit Report* [online]. In: . 3D Printuset, 2016 [cit. 2023-05-18]. Dostupné z: <http://3dprintetbyggeri.dk/pdf/bes%C3%B8gsrapporter/D-Shape.pdf>
- [33] HOFFMANN, Marcin, Szymon SKIBICKI, Paweł PANKRATOW, Adam ZIELIŃSKI, Mirosław PAJOR a Mateusz TECHMAN. Automation in the Construction of a 3D-Printed Concrete Wall with the Use of a Lintel Gripper. *Materials* [online]. 2020, **13**(8) [cit. 2023-05-18]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma13081800

- [34] MOSTAFAEI, Amir, Amy ELLIOTT, John BARNES, Fangzhou LI, Wenda TAN, Corson CRAMER, Peeyush NANDWANA a Markus CHMIELUS. Binder jet 3D printing—Process parameters, materials, properties, modeling, and challenges. *Progress in Materials Science* [online]. 2021, **119** [cit. 2023-05-18]. ISSN 00796425. Dostupné z: doi:10.1016/j.pmatsci.2020.100707
- [35] ŠČUČKA, Jiří a Petr MARTINEC. *Stavební hmoty 1: BETON*. Ostrava, 2013. Dostupné také z: https://homel.vsb.cz/~khe0007/podklady_vyuka/hmotyII/Scucka_Martinec-SH1-Betony.pdf. Skripta. FAST VŠB - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA.
- [36] NEVILLE, Adam M. *Properties of Concrete* [online]. 5th edition. England: Pearson, 2011 [cit. 2023-05-18]. ISBN 9780273755807. Dostupné z: <https://vdocuments.mx/properties-of-concrete-nevill-5th-edition.html?page=1>
- [37] MARCHON, Delphine, Shiho KAWASHIMA, Hela BESSAIES-BEY, Sara MANTELLATO a Serina NG. Hydration and rheology control of concrete for digital fabrication: Potential admixtures and cement chemistry. *Cement and Concrete Research* [online]. 2018, **112**, 96-110 [cit. 2023-05-18]. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2018.05.014
- [38] ZHANG, Chao, Venkatesh NERELLA, Anurag KRISHNA, Shen WANG, Yamei ZHANG, Viktor MECHTCHERINE a Nemkumar BANTHIA. Mix design concepts for 3D printable concrete: A review. *Cement and Concrete Composites* [online]. 2021, **122** [cit. 2023-05-18]. ISSN 09589465. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconcomp.2021.104155
- [39] DING, Tao, Jianzhuang XIAO, Shuai ZOU a Yu WANG. Hardened properties of layered 3D printed concrete with recycled sand. *Cement and Concrete Composites* [online]. 2020, **113** [cit. 2023-05-18]. ISSN 09589465. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconcomp.2020.103724
- [40] DUCOULOMBIER, Nicolas, Romain MESNIL, Paul CARNEAU, Léo DEMONT, Hela BESSAIES-BEY, Jean-François CARON a Nicolas ROUSSEL. The “Slugs-test” for extrusion-based additive manufacturing: Protocol, analysis and practical limits. *Cement and Concrete Composites* [online]. 2021, **121** [cit. 2023-05-18]. ISSN 09589465. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconcomp.2021.104074
- [41] XIAO, Jianzhuang, Nv HAN, Lihai ZHANG a Shuai ZOU. Mechanical and microstructural evolution of 3D printed concrete with polyethylene fiber and recycled sand at elevated temperatures. *Construction and Building Materials* [online]. 2021, **293** [cit. 2023-05-18]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.123524
- [42] YAO, Xiaofei, Xin LYU, Junbo SUN et al. AI-based performance prediction for 3D-printed concrete considering anisotropy and steam curing condition. *Construction and Building Materials* [online]. 2023, **375** [cit. 2023-05-18]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2023.130898
- [43] WANG, Zhibin, Lutao JIA, Zhicong DENG, Chao ZHANG, Zedi ZHANG, Chun CHEN, Jinlong PAN a Yamei ZHANG. Bond behavior between steel bars and 3D printed concrete: Effect of concrete rheological property, steel bar diameter and paste coating. *Construction and Building Materials* [online]. 2022, **349** [cit. 2023-05-18]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2022.128708

- [44] LE, T. T., S. A. AUSTIN, S. LIM, R. A. BUSWELL, A. G. F. GIBB a T. THORPE. Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. *Materials and Structures* [online]. 2012, **45**(8), 1221-1232 [cit. 2023-05-18]. ISSN 1359-5997. Dostupné z: doi:10.1617/s11527-012-9828-z
- [45] FEYS, Dimitri, Geert DE SCHUTTER, Shirin FATAEI, Nicos S. MARTYS a Viktor MECHTCHERINE. Pumping of concrete: Understanding a common placement method with lots of challenges. *Cement and Concrete Research* [online]. 2022, **154** [cit. 2023-05-18]. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2022.106720
- [46] BUSWELL, R.A., W.R. LEAL DE SILVA, S.Z. JONES a J. DIRRENBERGER. 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. *Cement and Concrete Research* [online]. 2018, **112**, 37-49 [cit. 2023-05-18]. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2018.05.006
- [47] BARBHUIYA, Rahul Islam, Poonam SINGHA a Sushil Kumar SINGH, Seid Mahdi JAFARI, Narjes MALEKJANI. Chapter Seven - Positive displacement pumps. In: *Transporting Operations of Food Materials Within Food Factories* [online]. Elsevier, 2023, s. 201-217 [cit. 2023-05-18]. ISBN 9780128185858. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818585-8.00010-6
- [48] JANG, Kyong Pil a Myoung Sung CHOI. How affect the pipe length of pumping circuit on concrete pumping. *Construction and Building Materials* [online]. 2019, **208**, 758-766 [cit. 2023-05-18]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.03.023
- [49] CHOI, Myoungsung, Nicolas ROUSSEL, Youngjin KIM a Jinkeun KIM. Lubrication layer properties during concrete pumping. *Cement and Concrete Research* [online]. 2013, **45**, 69-78 [cit. 2023-05-18]. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2012.11.001
- [50] JANALÍK, Jaroslav. *Viskozita tekutin a její měření*. OSTRAVA, 2010. Skripta. VYSOKÁ ŠKOLA BAŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA.
- [51] KWON, Seung Hee, Kyong Pil JANG, Jae Hong KIM a Surendra P. SHAH. State of the Art on Prediction of Concrete Pumping. *International Journal of Concrete Structures and Materials* [online]. 2016, **10**(3), 75-85 [cit. 2023-05-18]. ISSN 1976-0485. Dostupné z: doi:10.1007/s40069-016-0150-y
- [52] XIAO, Jianzhuang, Guangchao JI, Yamei ZHANG et al. Large-scale 3D printing concrete technology: Current status and future opportunities. *Cement and Concrete Composites* [online]. 2021, **122** [cit. 2023-05-18]. ISSN 09589465. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconcomp.2021.104115
- [53] ROUSSEL, Nicolas. Rheological requirements for printable concretes. *Cement and Concrete Research* [online]. 2018, **112**, 76-85 [cit. 2023-05-18]. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2018.04.005
- [54] BOS, Freek, Rob WOLFS, Zeeshan AHMED a Theo SALET. Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing. *Virtual and Physical Prototyping* [online]. 2016, **11**(3), 209-225 [cit. 2023-05-18]. ISSN 1745-2759. Dostupné z: doi:10.1080/17452759.2016.1209867

- [55] MECHTCHERINE, V., F.P. BOS, A. PERROT et al. Extrusion-based additive manufacturing with cement-based materials – Production steps, processes, and their underlying physics: A review. *Cement and Concrete Research* [online]. 2020, **132** [cit. 2023-05-18]. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2020.106037
- [56] LLORET, Ena, Amir R. SHAHAB, Mettler LINUS, Robert J. FLATT, Fabio GRAMAZIO, Matthias KOHLER a Silke LANGENBERG. Complex concrete structures. *Computer-Aided Design* [online]. 2015, **60**, 40-49 [cit. 2023-05-18]. ISSN 00104485. Dostupné z: doi:10.1016/j.cad.2014.02.011
- [57] REITER, Lex, Timothy WANGLER, Nicolas ROUSSEL a Robert J. FLATT. The role of early age structural build-up in digital fabrication with concrete. *Cement and Concrete Research* [online]. 2018, **112**, 86-95 [cit. 2023-05-18]. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2018.05.011
- [58] MARCHMENT, Taylor, Jay SANJAYAN a Ming XIA. Method of enhancing interlayer bond strength in construction scale 3D printing with mortar by effective bond area amplification. *Materials & Design* [online]. 2019, **169** [cit. 2023-05-18]. ISSN 02641275. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2019.107684
- [59] FERRARIS, Chiara.F. Concrete mixing methods and concrete mixers: State of the art. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology* [online]. 2001, **106**(2) [cit. 2023-05-18]. ISSN 1044677X. Dostupné z: doi:10.6028/jres.106.016
- [60] MOHAMAD, Nabilla, Khairunisa MUTHUSAMY, Rahimah EMBONG, Andri KUSBIANTORO a Mohd Hanafi HASHIM. Environmental impact of cement production and Solutions: A review. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2022, **48**, 741-746 [cit. 2023-05-25]. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2021.02.212

8 SEZNAM OBRÁZKŮ

| | |
|---|----|
| Obr. 1 Portálová tiskárna Contour Crafting..... | |
| Obr. 2 Vlnitá struktura CC | 17 |
| Obr. 3 Schéma principu CP | |
| Obr. 4 Průběh tisku metody CP..... | 18 |
| Obr. 5 Základní druhy technologie Particle-bed 3D printing | 18 |
| Obr. 6 Ilustrace systému pro nanášení a zhutňování směsi | 19 |
| Obr. 7 Výrobní proces metody Selective paste intrusion | 20 |
| Obr. 8 Systém Binder Jetting..... | |
| Obr. 9 Technologie D-shape..... | 20 |
| Obr. 10 Tisk výklenku pomocí automatizovaného umístění překladu | 21 |
| Obr. 11 Závislost tloušťky vrstvy na bočním proudění pojiva | 22 |
| Obr. 12 Porozita vzorků za rozdílného tlaku kapaliny | 22 |
| Obr. 13 Rozdělení 3D tiskáren dle polohování , zleva kartézská, polární, delta | 23 |
| Obr. 14 3D tiskárna Luyten, zleva Platypus Expeditionary, Platypus X12 | 24 |
| Obr. 15 Konstrukce tiskárny Constructions-3D MiniPrinter EDU | 26 |
| Obr. 16 Konstrukce první portálové tiskárny v ČR | 27 |
| Obr. 17 3D tiskárna Delta WASP 3MT CONCRETE | 28 |
| Obr. 18 3D tiskárna BigDelta WASP 12MT | 29 |
| Obr. 19 3D tiskárna Crane WASP – druhá konfigurace | 31 |
| Obr. 20 3D tiskárna Crane WASP – třetí konfigurace | 31 |
| Obr. 21 Tiskový prostor | |
| Obr. 22 Tiskárna Constructions-3D Maxi Printer | 32 |
| Obr.23 a) tiskový prostor Scara Elite, b) systém Roardrunner, c) 3D tiskárna Scara Elite | 33 |
| Obr. 24 Protichůdné reologické požadavky procesů 3D tisku betonu | 37 |
| Obr. 25 Vývoj statické meze kluzu v závislosti na čase | 38 |
| Obr. 26 Distribuce velikosti částic směsi receptury 5 | 40 |
| Obr. 27 Vliv stárnutí betonové směsi M3 na mechanické vlastnosti | 41 |
| Obr. 28 Závislost mechanických vlastností na teplotě, zleva pevnost v tlaku, pevnost v ohybu | 42 |
| Obr. 29 Komprese pevnosti v tlaku za podmínek vytvrzování párou a okolních podmínek .. | 43 |
| Obr. 30 Mechanická pevnost (v ohybu a tlaku) různých směsí po 28 dnech stárnutí | 44 |
| Obr. 31 Princip míchacího zařízení a) sklopné, b) nesklopné | 45 |
| Obr. 32 Různá konstrukční provedení talířové míchačky | 46 |
| Obr. 33 Grafické znázornění závislosti doby míchání na a) pevnosti tlaku, b) variačním koeficientu | 47 |
| Obr. 34 Sekundární doprava betonové směsi zleva, jeřábem v koši, podvěsnými vozíky | 48 |
| Obr. 35 Čerpatelnost betonové směsi ve vztahu | 49 |
| Obr. 36 Překonání hranice čerpatelnosti | 49 |
| Obr. 37 Průběh tlaku podél čerpacího okruhu čerpadla Putzmeister | 50 |
| Obr. 38 Princip dvoupístového | 50 |
| Obr. 39 Princip jednošroubového čerpadla..... | 51 |
| Obr. 40 Schéma peristaltického čerpadla | 51 |
| Obr. 41 Závislost smykového napětí a dynamické viskozity na gradientu rychlosti | 52 |
| Obr. 42 Schéma proudění betonu v potrubí | 53 |
| Obr. 43 Schéma procesu dodávky a vytlačování technologie 3D tisku betonu a) sjednocený s pasivní tiskovou hlavou, b) oddělený s aktivní tiskovou hlavou | 54 |
| Obr. 44 Pasivní tisková hlava | |

| | |
|---|----|
| Obr. 45 Aktivní tisková hlava | 54 |
| Obr. 46 Vybrané strategie nanášení pro aditivní výrobu založenou na extruzi | 55 |
| Obr. 47 Ilustrace robotického ramene při metodě Smart Dynamic Casting | 56 |
| Obr. 48 Schematický řez kolmý na vrstvy kruhového průřezu | 57 |
| Obr. 49 Zkroucení vlákna obdélníkového průřezu | 57 |
| Obr. 50 Zobrazení tečné dráhy trysky | 57 |
| Obr. 51 Nastavení úhlové trysky 45° | 58 |

9 SEZNAM TABULEK

| | |
|--|----|
| Tabulka 1 Základní charakteristiky metod 3D tisku | 21 |
| Tabulka 2 Druhy cementu | 34 |
| Tabulka 3 Druhy kameniv dle velikosti zrn | 34 |
| Tabulka 4 Přehled nežádoucích látek v kamenivu | 35 |
| Tabulka 5 Přehled přísad do betonu | 36 |
| Tabulka 6 Složení receptury 6 a výsledky zkoušky odkapávání | 39 |
| Tabulka 7 Základní složky tvořící recepturu směsi 5- Le a kol. | 40 |
| Tabulka 8 Materiálové charakteristiky použitého kameniva receptury 6 | 41 |
| Tabulka 9 Složení receptury 6-Tao Ding a kol. | 41 |
| Tabulka 10 Fyzikální a mechanické vlastnosti PE vlákna | 42 |
| Tabulka 11 Složení receptury 7-Xiao a kol. | 42 |
| Tabulka 12 Fyzikální a mechanické vlastnosti PVA vlákna | 43 |
| Tabulka 13 Složení kontrolní směsi 8 | 43 |
| Tabulka 14 Složení nátěru cementové malty | 44 |
| Tabulka 15 Složení receptury 9 | 44 |
| Tabulka 16 Kritéria rozhodování a stanovení jejich vah | 62 |
| Tabulka 17 Zhodnocení vhodnosti Receptury 5–Le a kol. (mix 4)..... | 63 |
| Tabulka 18 Zhodnocení vhodnosti Receptury 7–Xiao a kol. (3DP-NR-PE) | 64 |
| Tabulka 19 Zhodnocení vhodnosti Receptury 9–Wang a kol. (SP036) | 64 |
| Tabulka 20 Stanovení vhodné směsi pro tisk rámu | 64 |
| Tabulka 21 Zhodnocení vhodnosti gravitační míchačky..... | 65 |
| Tabulka 22 Zhodnocení vhodnosti míchačky s nuceným chodem..... | 65 |
| Tabulka 23 Stanovení vhodného míchacího zařízení pro tisk rámu..... | 66 |
| Tabulka 24 Zhodnocení vhodnosti pístového čerpadla | 66 |
| Tabulka 25 Zhodnocení vhodnosti šroubového čerpadla | 67 |
| Tabulka 26 Zhodnocení vhodnosti peristaltického čerpadla | 67 |
| Tabulka 27 Stanovení vhodného čerpadla pro tisk rámu | 68 |
| Tabulka 28 Zhodnocení vhodnosti pasivní tiskové hlavy | 68 |
| Tabulka 29 Zhodnocení vhodnosti aktivní tiskové hlavy..... | 69 |
| Tabulka 30 Stanovení vhodného pro tisk rámu | 69 |