



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAVU TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

CIVIL ENGINEERING - BUILDING MATERIALS AND TECHNOLOGIES

**VÝVOJ TECHNOLOGIE PRO 3D TISK BETONOVÝCH
KONSTRUKCÍ**

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGIES FOR 3D PRINTING OF CONCRETE STRUCTURES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. JOSEF ROUPEC

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. RUDOLF HELA, CSc.

BRNO 2021



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	NPC-SIM Stavební inženýrství – stavební materiály a technologie
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Specializace	bez specializace
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Josef Roupec
Název	Vývoj technologií pro 3D tisk betonových konstrukcí
Vedoucí práce	prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
Datum zadání	31. 3. 2021
Datum odevzdání	14. 1. 2022

V Brně dne 31. 3. 2021

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA,
dr.h.c.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

1. Petch. M. Databáze internetových vědeckých časopisů Web of science, Scopus a další.
2. Zahraniční a tuzemské odborné časopisy a sborníky z vědeckých symposií D Printing Industry The Authority on Additive Manufacturing, The Free Beginners Guide, 2016
3. 3D Insider, The different Types of 3D Printers, 2018
4. Nematollahi, B. Xia, M. ,Sanjayan, J. Current Progres of 3D Concrete Printing Technologies, 2017
5. Mechtcherine, V. ,Nerella, V. N., Will, F., Otto, J. : Large scale digital Concrete Construction - CON Print 3D Concept for on-site monolithic 3D printing, Automation in Construction, 2019
6. Zhang, Y., She, W., Liu, G. : Rheological and harden properties of the high-thixotropy 3D printing concrete, Construction and Building Materials, 2019, vol.201

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Bouřlivý rozvoj 3D tisků se začíná týkat i betonářských staveništních či prefabrikátových technologií. Cílem je výrazně snížit zapojení pracovníků do výrobních procesů. Současné stavitelství se potýká s nedostatkem kvalifikovaných pracovníků, což negativně ovlivňuje kvalitu prací, ale i rychlost stavění. Možným řešením je výraznější zavedení robotizace do stavebních prací, což je v oblasti betonových konstrukcí a prefabrikátů spojeno s technologií 3D tisku.

V ČR se zatím průmyslově tento směr neuplatnil. Důvodem je i skutečnost, že chybí betonové směsi vhodné pro 3D tisk a zkušenosti z realizací.

Cílem Vaší diplomové práce bude navázat na poznatky, které jste popsal ve Vaší bakalářské práci. V teoretické části se zaměřte na zpracování rešerží ze zahraničních odborných zdrojů zaměřených na problematiku navrhování složení cementových kompozitů pro 3D tisk pro zásadní oblast nastavení urychlování tuhnutí a tvrdnutí při zachování reologie vhodné pro tisk. Dále zobecnění zásad tvarů a velikostí trysek pro max. zrna plniv, výšky a šířky kladených vrstev a rychlost tisku.

V experimentální části navrhnete receptury cementových kompozitů pro max. zrna plniva v rozmezí od 2 do 8 mm. Navrhnete či modifikujete vhodné typy urychlovačů a ověřte rychlosti náběhů pevností v čase minut od zamíchání směsí. Vytvořte postupy pro definování rychlosti kladení jednotlivých vrstev při dosažení jejich dokonalého spojení a nárůstu pevností. Ověřte pevnosti navržených kompozitů po 28 dnech pro rozmezí od 20 do 40 MPa. Navrhnete vhodné jednoduché metody testování mechanických vlastností kompozitů v časech minut od zamíchání, pro optimalizaci rychlosti tisku a reologických parametrů pro volbu tvaru a velikosti trysek.

Rozsah práce cca 80 stran.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).
2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
Vedoucí diplomové práce

Abstrakt

Tématem diplomové práce bylo vytvořit základní přehled zkušebních metod pro cementové pasty a betony jak v čerstvé stavu, tak i v zatvrdlém stavu. Zároveň byly navrženy i nové zkušební metody a postupy pro výrobu laboratorních vzorků. Následně se práce zabývá využívanými surovinami v recepturách a samotnými recepturami, které jsou využívány pro tisk. Malá část je věnována i využívaným 3D tiskárnám. Následně jsou předloženy navržené receptury a pozorování na nich založená. Na konci je navržen zcela nový přístup ke zkušebnictví, který je inspirovaný posledním vývojem v počítačové technice a zapadá do návrhu uplatňující plně digitální přístup k návrhu.

Abstract

Subject of dissertation was to itemize testing methods in fresh and hardened state of cement paste or concrete. During this process some new testing methods and specimen creation protocols were proposed. Further was created list of used materials and mix design processes which led to list of used 3D printing mixture designs and 3D printers. Next part of dissertation was devoted to creation of 3D printing mix design and observations based on them. At the end is proposed a radical change in testing methods which utilizes latest advancements in computer science and could be part of digital design process for construction.

Klíčová slova

3D tisk, beton, technologie tisku, metody zkoušení, návrh receptury, simulace, modelování

Keywords

3D printing, concrete, printing technology, testing methods, mix design, simulation, modeling

Citace

ROUPEC, Josef. *Vývoj technologie pro 3D tisk betonových konstrukcí*. Brno, 2021. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. Vedoucí práce prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.

Vývoj technologie pro 3D tisk betonových konstrukcí

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem Vývoj technologie pro 3D tisk betonových konstrukcí zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

.....

Josef Roupec
14. ledna 2022

Poděkování

Velice děkuji svému vedoucímu práce prof. Ing. Rudolfovi Helovi, CSc., za poznámky během návrhu receptur a za přizvání ke spolupráci se společností ICE.

Dále bych rád poděkoval Ing. Martinu Ťažkému za pomoc s měřením a rady spojené se zpracováním experimentální části této práce a týmu ICE za umožnění otestování receptury na jejich 3D tiskárně.

Také bych rád poděkoval svému terapeutovi za podporu během těžkých časů a za vyslechnutí mého nekonečného povídání o problematice 3D tisku. Zároveň jsem velice vděčný své přítelkyni za podporu a motivaci při psaní.

Obsah

1	Úvod	9
2	Míchání receptur, seznam zkoušek a výroba vzorků	10
2.1	Míchání receptur v laboratoři a pro 3D tiskárnu	10
2.1.1	Příprava směsí pro laboratorní měření	10
2.2	Rozdělení typů vzorků a seznam zkoušek	12
2.2.1	Rozdělení typů vzorků	12
2.2.2	Seznam laboratorních zkoušek	13
2.2.3	Seznam zkoušek pro 3D tiskárnu	14
2.3	Výroba vzorků v laboratoři	14
2.3.1	Tradiční formy	14
2.3.2	Zařízení pro výrobu jedné vrstvy tisku (navržená forma)	14
2.3.3	Zařízení pro výrobu jedné vrstvy nebo více vrstev tisku - simulace (navržený přístroj)	17
2.3.4	Forma pro testování spojení dvou vrstev (navržená forma)	17
2.4	Výroba vzorků pomocí 3D tiskárny	18
3	Zkušební metody pro 3D tisk v čerstvém stavu	24
3.1	Vicatův přístroj	24
3.1.1	Vyhodnocení	25
3.1.2	Cíl zkoušky	25
3.2	Kalorimetr	25
3.3	Střásací stůl nebo Abramsův kužel	26
3.3.1	Problém	26
3.3.2	Řešení	26
3.4	Kombinace střásacího stolu a modifikace Vicata	27
3.5	Konzistoměr (navržený přístroj)	27
3.6	Zkušební lis	28
3.7	Pískový lis (navržený přístroj)	29
3.8	Zkouška odkapáváním	29
3.9	Testování odolnosti vůči deformaci	30
3.10	Ultrazvuk	30
3.11	Smrštění	31
3.12	Testování pomocí 3D tiskárny	31
3.12.1	Definice parametrů receptury tiskem	31
3.12.2	Testování deformace tvaru vrstvy	32
4	Zkušební metody pro 3D tisk v zatvrdlém stavu	38

4.1	Zkoušení pevností	38
4.1.1	Pevnost v tlaku	38
4.1.2	Pevnost v tahu ohybem	39
4.1.3	Pevnost v tahu	39
4.2	Porozita vytištěného materiálu	39
4.3	Trvanlivost vytištěného materiálu	39
4.4	Další zkoušky	39
5	Navrhování složení cementových kompozitů pro 3D tisk	43
5.1	Základní parametry důležité pro 3D tisk	43
5.2	Využívané metody návrhy receptur pro 3D tisk	45
5.3	Využívané materiály	45
5.3.1	Cement	45
5.3.2	Příměsi	45
5.3.3	Přísady	45
5.3.4	Vlákna	47
5.3.5	Kamenivo	47
5.4	Příklady receptur a jejich parametry	47
5.4.1	Receptura 1 - Ducoulombier, N.	48
5.4.2	Receptura 2 - Ye, J.	48
5.4.3	Receptura 3 - Heras Murcia, D.	51
5.4.4	Receptura 4 - Chen, Y.	55
5.4.5	Receptura 5 - Arunothayan, Arun R.	58
5.4.6	Receptura 6 - Ding, T.	62
5.4.7	Receptura 7 - Ye, J.	65
5.4.8	Receptura 8 - Kruger, J.	65
5.4.9	Receptura 9 - Ding, T.	68
5.4.10	Receptura 10 - Xiao, J.	69
5.4.11	Receptura 11 - Marchment, T.	70
5.4.12	Receptura 12 - 18	72
5.5	Shrnutí receptur	72
6	Parametry 3D tiskáren	75
6.1	Typy kladení vrstev	75
6.2	Směr kladení vrstev	76
6.3	Typy tiskových hlavic	76
6.4	Možnosti tisku staveb	77
6.5	Možnosti vyztužení tištěných konstrukcí	79
6.6	Příklady tiskáren a jejich parametrů tisku	79
6.6.1	Tiskárna 1 - Ye, J. a Xiao, J.	80
6.6.2	Tiskárna 2 - Heras Murcia, D.	80
6.6.3	Tiskárna 3 - Chen, Y.	80
6.6.4	Tiskárna 4 - Arunothayan, Arun R.	81
6.6.5	Tiskárna 5 - Ding, T.	81
6.6.6	Tiskárna 6 - Kristombu, B.	81
6.6.7	Tiskárna 7 - Marchment, T.	82
6.7	Shrnutí tiskáren	87

7	Návrh vlastní receptury	88
7.1	Použité suroviny	88
7.1.1	Cement	88
7.1.2	Příměsí	88
7.1.3	Přísady	88
7.1.4	Vlákna	89
7.1.5	Kamenivo	89
7.2	První etapa návrhu receptur	89
7.2.1	Testování plastifikátorů	92
7.2.2	Testování příměsí	92
7.2.3	Testování mixu plastifikátorů	92
7.2.4	Testování mixu cementu a příměsí	93
7.2.5	Shrnutí první etapy	93
7.3	Druhá etapa návrhu receptur	94
7.3.1	Porovnání písku Žabčice 0-4 a Čeperka 0-4	97
7.3.2	Receptury pro tisk	97
7.3.3	Shrnutí druhé etapy	97
7.4	Testování na tiskárně společnosti ICE	97
7.5	Shrnutí navržených receptur	98
8	Digitální výroba	101
8.1	Základní myšlenka	102
8.1.1	Zadání stavby, návrh stavby pomocí CADu (vytvoření 3D modelu stavby) a zpracování 3D modelu pro 3D tiskárnu (slicování)	102
8.1.2	Nalezení požadovaných parametrů tisku a receptury (simulací, výpočtem)	102
8.1.3	Laboratorní návrh receptury	102
8.1.4	Ověření tradičních vlastností receptury a provedení stavby	103
8.2	Příklady provedených simulací	103
8.2.1	Simulace tištěných prvků	103
8.2.2	Simulace pevnosti vzorku	104
8.3	Návrh metody	104
8.3.1	Prvotní testování modelování	105
8.3.2	Hledání vhodných programů pro simulace	106
8.3.3	Laboratorní zkoušky pro simulaci a příklad jejich vyhodnocení	106
8.4	Budoucnost	107
9	Závěr	111
	Literatura	112

Seznam obrázků

2.1	Složené zařízení pro tvorbu jedné vrstvy. Na obrázku je složené zařízení pro tvorbu jedné vrstvy tisku. Středový obrázek je pohled kolmo ze shora a obrázky kolem jsou pohledy na zařízení.	15
2.2	Schéma vyměnitelné formy. Délka vzorku je rozdílná pro cementové pasty (C) a pro betony (B). Rozměry X a Y jsou vnitřní rozměry formy. Navržené rozměry jsou v tabulce 2.1.	16
2.3	Zařízení pro zachycení vyměnitelné formy. Uchycení vyměnitelné formy probíhá přitažením šroubů.	18
2.4	Schéma podložky. Vzorky jsou umístěny na této podložce po celou dobu dalšího zkoušení.	19
2.5	Schéma zarážky. Zarážka pro vysunutí formy a simulaci zatížení.	19
2.6	Schéma zatěžovací vložky. Zatěžovací vložka pro simulaci čerpání a vytlačení z trysky.	20
2.7	Schéma složené formy pro testování spojení dvou vrstev. Schéma složené formy, kde horní obrázek je pohled kolmo ze shora a dolní z boku.	20
2.8	Schéma podkladu formy. Podklad formy má rozměry v závislosti zda jde o cementovou maltu (C) nebo beton (B). Horní obrázek je pohled kolmo ze shora a dolní z boku.	21
2.9	Schéma prvního segmentu. Schéma prvního segmentu. Horní obrázek je pohled kolmo ze shora a dolní z boku.	22
2.10	Schéma druhého segmentu. Schéma druhého segmentu. Horní obrázek je pohled kolmo ze shora a dolní z boku.	23
3.1	Střásací stůl a jeho modifikace. V levo je tradiční těleso a vpravo je modifikované těleso. [7]	26
3.2	Střásací stůl a penetrace. Na obrázku vlevo je výsledek a zkouška na střásacím stole a vpravo je ukázka penetračního zařízení. [2]	27
3.3	Schéma konzistoměru. Řez konzistoměrem.	28
3.4	Schéma desky s vodícími lištami. Schéma desky s vodícími lištami.	30
3.5	Schéma zatěžovací desky. Zatěžovací deska je tenký a lehký plech s otvory pro vodící tyče a pro umístění zatěžovacích nádob.	31
3.6	Schéma zatěžovací nádoby.	32
3.7	Schéma složeného pískového lisu pro první metody. První metoda zkoušení slouží pro zjištění maximálního zatížení čerstvé vrstvy.	33
3.8	Schéma konstrukce zásobníku s pískem. Schéma konstrukce zásobníku s pískem zavěšeném na váze.	33
3.9	Schéma druhé metody. Schéma druhé metody ve fázi zatížení dvěma vrstvami.	34

3.10	Zkouška odkapáváním. Na obrázku je schématické znázornění jak se zkouška provádí a jaké parametry se sledují pro vyhodnocení. [8]	35
3.11	Zkouška stavitelnosti. Na obrázku je znázorněna metoda zkoušení stavitelnosti bez 3D tiskárny. [2]	36
3.12	Deformace výšky vrstvy při tisku. Na obrázku je fotka, schéma deformace vrstev a znázornění parametrů ovlivňujících deformace.	37
4.1	Možnosti vyřezání vzorků a směry zkoušení pro pevnost v tahu.	40
4.2	Možnosti vyřezání vzorků a směry zkoušení pro pevnost v ohybu.	41
4.3	Pevnost soudržnosti vrstvy.	42
4.4	Tomografová analýza pórovitosti. Na obrázku je znázorněna počítačová analýza pórovitosti výsledků z průmyslového tomografu. [5]	42
5.1	Grafy chování tekutých materiálů v čerstvém stavu. [12]	44
5.2	Znázornění protichůdnosti požadavků na recepturu. [12]	44
5.3	Křivka zrnitosti, vlastnosti v čerstvém stavu a pevnost v tahu ohybem pro recepturu 2. [10]	50
5.4	Křivka zrnitosti písku v receptuře 3. [9]	51
5.5	Stavitelnost v závislosti na směru tisku a plnění. [9]	53
5.6	Objemová hmotnost a pevnostní charakteristiky receptury 3. Směry tisků a plnění v kapitole 6.6 a pevnostní zkoušky v kapitole 4 (V tomto případě zkoušení pevností kolmo na rovinu vrstev.). [9]	54
5.7	Křivka zrnitosti a roztečení receptur [7]	55
5.8	Pevnosti v tlaku a tahu ohybem, zkoušené dle kapitoly 4.	57
5.9	popisek pro oba 4.2 [7]	57
5.10	Křivka zrnitosti cementu, mikrokřemičitého úletu a písku. [13]	58
5.11	Grafy pevnosti a modulu lomu receptur v závislosti na parametrech tisku. Více o zkoušení v kapitole 4. [13]	61
5.12	Křivka zrnitosti použitých surovin. [14]	62
5.13	Pevnosti 3D tištěných vzorků pro různé délky vláken, vliv recyklovaného písku a době zrání. Zkoušení v kapitole 4.1.2. [14]	64
5.14	Vlastnosti v čerstvém stavu v závislosti na čase (více v kapitole 3) a dále různé pevnosti v zatvrdlém stavu (více v kapitole 4). [2]	66
5.15	Na obrázku je část výsledků z práce autora Kruger, J. [5]	67
5.16	Křivka zrnitosti, roztečení na střásacím stolečku, pevnost v tlaku a v tahu ohybem. [11]	69
5.17	Křivka zrnitosti, pevnostní charakteristiky a tvar trhliny. [16]	71
5.18	Množství pojiva v různých 3D recepturách. V grafu je vyneseno celkové množství pojiv v recepturách pro 3D tisku. [6]	73
5.19	Různé receptury pro 3D tisk. V grafu jsou různé receptury pro 3D tisk. [12]	74
6.1	Různé verze kladení vrstev. Na obrázku jsou různé verze kladení vrstev podle tvaru trysky a výšky kladení. [8]	76
6.2	Několik možností směru kladení vrstev. [9]	77
6.3	Schéma aktivní a pasivní hlavice pro 3D tisk [17].	77
6.4	Schéma základních způsobů provádění staveb. [17]	78
6.5	Možnosti v ukládání výztuže do tištěných konstrukcí. [17]	79
6.6	Tiskárna 1 - Ye, J. a Xiao, J. Na obrázku je postup přípravy materiálu pro tisk a fotka tiskárny. [10]	80

6.7	Schéma jedné používané trysky. [2]	81
6.8	Tiskárna 2 - Heras Murcia, D. Na obrázku jsou fotky tiskárny a zařezaný vzorek z tisku. [9]	82
6.9	Tiskárna 3 - Chen, Y. Na obrázku je schéma tiskárny a tiskové hlavice. [7]	82
6.10	Tiskárna 4 - Arunothayan, Arun R. Na obrázku jsou fotky tiskárny a hlavice. [13]	83
6.11	Na obrázku jsou různé průměry trysek, které byly v rámci práce zkoušeny. [13]	83
6.12	Tiskárna 5 - Ding, T. Na obrázku jsou fotky tiskárny. [19]	83
6.13	Tiskárna 6 - Kristombu, B. Na obrázku je speciální hlavice pro tisk s výztuží. [18]	84
6.14	Tiskárna 7 - Marchment, T. Schéma a popis fungování speciální tiskové hlavice. [16]	84
6.15	Řez tryskou. [16]	85
6.16	Schématické znázornění procesu tisku materiálu s výztuží. [16]	85
6.17	Fotky vytištěného vzorku. Jeho porušení je na obrázku 5.17(c). [16]	86
7.1	Křivky zrnitosti použitých kameniv.	90
7.2	Závislost vodního součinitele na roztečení na střešacím stolku.	99
7.3	Porovnání vodních součinitelů a poměrů jemných podílů vůči písku s roztečením.	100
8.1	Postup při tvorbě simulace. [1]	103
8.2	Vlevo připravený model, vpravo výsledky simulace. [1]	104
8.3	Ukázky možných deformací při tisku. [3]	104
8.4	Výsledky simulace stavitelnosti s různými modelovými parametry. [1]	105
8.5	Směry zatěžování prvků v simulaci. [20]	108
8.6	Porovnání výsledků pevností simulací s reálně naměřenou hodnotou. [20] . .	109
8.7	Ukázka simulace v Blenderu	110

Seznam tabulek

2.1	Navržené vnitřní rozměry vyměnitelné formy	17
5.1	Tabulka vlivů příměsí na reologii a zatvrdlý stav.	46
5.2	Receptura 1 - Ducoulombier, N. Použité suroviny a výsledky zkoušky odkapáváním. [8]	48
5.3	Receptura 2 - Ye, J. Dávka surovin v kg/m^3 . [10]	49
5.4	Vlastnosti vlákna v receptuře 2. [10]	49
5.5	Výsledky zkoušky stavitelnosti. (Více o zkoušce v kapitol 3.12.2.)	52
5.6	Receptura 3 - Heras Murcia, D. Dávka surovin v kg/m^3 . [9]	52
5.7	Chemické složení cementu [7]	56
5.8	Vlastnosti použitých kameniv [7]	56
5.9	Receptura jednotlivých záměsí [7]	56
5.10	Receptura 5 - Arunothayan, Arun R. Množství v hmotnostním poměru. [13]	59
5.11	Chemické složení cementu a mikrokřemičitého úletu [13]	59
5.12	Vlastnosti použitých vláken [13]	59
5.13	Tiskové parametry pro směsi (F-množství vláken v %, D-průměr trysky v mm, S-tisková rychlost v mm/s) [13]	60
5.14	Vlastnosti použitých vláken [14]	62
5.15	Vlastnosti použitých písků [14]	63
5.16	Receptura 6 - Ding, T. Složení jednotlivých receptur [14]	63
5.17	Receptura 7 - Ye, J. Složení použitých receptur. [2]	65
5.18	Receptura 8 - Kruger, J. Složení receptury a výrobci surovin. [5]	65
5.20	Receptura 9 - Ding, T. Složení jednotlivých receptur.	68
5.19	Vlastnosti použitého písku [11]	68
5.21	Vlastnosti použitých vláken [15]	70
5.22	Receptura 10 - Xiao, J. Složení jednotlivých receptur. [15]	70
5.23	Receptura 11 - Marchment, T. Složení jednotlivých receptur. [16]	71
5.24	Receptury od různých autorů. [17]	72
7.1	Vlastnosti použitého cementu a mikromletého vápence	89
7.2	Vlastnosti použitých vláken	89
7.3	První návrh receptur a roztečení na strásacím stolku (všechny hodnoty v gramech, kromě roztečení v mm).	91
7.4	Objemová hmotnost a 7 denní pevnost v tahu ohybem a v tlaku na trámečcích 40x40x100 mm.	92
7.5	Druhý návrh receptur (všechny hodnoty v gramech).	94

7.6	Objemová hmotnost, 7 denní pevnost v tahu ohybem a v tlaku na trámečcích 40x40x100 mm (<i>pro 1x3, 2x3 a 3x3</i>) a 28 denní pevnosti v tlaku na kostkách o hraně 100 mm (<i>pro S-5-3-E až S-4-2,5</i>).	94
7.7	Recepturu i mezi receptury pro výpočet parametrů receptury. (všechny hodnoty v gramech).	95
7.8	Vypočítané parametry receptury.	96

Kapitola 1

Úvod

3D tisk je rychle rozvíjející se výrobní proces nejen v oblasti stavebnictví. Ve velkém množství prací byly ukázány jeho výhody oproti tradičním stavebním postupům. Zároveň je třeba zdůraznit, že existuje velké množství neznámých ve 3D tisku. Jako příklad lze uvést kontrolu materiálových vlastností a tisku samotného. Například jaké je maximální množství vrstev před kolapsem, jaká je vhodná rychlost tisku a jaký je vhodný přístup k návrhu receptur a i samotné tiskárny. [1]

Dnes je výzkum cementových past a betonových receptur pro 3D tisk stále v raných fázích a existuje spousta neznámých. Stále například není definován vhodný postup návrhu receptur, který má spojitost s nedostatkem zkušebních metod. Existující zkušební metody jsou často náročné nebo nedokáží stanovit vlastnosti v čerstvém stavu. Dalším nedostatkem je normalizace zkušebních metod, která vede k podobným zkouškám s drobnými rozdíly, které se pak projeví v naměřených parametrech. Rozdíl ve zkouškách pak vede k obtížnému porovnání receptur rozdílných týmů mezi sebou. Zároveň nové zkušební metody prošly pouze limitovaným testováním a jejich praktické ověření tedy stále není vždy platné. Například lze uvést anisotropie vytištěných prvků, kdy se výzkumníci různých týmů nedokážou shodnout zda jim 3D tisk trpí či nikoliv. [2],[3]

Pro obecný úvod do 3D tisku a základní přehled o problematikách spojených s 3D tiskem doporučuji navštívit mnou napsanou bakalářskou práci. [4] Cílem této práce je vytvořit přehled prováděných zkušebních metod a navrhnout vhodné metody zkoušení. Dále bude cílem vytvořit přehled receptur ze zahraniční literatury a využívaných tiskáren. Na základě těchto informací následně bude nevrhnutá vlastní receptura pro 3D tisk. Nakonec bude navržen nový přístup ke zkušebnictví.

Kapitola 2

Míchání receptur, seznam zkoušek a výroba vzorků

V této kapitole jsou navrženy různé metody zkoušení směsí pro 3D tisk. Nadále je diskutován problém těchto návrhů a jejich provádění v praxi na základě pozorování reálného tisku, které bylo prováděno ve spolupráci se společností ICE Industrial Service, která se začala zabývat 3D tiskem a byla s ní navázána spolupráce s cílem vývoje směsi vhodné pro 3D tisk s využitím lokálních surovin.

Touto kapitolou začínám, protože jsou na ní závislé další kapitoly, jako jsou 5, 6 a 7.

Zároveň zkušební metody jsou největším problémem, na který jsem během návrhu narazil. Zejména kvůli neexistenci vhodných norem a celkovou neznalostí v oblasti kontinuálního testování cementové pasty a betonové směsi v čerstvém stavu, které velice komplikují návrh vlastní směsi, kterému se více věnuji v kapitole 7.

2.1 Míchání receptur v laboratoři a pro 3D tiskárnu

V této části se zabývám samotnou přípravou vzorků, které je velice důležité. Je zde důležité zmínit, že je velký rozdíl mezi laboratorními postupy a mezi postupy v praxi. Kdy parametry směsi v čerstvém stavu ovlivňuje i samotné čerpání směsi, které se nedá jednoduše simulovat v laboratorních podmínkách. Později se i ukázalo, že návrh vhodné receptury bude mnohem komplikovanější, než by se mohlo zdát. Je zde velký rozdíl mezi tradičním návrhem betonových receptur a návrhem receptur pro 3D tisk. Tento rozdíl spočívá v jiných poměrech jemných částic vůči částicím hrubým a vzhledem k požadavkům na 3D tisk, které jsou ovlivněny mnoha parametry, kterým se detailněji věnuji v kapitole 5.1. Velice rychle při přechodu z teoretického návrhu na reálný návrh bylo zřejmé, že je třeba navrhnout nejen zkušební metody, ale i postupy přípravy receptury, které nebudou ovlivňovat následná měření.

V moment psaní této práce bohužel nebyly vytvořeny zkušební vzorky pomocí 3D tiskárny, ale tato práce se zabývá touto problematikou a navržené postupy budou využity v budoucnu.

2.1.1 Příprava směsí pro laboratorní měření

Pro výrobu vzorků k účelu zkoušení v laboratorních podmínkách byly využity cementářské laboratorní míchačky pro menší objemy, pro větší objemy byly využity betonářské míchačky a pro prvotní testování "citem" byl využit ruční mixér. Byla tak navržena řada různých

směsí, na základě kterých byly navrženy směsi pro testování ve větším objemu. Směs byla vždy míchána dokud nebylo vidět, že je dostatečně promíchána. Míchání tedy trvalo přibližně 5 minut. Během míchání byl problém dodržet správné množství vody, aby směs měla vždy stejnou konzistenci při různých mícháních. Tento problém přikládám ke kombinaci velkého objemu jemných částic a větší dávce plastifikátoru. Tato kombinace byla ovšem nutná pro vytvoření tixotropního chování směsi, ale zároveň způsobovala velkou citlivost na množství přidané vody, kdy v některých případech stačil rozdíl v jednotkách procentech rozdílu vody a směs přecházela z tuhé (nečerpateľné konzistence) na příliš tekutou (po tisku vrstvy by neudržela tvar).

Podobný způsob míchání byl využit i ve většině prací, ze které tato práce čerpala, což je důležité zejména pro kapitolu 5. Specifické postupy míchání jednotlivých autorů ovšem neuvádím z důvodu rozsahu práce.

Problematiky

Jak již bylo zmíněno, tak na receptury pro 3D tisk má vliv velké množství parametrů. Vliv by mohla mít i doba od míchání, zvolený způsob transport do hlavičky tiskárny a moment přidání urychlovače. Vzhledem k tomuto mohou být uvažovány následující varianty:

1. Míchání směsi těsně před tiskem (kontinuální nebo periodické). Přidání urychlovače před čerpáním.
2. Míchání směsi těsně před tiskem (kontinuální nebo periodické). Přidání urychlovače až v hlavičce tiskárny.
3. Míchání a dovoz směsi v době 60-120 minut. Přidání urychlovače před čerpáním.
4. Míchání a dovoz směsi v době 60-120 minut. Přidání urychlovače až v hlavičce tiskárny.
5. Míchání a dovoz směsi v době 60-120 minut. Přidání extra plastifikátoru nebo vody (před čerpáním) a urychlovače (před čerpáním).
6. Míchání a dovoz směsi v době 60-120 minut. Přidání extra plastifikátoru nebo vody (před čerpáním) a urychlovače (po čerpání až v hlavičce).

První, třetí a pátá varianta je zmíněna zejména kvůli navrženému urychlovači v předchozí bakalářské práci. [4] Zároveň bych zmínil, že tyto tři verze jsou dle mého názoru rozumnou cestou pro tisk větších objemů, zatímco další tři verze jsou vhodné spíše pro menší objemy tisků. Tyto verze ovšem přinášejí zásadní problém, kdy je nutný kontinuální odběr materiálu. Při zastavení odběru hrozí ucpání čerpací soustavy a hlavičky tiskárny. V praxi jsou tedy spíše využívány zbylé tři varianty.

Druhá varianta je momentálně využívána společností ICE a praktická část tak nejvíce odpovídá této variantě. Ovšem při práci na této práci zatím není navržena finální verze hlavičky přimíchávající urychlovače a ani stále nebyl vybrán urychlovač, který se bude využívat. Tudíž praktický návrh směsi, kterému se budu věnovat v pozdější kapitole 7 je návrh bez urychlovače.

Třetí až šestá varianta jsou metody, které budou nejspíše využívány v budoucnu při komerčním tisku staveb. V tuto chvíli nebyly využity a ani otestovány v rámci praktické části této práce.

Postup míchání v laboratoři

Postup míchání je obdobný jako pro tradiční betony. Nejprve se přidávají suché složky, které se promíchají. Následně se přidá část vody a během míchání se přidává plastifikátor. Dále je pomalu přidávána voda dle receptury. Směs se míchá dokud není dostatečně zamíchána. Navržené směsi vyžadují delší a intenzivnější míchání než tradiční směsi a to z důvodu nízkého vodního součinitele, většího podílu jemných částí a větší dávky plastifikátoru. Navrhované receptury bylo problematické namíchat kvůli vysoké viskozitě a bylo nutné využít nejnižší rychlost míchání, protože vyšší rychlosti neměly dostatečný výkon pro míchání. Dále v rámci metod zkoušení by bylo vhodné umístit na motory používaných míchaček měřič proudu a otáčkoměr a to pro kompletní vytvoření přesného modelu, kterému se budu věnovat v pozdější kapitole 8.

Postup míchání pro 3D tiskárnu

Zde lze rozdělit míchání do dvou kategorií:

1. Míchání suchých směsí.
2. Míchání navržených receptur.

Míchání suchých směsí probíhalo periodicky smícháním různých prefabrikovaných pytlů se směsí od společností *Mapei* a *Master Builders Solutions*, případně pouze jednoho a následně umístění suché směsi do zařízení *m-tec duo mix 2000*. Tento míchací systém si sám kontinuálně odebírá suchou směs a přidává k ní nastavené množství vody a dále čerpá směs pomocí šnekového čerpadla do tiskové hlavice.

Míchání navržených receptur probíhalo periodicky přípravou receptury v betonářské míchačce a následně umístění do systém *m-tec duo mix 2000*, ale bylo vypnuté dodatečné dávkování vody a směs byla čerpána pomocí šnekového čerpadla do tiskové hlavice.

V tiskové hlavici je možné vypnout nebo zapnout dávkování urychlovače a vzhledem k nedokončenému designu tiskové hlavice ji nebudu v této práci podrobněji rozebírat. Zároveň to byl jeden z hlavních problémů při tisku jak navržených receptur, tak i již připravených suchých směsí, a často docházelo k ucpání hlavice.

2.2 Rozdělení typů vzorků a seznam zkoušek

2.2.1 Rozdělení typů vzorků

- Vzorky z laboratorní výroby.
- Vzorky vytvořené 3D tiskárnou.

Vzorky z laboratorní výroby

Vzorky z laboratorní výroby lze rozdělit na:

- Tradiční výrobu.
- Výrobu pomocí laboratorní 3D tiskárny.

V práci byla využita pouze tradiční výroba vzorků pomocí forem a vibračního stolu, protože jsem neměl přístup k laboratorní 3D tiskárně. Více v části 2.3.

Vzorky vyrobené 3D tiskárnou

Vzorky vyrobené pomocí 3D tiskárny jsou nejčastěji vyrobeny pomocí nařezání vytištěného prvku nebo nejsou nijak upravovány. Více v kapitole 2.4.

2.2.2 Seznam laboratorních zkoušek

Seznam navržených zkoušek v čerstvém stavu (detailně jsou tyto zkušební metody rozebrány v kapitole 3), ale i v zatvrdlém stavu (detailně jsou tyto zkušební metody rozebrány v kapitole 4):

- Vicatův přístroj a jeho modifikace
- Kalorimetr
- Strásací stolek nebo Abramsův kužel
- Kombinace strásacího stolku a modifikace Vicata
- Konzistoměr (navržený přístroj)
- Zkušební lis
- Pískový lis (navržený přístroj)
- Zkouška odkapáváním
- Testování odolnosti vůči deformaci
- Ultrazvuk
- Smrštění
- Pevnost v tlaku
- Pevnost v tahu ohybem
- Pevnost v tahu
- Modul pružnosti
- Porozita vytištěného materiálu
- Mrazuvzdornost
- Obrusnost
- Chemická koroze
- Koroze výztuží
- Požární odolnost
- Vodotěsnost
- Zkoušky dotvarování
- Další...

2.2.3 Seznam zkoušek pro 3D tiskárnu

Seznam navrhovaných zkoušek pro provedení na 3D tiskárně (detailně jsou tyto zkušební metody rozebírány v kapitole 3 a 4):

- Zkouška odkapáváním
- Ultrazvuk
- Definice parametrů receptury tiskem
- Testování deformace tvaru vrstvy

2.3 Výroba vzorků v laboratoři

Zde je otázkou už jen zda využít vibrační stůl pro zhutnění vzorků. Při reálném tisku k žádné úmyslné vibraci nedochází, ale zároveň dochází k čerpání a jiným procesům, které teoreticky směs zhustí, i když některé výzkumné práce ukazují, že vzorky z 3D tiskáren mají větší obsah vzduchu než výroba tradiční. [5],[3] Navíc různé procesy během tisku, jako čerpání, dodatečné míchání, dodatečné přidávání urychlovače, vytlačení přes hlavici a další, ovlivňují vlastnosti směsi. Je tedy otázkou jak velký vliv tyto tiskové procesy mají na vlastnosti a zda je nutné navrhnout zkoušky, které je budou respektovat. Toto je otázka pro budoucí práce. Pro usnadnění v rámci této práce vzorky pro pevnostní zkoušky byly zhutněny na vibračním stole.

Tento postup byl zvolen, protože se s recepturami pro 3D tisk pracuje velice obtížně. Je náročné je nabírat díky vysoké viskozitě a tixotropii díky čemuž se ani nepohybují a bez vibrace by bylo tak téměř nemožné vytvořit hutná zkušební tělesa. Zároveň problém se zpracovatelností směsi v laboratoři se projevuje i u dalších zkoušek.

Stává se to zejména problémem při přidání urychlovače. Protože pokud je do směsi přidán urychlovač, tak cílem měření je získat informace ihned od přidání, to při ručním provádění je v podstatě nemožné. Nejprve je potřeba urychlovač rovnoměrně rozmíchat do směsi a následně umístit do požadované formy nebo zkušebního zařízení. Při tomto míchání a přemísťování je ztracen počáteční časový interval chování směsi, který je kritický a to zejména při dávkování urychlovače v trysce tiskárny.

2.3.1 Tradiční formy

Mezi použité tradiční formy spadají:

- Forma pro cementové trámečky 40x40x160 mm.
- Forma pro betonové kostky o hraně 100 mm.
- Další tradiční formy.

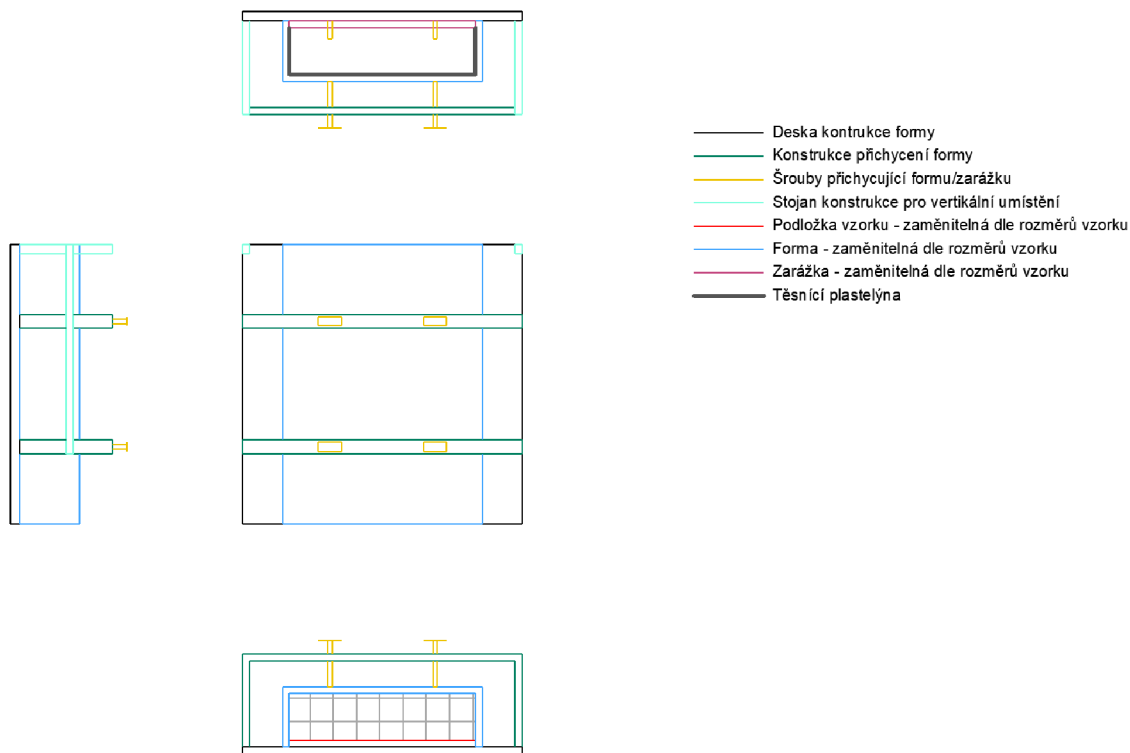
V práci byly použity zmíněné formy. V budoucnu bude ovšem potřebné využít i další formy pro provedení dalších zkoušek, které nebyly prováděny.

2.3.2 Zařízení pro výrobu jedné vrstvy tisku (navržená forma)

Níže jsou obrázky 2.1- 2.6, na kterých je schéma zařízení pro vytvoření jedné tisknuté vrstvy, která má možnost vytvoření různých šířek a výšek vrstev pro simulaci různých hlavic a dále

má možnost zatížení závaží pro simulace čerpání a vytlačení z hlavice, které může mít vliv na vlastnosti, které se projeví při měření. Toto zařízení je určeno pro vytváření zkušebních těles v čerstvém stavu. Aby se těleso nedeformovalo, tak je navržena metoda vysunutí z formy, kdy vzorek zůstane na podkladu, a může se s ním jednoduše manipulovat a umístit do měřících zařízení na vlastní podložce.

Na obrázku 2.1 je schéma celé složené formy, kde je prostor pro vzorek v dolní části obrázku znázorněn čtvercovým šrafem. Středový obrázek je pohled na zařízení kolmo ze shora a obrázky kolem jsou jednotlivé pohledy na zařízení. Zařízení je navrženo ve dvou různých rozměrech pro cementové pasty (C) a pro betony (B).

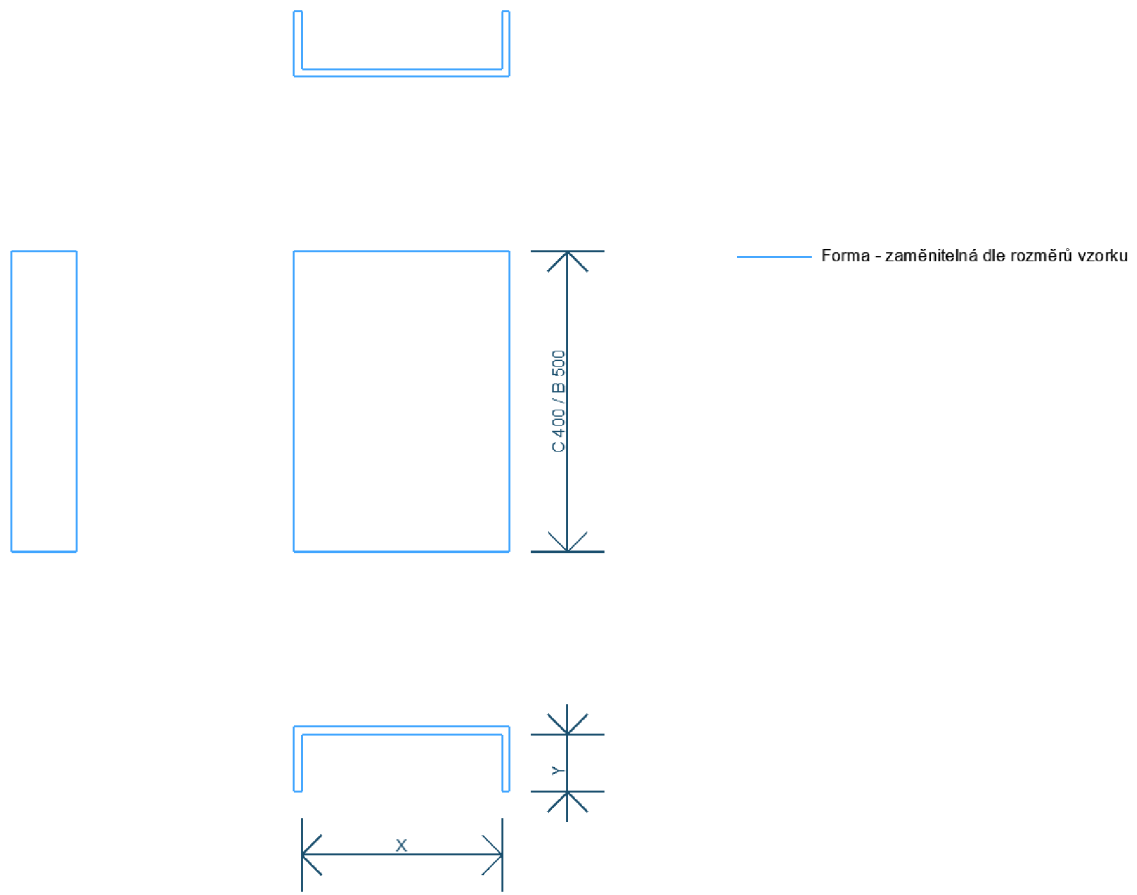


Obrázek 2.1: **Složené zařízení pro tvorbu jedné vrstvy.** Na obrázku je složené zařízení pro tvorbu jedné vrstvy tisku. Středový obrázek je pohled kolmo ze shora a obrázky kolem jsou pohledy na zařízení.

Na obrázku 2.2 je schéma vyměnitelné formy, která udává rozměry vzorku. Délka vzorku je rozdílná pro cementové pasty (C) a pro betony (B). Rozměry X a Y jsou vnitřní rozměry formy a v tabulce 2.1 jsou navrženy některé rozměry pro testování, ale v praxi bude třeba, aby tyto rozměry odpovídaly rozměrům vrstev 3D tiskárny, pro kterou je navrhovaná daná receptura.

Na obrázku 2.3 je zařízení pro zachycení vyměnitelné formy s rozdílnými rozměry pro cementové pasty (C) a pro betony (B). Uchycení vyměnitelné formy probíhá přitažením šroubů. Rozměry Z1 a Z2 nejsou přesně určeny a pokud dojde k výrobě zařízení, je potřebné některé rozměry více specifikovat s výrobcem.

Na obrázku 2.4 je schéma podložky, na které vzorky jsou umístěny po celou dobu zkoušení. Zároveň na spodní části jsou hroty pro přesné umístění do zařízení, pro uchycení formy



Obrázek 2.2: **Schéma vyměnitelné formy.** Délka vzorku je rozdílná pro cementové pasty (C) a pro betony (B). Rozměry X a Y jsou vnitřní rozměry formy. Navržené rozměry jsou v tabulce 2.1.

a zároveň jsou využívány pro vycentrování vzorku u dalších navrhovaných zkoušek (jedna v kapitole 3.7).

Na obrázku 2.5 je schéma zarážky na konec formy, díky které je možné sesunout formu ze vzorku, aniž by došlo k jeho deformaci. Zároveň slouží jako zarážka proti zatížení pro simulaci čerpání nebo vytlačení z trysky, ale je potřebné ucpat mezeru mezi formou a zarážkou pomocí plastelíny.

Na obrázku 2.6 je schéma zatěžovací vložky, na které působí zatížení pro simulaci čerpání a vytlačení z trysky.

Toto navržené zařízení by se plnilo čerstvou směsí ve vertikální poloze a vzhledem k tuhostem receptur pro 3D tisk, by musel být využit vibrační stůl pro naplnění, aby nedošlo ke vzniku velkých vzduchových mezer. Po ukončení plnění by se forma umístila zpět do vodorovné polohy, sesunula by se vyměnitelná forma a vzorek by se na podložce mohl umístit do různých zařízení pro provedení měření.

Tabulka 2.1: Navržené vnitřní rozměry vyměnitelné formy

Forma vrstev pro C			Forma vrstev pro B		
Typ	X [mm]	Y [mm]	Typ	X [mm]	Y [mm]
1	40	10	1	100	50
2	40	20	2	100	100
3	60	10	3	150	50
4	60	20	4	150	100

2.3.3 Zařízení pro výrobu jedné vrstvy nebo více vrstev tisku - simulace (navržený přístroj)

Toto zařízení může být jednoduchá trubka o rozměrech tiskové hlavičky, ze které je vytlačen materiál na podložku. Pro vylepšení může být toto zařízení umístěno na kolejnici, které budou usnadňovat posouvání při vytlačení.

Ideálně by ovšem byla vytvořena imitace tiskárny. Pohyb po kolejnici by byl automatizován pomocí motoru a vytlačení z hlavičky by probíhalo tlakem vzduchu nebo pístem. Podmínkou je ovšem jednoduchá výměna hlavičky. Pro imitaci tisku více vrstev by bylo potřebné zajistit i pohyb hlavičky ve svislém směru pomocí dalšího motoru. [3]

Návrh takového zařízení bude nejspíše nutné pro budoucí práce.

2.3.4 Forma pro testování spojení dvou vrstev (navržená forma)

Tato forma je navržena za účelem zkoušení vlivu okolních podmínek a definici vhodné rychlosti tisku vrstev na spojení jednotlivých vrstev. Forma by mohla být kruhová nebo čtvercová. Na obrázcích 2.7- 2.10 je schéma čtvercové formy.

Forma se skládá z podkladu (obrázek 2.8) a dvou segmentů. První segment je umístěn na podklad a je naplněn až po hranu směsí. Obrázek dolního segmentu 2.9. Takto vytvořený vzorek zraje po dobu, než je předpoklad umístění další vrstvy.

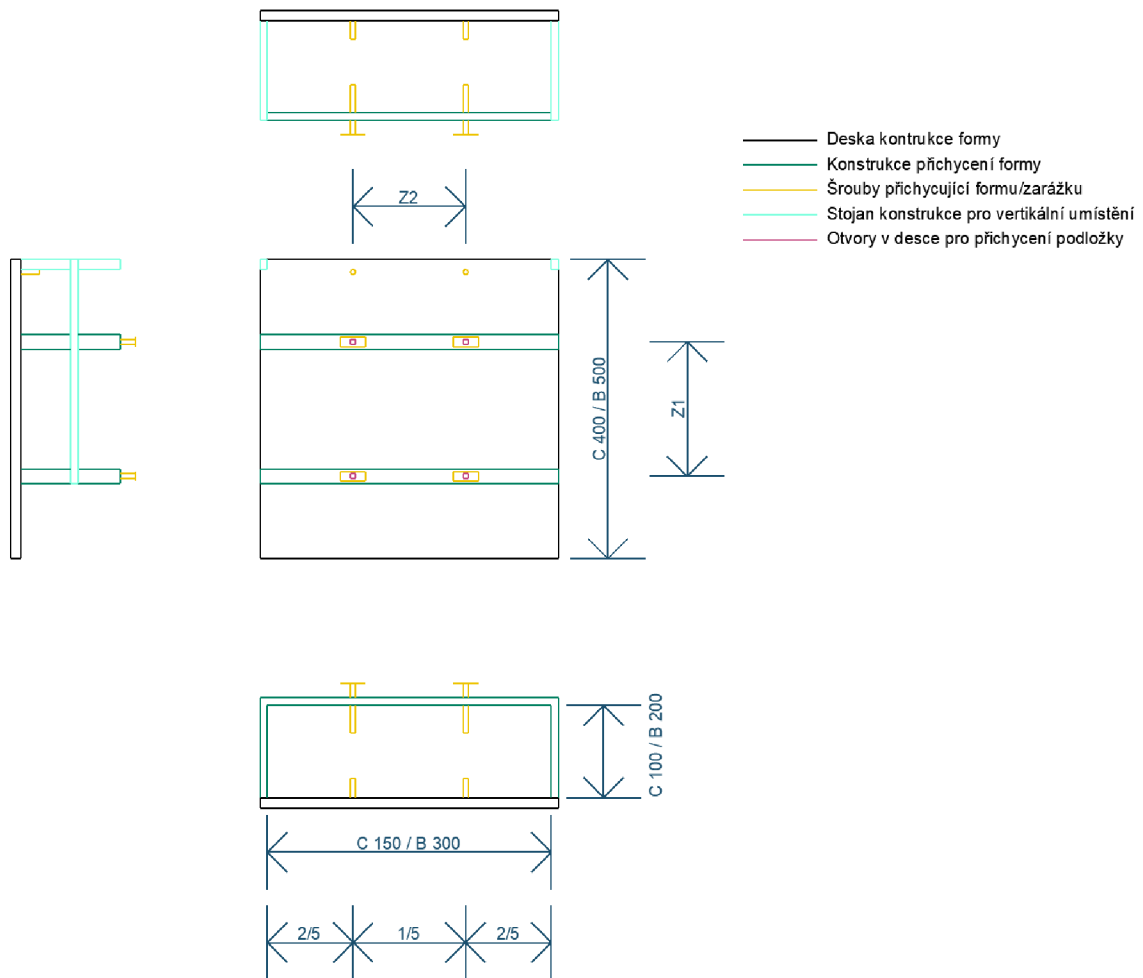
Vzorek zraje na vzduchu a je možno zkoušet vlivy okolí na sílu spojení vrstev. Navržené podmínky zrání:

- Umístění do sušárny s teplotou 5-70 °C (v závislosti na prostředí tisku a zahřívání směsi).
- Ofukování vzorku větrákem.
- Ozařování vzorku zářičem (simulace slunečního záření).
- Kombinace výše uvedených.

Po dané době umístění druhého segmentu na první a naplnění nově vytvořenou směsí až po okraj. Na obrázku 2.10 je schéma druhého segmentu.

Navržené rozměry pro cementovou maltu (C) jsou 50x50 mm a výšce 20 mm. Pro betony (B) jsou navržené rozměry 100x100 mm a výšce vrstvy 50 mm.

Vzorek se následně nechá zrát jeden den na vzduchu v laboratorních podmínkách a vyndá se z formy. Zkoušení pevností v tahu a smyku (více v kapitole 4.1.3) probíhá po 1, 7 a 28 dnech zrání na vzduchu v laboratorních podmínkách nebo ve vodním prostředí.



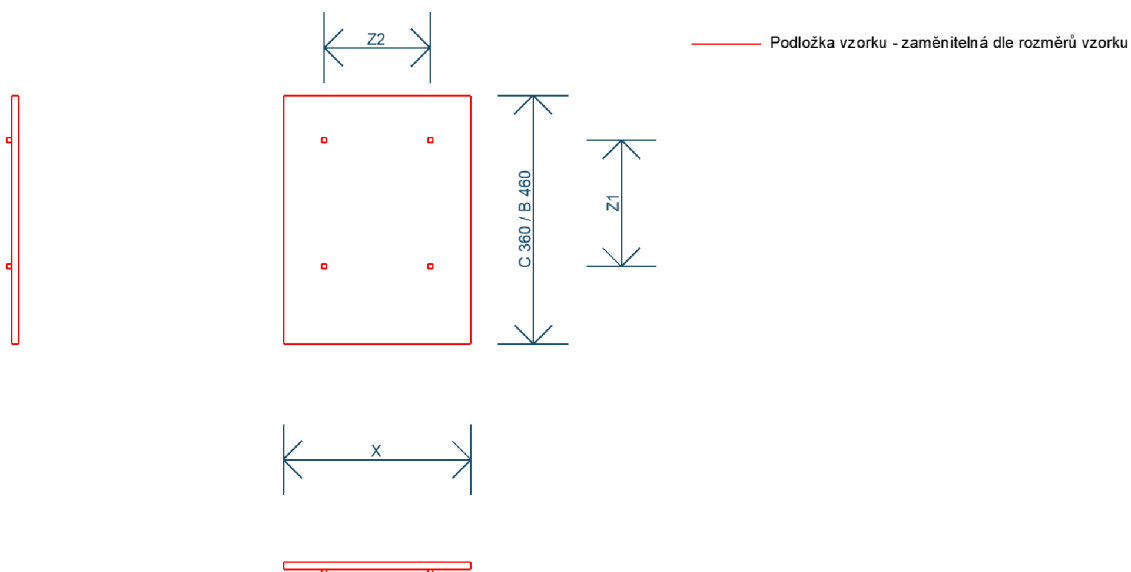
Obrázek 2.3: **Zařízení pro zachycení vyměnitelné formy.** Uchycení vyměnitelné formy probíhá přitažením šroubů.

2.4 Výroba vzorků pomocí 3D tiskárny

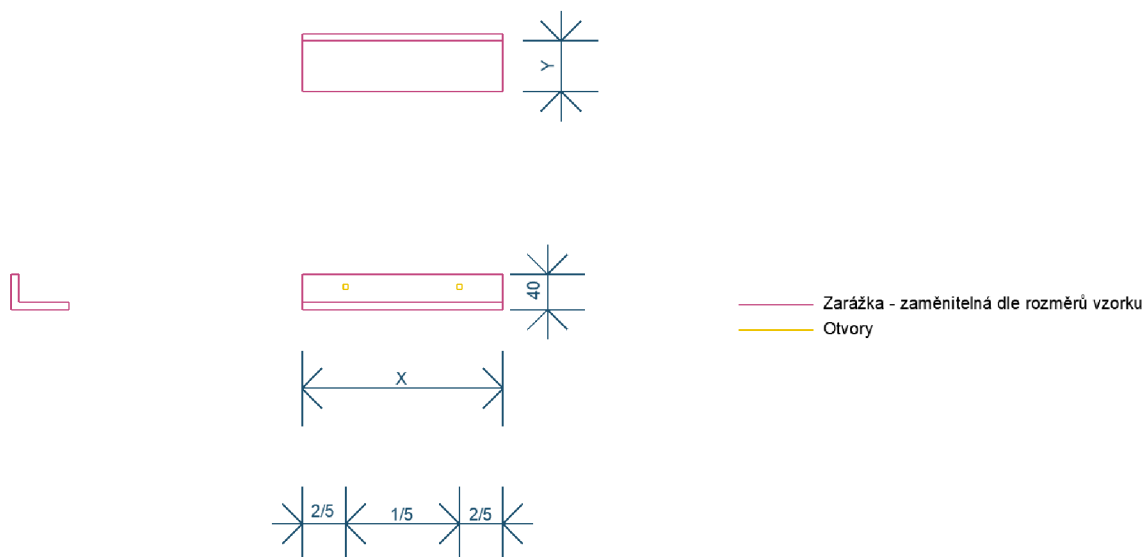
Vzorky vyrobené pomocí 3D tiskárny pro zkoušení v čerstvém stavu nebo v zatvrdlém stavu jsou nejčastěji vyrobeny pomocí nařezání vytištěného prvku. Je potřeba ovšem zmínit, že proces řezání a to v čerstvém stavu nebo zatvrdlém stavu má dopad na vznik trhlin ve vzorku. Zároveň oproti tradičním vzorkům je třeba dbát větší důraz na anisotropii tištěného prvku. Existují různé postupy a směry pohybu tiskové hlavičky, které mohou mít dopad na zkoušené vlastnosti. Je tedy nutné odběr většího počtu vzorků v různých směrech, o této problematice se hlouběji zabývám v kapitole 4. [2]

Alternativně vzorky nejsou nijak upravovány a sleduje se chování materiálu přímo během tisku měřením výšky, teploty a dalších metod. Detailněji jsou tyto metody popsány v kapitole 3. [2],[3]

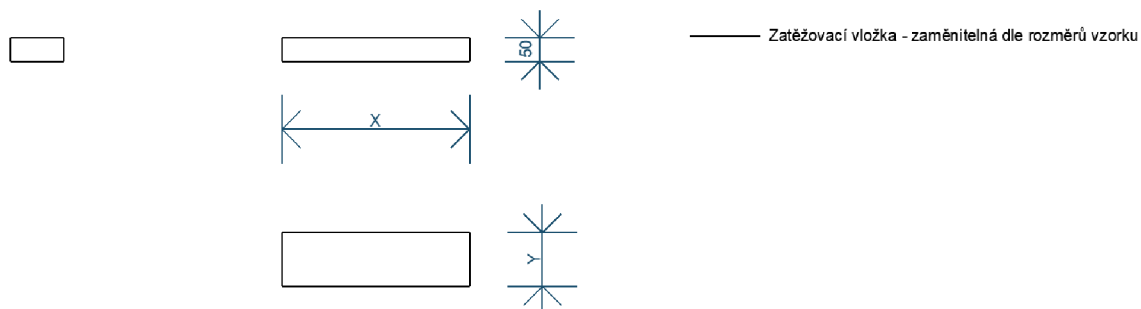
V případě odběru vzorků v čerstvém stavu je třeba stanovit, kde přesně byl materiálový vzorek odebrán. Je rozdíl, zda byl odebrán před čerpáním, po čerpání nebo až za tiskovou hlavičkou.



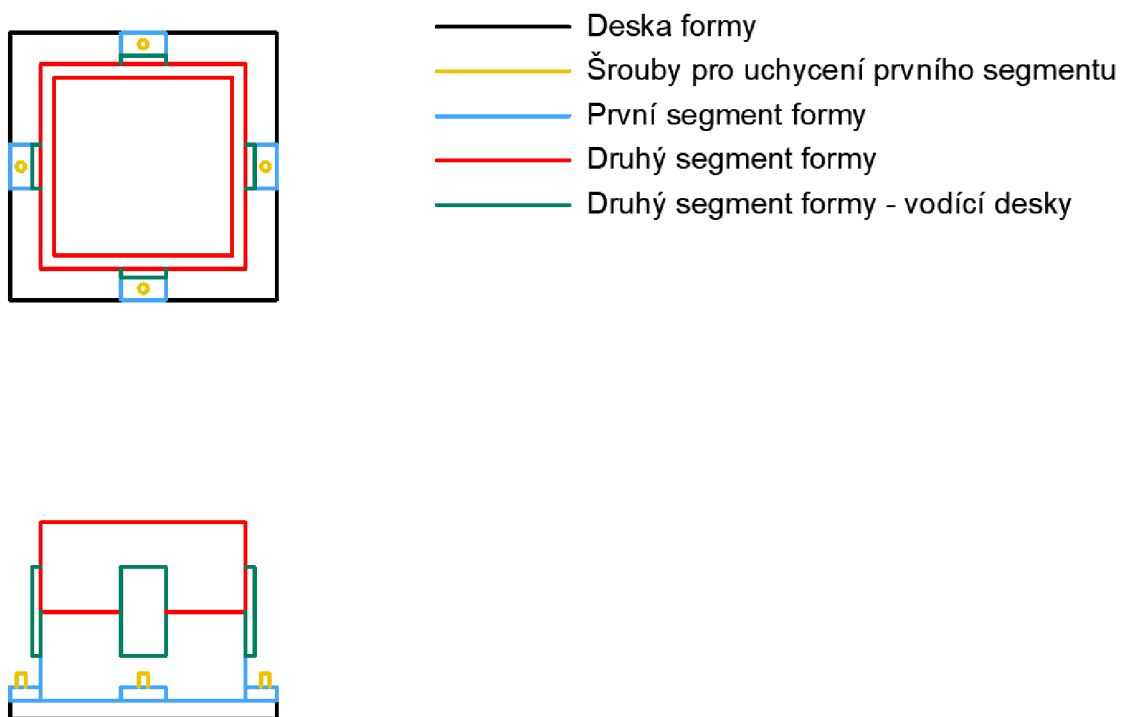
Obrázek 2.4: **Schéma podložky.** Vzorky jsou umístěny na této podložce po celou dobu dalšího zkoušení.



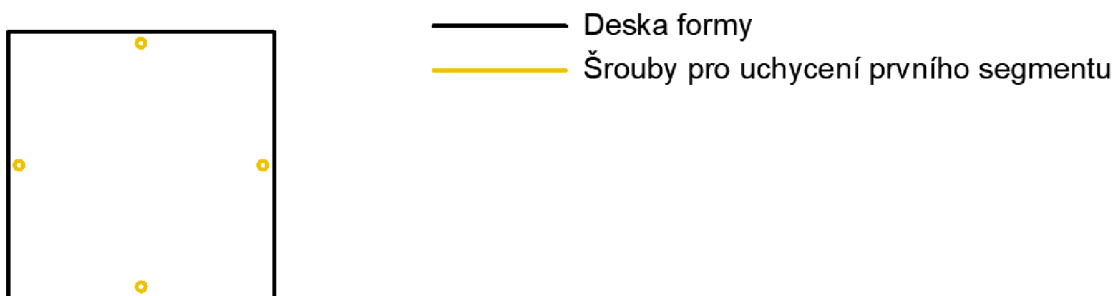
Obrázek 2.5: **Schéma zarážky.** Zarážka pro vysunutí formy a simulaci zatížení.



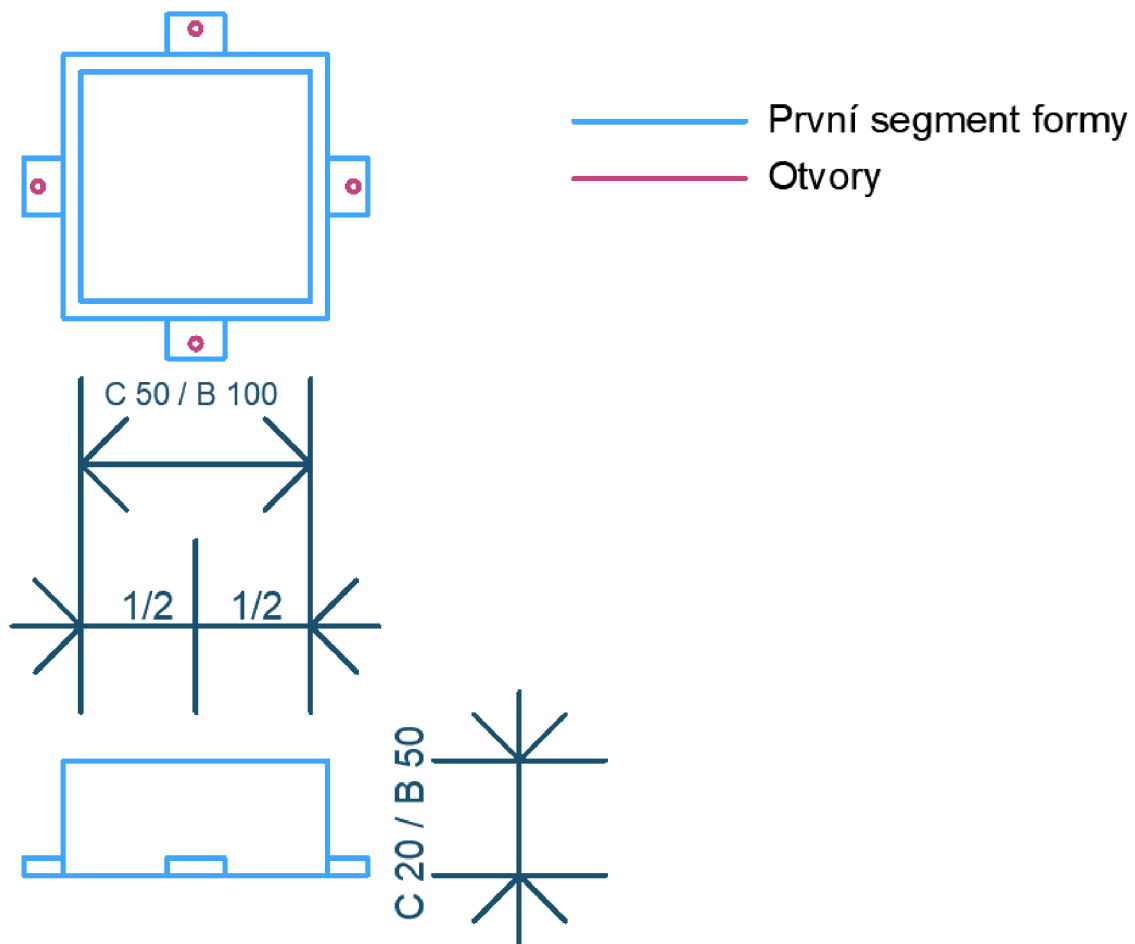
Obrázek 2.6: **Schéma zatěžovací vložky.** Zatěžovací vložka pro simulaci čerpání a vytlačení z trysky.



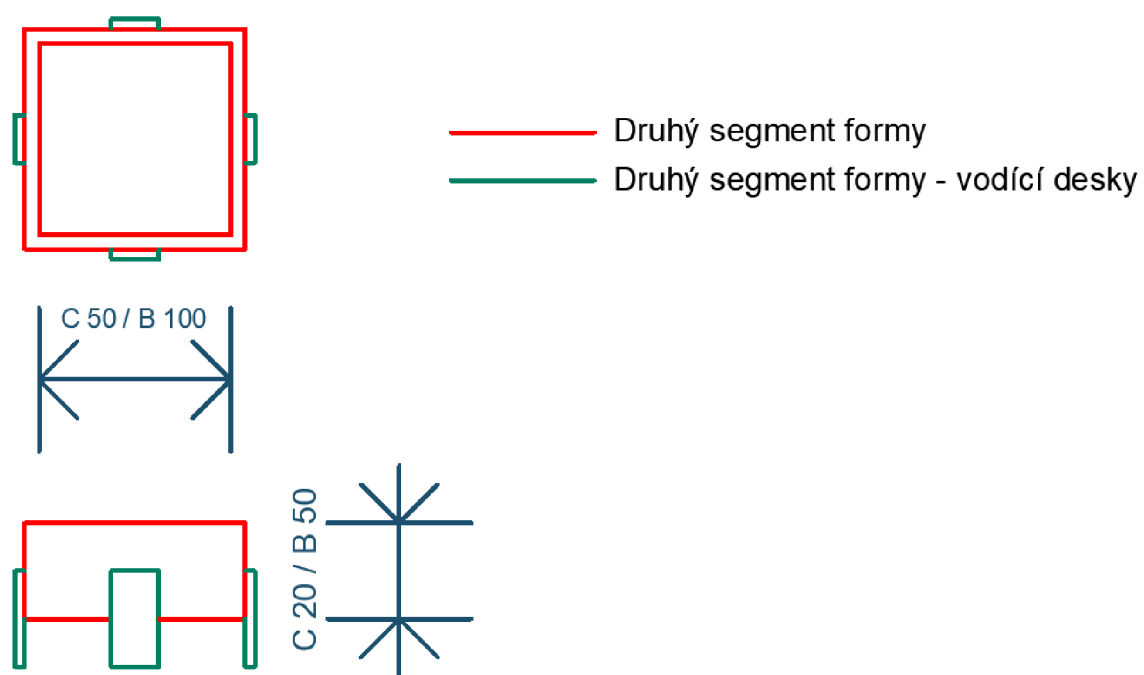
Obrázek 2.7: **Schéma složené formy pro testování spojení dvou vrstev.** Schéma složené formy, kde horní obrázek je pohled kolmo ze shora a dolní z boku.



Obrázek 2.8: **Schéma podkladu formy.** Podklad formy má rozměry v závislosti zda jde o cementovou maltu (C) nebo beton (B). Horní obrázek je pohled kolmo ze shora a dolní z boku.



Obrázek 2.9: **Schéma prvního segmentu.** Schéma prvního segmentu. Horní obrázek je pohled kolmo ze shora a dolní z boku.



Obrázek 2.10: **Schéma druhého segmentu.** Schéma druhého segmentu. Horní obrázek je pohled kolmo ze shora a dolní z boku.

Kapitola 3

Zkušební metody pro 3D tisk v čerstvém stavu

Tato kapitola se zabývá využitím již existujících zkušebních metod pro zkoušení cementové pasty nebo betonu v čerstvém stavu. Zároveň se zabývá i návrhem nových zkušebních metod a případnou modifikací stávajících metod. Dále zde budu zmiňovat metody měření, které by mohly být s výhodou využity v návrhu nového přístupu ke zkušebnictví v kapitole 8.

Některé konvenční metody dokážou získat informace o mezi kluzu, viskozitě a tixotropii a byly použity v technologii 3D tisku. Zároveň byly navrženy metody pro zkoušení vytlačitelnosti a stavitelnosti, které jsou závislé na tiskových parametrech. [3]

Nejjednodušší využívaná metoda je tisk a vizuální posouzení vzhledu a tvaru vrstev. Ovšem jen limitovaný počet výzkumníků využívá hodnot jako jsou mez kluzu nebo používají pouze jednobodové měření, které nezachytí vývoj materiálu v čase. Zkouška stavitelnosti často závisí na empirickém zhodnocení maximálního počtu vrstev (více v kapitole 3.12.2). Jiné zkoušky jsou například jednoosý tlakový test, triaxiální tlakový test nebo měření ultrazvukem, který je ovšem nutné kalibrovat pro každou recepturu. [6]

Zároveň byly vyvinuty metody pro sledování parametrů v reálném čase založeny na parametrech z tiskárny, ale je zapotřebí navrhnout systém, který bude na základě těchto parametrů modifikovat tiskové parametry. Celkově je ovšem potřebné vytvořit standardy pro testování. Tímto tématem se zabývám společně s komisí Rilem, které jsem se stal součástí. Postup je ovšem pomalý a tato práce tedy nečerpá z poznatků této komise, ale autoři některých využitých zdrojů jsou součástí této komise. [6],[3]

3.1 Vicatův přístroj

Vicatův přístroj by šlo využít pro tradiční měření počátku a konce tuhnutí. Tuto zkoušku zde nebudu příliš rozebírat. Při měření reálně tisknuté směsi, která byla úspěšně tisknuta ve společnosti ICE, jsem narazil na zásadní problém. Dokázal jsem zjistit pro dané směsi počátek a konec tuhnutí, ale zároveň bych se odvážil tvrdit, že tyto hodnoty by ani zdaleka neodpovídaly výsledkům, které by byly naměřeny, pokud by stejná směs nebyla míchána v laboratoři, ale byla by odebrána na hlavici 3D tiskárny.

Tento rozdíl by byl způsoben zejména rozdílnou teplotou směsí. Rozdílná teplota se v tomto případě projeví velice výrazně a to z důvodu využití velkého množství urychlovače. Během tisku v jednom případě toto mělo za následek ucpání čerpací hadice. Toto ucpání bylo způsobeno zvýšenou teplotou směsi, která byla na začátku zahřívána třením ve šneku,

což vedlo k rychlejší reakci směsi a k zahřívání, toto dále zvedalo teplotu šneku a celé čerpací soustavy což dále urychlovalo reakci. Nakonec došlo tímto postupným nabýváním teploty k ucpání hadice. K nárůstu teploty na kritickou hranici došlo přibližně po hodině tisku, ale je přítomna již od začátku. Zároveň je důležité podotknout, že tento problém nastal, protože urychlovač byl přímo v čerpané směsi a v hlavici už žádný přidávaný nebyl. V ideálním případě by byl navržen Vicatův přístroj, který dokáže temperovat vzorek na různé teploty a to velmi rapidně.

Zároveň Vicatův přístroj nedokáže změřit mez kluzu, která má určující parametry v prvních počátcích, když materiál vypadne z hlavice. Se změnou jehly za kužel případně válec nebo jiný tvar, by ale z teoretického pohledu měl být schopný tuto hodnotu aproximovat pomocí výpočtového modelu, případně pomocí simulace (více v kapitole 8). Zkouška penetrační pomocí kuželového hrotu byla použita pro změření penetrace. Tato hodnota byla využita pro porovnání různých receptur (graf 5.14(a)). [2] Tyto verze ovšem nebyly zatím otestovány prakticky a vzhledem k množství dat nutných pro kvalitní zpracování by to ani nebylo možné v rámci této práce provést a bude tak mým cílem budoucího výzkumu.

3.1.1 Vyhodnocení

Zápis z Vicatovy zkoušky, ať už klasické, či modifikované by byla tabulka. V této tabulce by byl čas a hloubka vpichu. Zpracování by pak proběhlo pro klasické stanovení počátku a konce tuhnutí. Pro modifikovanou verzi by bylo pomocí modelu nebo simulace možné odečíst parametry i jako je mez kluzu, případně i možná další, na které by mohl přijít budoucí výzkum.

3.1.2 Cíl zkoušky

Zkouška by sama o sobě sloužila k vývoji urychlovače (nebo přísad). V kombinaci s daty z ostatních zkoušek by mohla sloužit pro vytvoření modelu a následně pak aproximovat například i hodnoty:

- Kdy vrstva po tisku bude držet tvar.
- Kdy vrstva dokáže přenést další vrstvu.
- Mez kluzu.
- Jak velká je tixotropie.

3.2 Kalorimetr

Tato zkouška už byla využita v bakalářské práci [4] a ukázala se jako praktická pro porovnání různých urychlovačů a jejich prvotní vývoj. Zkoušku je ovšem problematické provádět z důvodu citlivosti času umístění vzorku do měřicího zařízení. V budoucnu je třeba na to brát větší ohled pro zvýšení přesnosti měření. Zároveň by tato zkouška mohla být využita pro odhalení rychlosti reakce za různých teplotních podmínek, ale to by musela být celá měřicí soustava temperována a bylo by nutné měřit teplotu vzorku a prostředí odděleně.

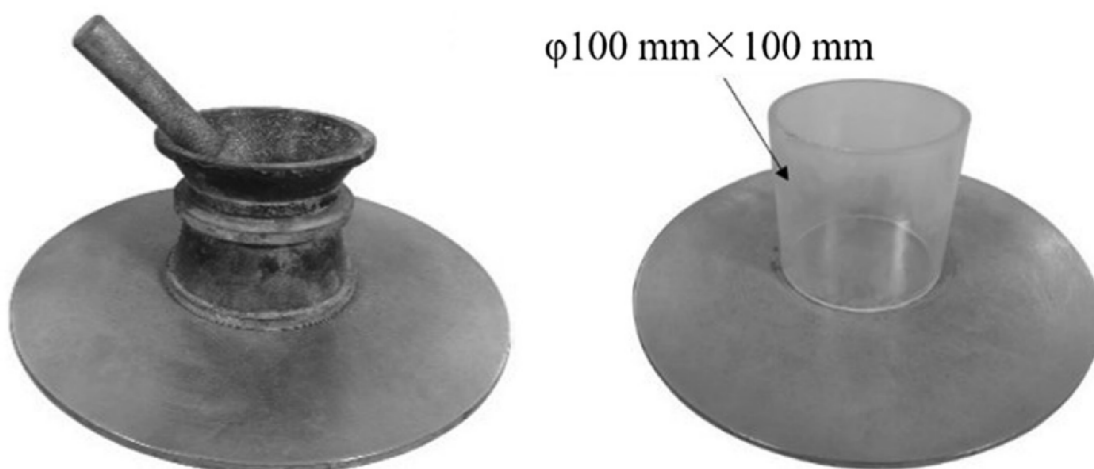
Zároveň je otázkou, zda by výše uvedená temperovaná Vicatova metoda nebyla pro toto měření vhodnější, ale tato zkouška by oproti temperovanému Vicatu dokázala změřit i vývoj hydratačního tepla, který by mohl být kritický pro vývoj vhodné receptury, která by byla objemově stálá a dokázala zadržet vodu pro samošetřování.

3.3 Střásací stolek nebo Abramsův kužel

V práci pro zkoušení navržených receptur a již namíchaných suchých směsí od výrobců *Mapei* a *Master Builders Solutions* byl využíván pouze střásací stolek. Abramsův kužel zde uvádím pro zkoušení receptur s většími zrny kameniv, které zatím nebylo nutné zkoušet.

Na rozdíl od normy byl střásací stolek střásán 25krát. Toto rozhodnutí bylo provedeno z důvodu vysoké meze kluzu, viskozity a tixotropie, kdy více otřesů způsobilo větší rozlití a bylo tak možné rozeznat menší změny u stejné receptury. Stejný postup měli i autoři prací, ze kterých jsem čerpal. Další možnou modifikací je využití většího tělesa, jeden takový návrh je na obrázku 3.1. [7]

Na základě této zkoušky byl prováděn návrh receptury pro 3D tisk. Tato myšlenka ovšem nebere v potaz, že různé kombinace meze kluzu, viskozity a tixotropie mohou mít stejné měřené rozlití, ale zároveň se budou chovat jinak. [3]



Obrázek 3.1: Střásací stolek a jeho modifikace. Vlevo je tradiční těleso a vpravo je modifikované těleso. [7]

3.3.1 Problém

Použitý postup pro návrh receptury byl takový, že jsem znal vhodné rozlití suché směsi Mapei před čerpáním (mezi 130 až 140 mm) a mnou navrhovanou recepturu, kterou jsem navrhoval na toto rozlití. Tento postup je ovšem špatný. Pro správné provedení by bylo zapotřebí otestovat navrženou recepturu, postupně měnit množství vody a pokusit se ji tisknout a zároveň kontinuálně měřit rozlití na stolku pro tuto recepturu. [3] Detailněji se návrhu věnuji v kapitole 7. Zkouška by pak ovšem sloužila pouze pro kontrolu, zda je namíchaná série receptury stále v tisknutelném rozmezí.

Dalším problémem je, že vzhledem k vysoké viskozitě se receptury mohou chovat velice podobně a mít obdobné roztečení. V takovém případě pak tato metoda není dostatečně přesná pro měření čerpatelnosti receptury. [7]

3.3.2 Řešení

Jak je zmíněno výše, tak různé kombinace meze kluzu, viskozity a tixotropie mohou mít stejné finální rozlití. Zároveň ovšem z provedení velkého množství zkoušek lze pozorovat

rozdílný styl roztékání a celkové chování. Toto vedlo k myšlence umístění lidar kamery (jedná se o kameru zaznamenávající i hloubku snímků, vytváří tak 3D síť) nad střešací stolek. Tato kamera by kontinuálně snímala vzdálenost a tak tedy i změnu tvaru (nebo plochy) vzorku na střešacím stolku. Toto měření by pak bylo porovnáváno se simulací (více v kapitole 8) a bylo by teoreticky tak možné na základě této zkoušky získat přímo hodnoty meze kluzu, viskozity a tixotropie.

Dále by se tato zkouška dala modifikovat umístěním závaží různých tvarů a hmotností na vrchol tělesa a dále provést zkoušku tradičně. Následně opět hodnoty z měření lidar kamery porovnat se simulací. Tato modifikace by měla za cíl změnit poměr mezi kluzem, viskozitou a tixotropií a zpřesnit tak aproximaci.

Další modifikací by mohla být například kontrola nad výškou střešání stolku, které by opět mohlo změnit poměr mezi kluzem, viskozitou a tixotropií a dále tak zpřesnit aproximaci.

Této části a vysvětlení se hlouběji věnuji v kapitole 8.

3.4 Kombinace střešacího stolku a modifikace Vicata

Kombinací penetrační zkoušky kuželem pomocí Vicata a roztečení na střešacím stolku umožňuje porovnávat různé receptury. Na obrázku 3.2 jsou vyfocené příklady těchto zařízení. Zároveň s periodickým měřením je možné definovat vývoj parametrů receptury v čase. Ukázka takového měření je v grafu 5.14(a). [2]



Obrázek 3.2: Střešací stolek a penetrace. Na obrázku vlevo je výsledek a zkouška na střešacím stole a vpravo je ukázka penetračního zařízení. [2]

3.5 Konzistoměr (navržený přístroj)

Tento návrh vychází z konstrukce a fungování Vicatova přístroje, ale nemá za cíl měření časů počátku a konce tuhnutí, ale hodnotu meze kluzu a tixotropie. Zároveň cílem bylo

vyřešit nevýhodu Vicatova přístroje, kterou je doba mezi mícháním a počátkem měření, způsobena nutností přípravy vzorku.

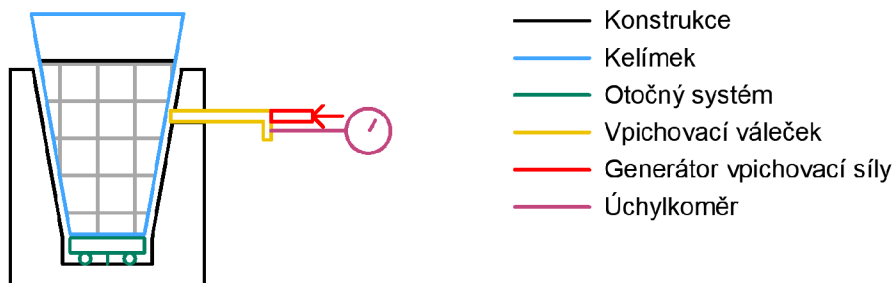
Přístroj se skládá z pevné konstrukce, do které se vloží kelímek. Dále z otočného systému, který otáčí kelímkem po každém měření, aby došlo ke snížení rizika měření trhlin. Z vpichovacího válečku, který je napojen na generátor vpichovací síly, což může být například mechanický nebo pneumatický systém a z digitálního úchylkoměru. Schéma zařízení je na obrázku 3.3.

Příprava směsi proběhne zamícháním v plastovém kelímku. Tento kelímek se vloží do přístroje a spustí se měření. Měření probíhá ve volně nastavitelných intervalech. Zařízení má maximální hloubku vpichu 3 mm a maximální sílu vpichu válečku až 50 N (tuto hodnotu bude třeba ověřit experimentálně nebo simulací). Zařízení zaznamenává hloubku vpichu a maximální sílu vpichu.

Důležité je poznamenat, že je potřebné vždy využít stejný plastový kelímek. Dále je navržena kalibrace přístroje na základě měření plastového kelímku s vodou a se zatvrdlým materiálem. Zároveň by toto zařízení v závislosti na velikosti mohlo sloužit pro měření jak cementových past, tak i betonů.

V kombinaci se simulací (více kapitola 8) by tato metoda mohla sloužit k aproximaci:

- Kdy vrstva po tisku bude držet tvar.
- Kdy vrstva dokáže přenést další vrstvu.
- Mez kluzu.
- Jak velká je tixotropie.



Obrázek 3.3: Schéma konzistoměru. Řez konzistoměrem.

3.6 Zkušební lis

Pro měření vzorků v čerstvém stavu by byl využit citlivý zkušební lis, který se tradičně užívá pro měření plastů a dřeva. Do tohoto lisu by byl vložen vzorek jedné vrstvy vytvořený postupem uvedeným výše (v kapitole 2.3) a byla by měřena deformace v závislosti na zatížení do totální deformace a to ihned po vytvoření nebo zatěžování v čase kladení další vrstvy, případně v jiných časech. Dále kamera sleduje deformaci po délce vrstvy, tato deformace může poukazovat na chování receptury pod zátěží.

Jak je naznačeno, tak tento lis podporuje vytvoření programu, který by dokázal simulovat (schodové) zatížení od kladení jednotlivých vrstev v definovaných časových intervalech. Bylo by tak možné díky tomuto programu vyzkoušet navrhlé časy pro kladení vrstev. [3]

3.7 Pískový lis (navržený přístroj)

Tento navržený přístroj vznikl pro možnost měření většího množství vzorků najednou, díky levné konstrukci oproti tradičnímu lisu. Navíc výhodou je možnost jednoduchého transportu tohoto zařízení. Nevýhodou je menší přesnost měření oproti tradičnímu lisu.

Přístroj se skládá z desky s prostorem pro umístění podložky uvedené v kapitole 2.3. V rozích této desky jsou tyče pro vedení zatěžovací desky, aby byla co nejvíce rovnoběžná s podložkou. Znázorněno na obrázku 3.4 Po stranách jsou na samostatné konstrukci umístěné dva úchylkoměry s digitálním záznamem pro měření deformace. Dále je využita kamera pro sledování tvaru deformace v délce vrstvy, tato deformace může poukazovat na chování receptury pod zátěží.

Zatěžovací deska je tenký a lehký plech (obrázek 3.5), ve kterém jsou otvory pro vodící tyče a pro umístění zatěžovacích nádob (obrázek 3.6). Pomocí lisu jsou prováděny dvě zkoušky:

1. První metoda zkoušení slouží pro zjištění maximálního zatížení čerstvé vrstvy. Schéma je na obrázku 3.7. Zatěžovací nádoba je obdélníková a je do ní postupně ze zásobníku sypán písek a sleduje se deformace zkoušené vrstvy v čase. Zásobník je umístěn na závěsné váze (schéma na obrázku 3.8), která kontinuálně měří úbytek hmotnosti v zásobníku a zaznamenává ho.
2. Druhá metoda zkoušení slouží pro zjištění informací o době cyklu kladení vrstev. Schéma je na obrázku 3.9. V tomto měření je použito více zatěžovacích nádob, ve kterých je umístěn písek tak, aby celková hmotnost nádoby a písku odpovídala hmotnosti další vrstvy. Na tuto nádobu jsou umísťovány další nádoby opět s celkovou hmotností další vrstvy. Jedná se o simulaci kladení navazujících vrstev v pravidelných časových intervalech. Zároveň je sledována deformace zkoušené vrstvy.

3.8 Zkouška odkapáváním

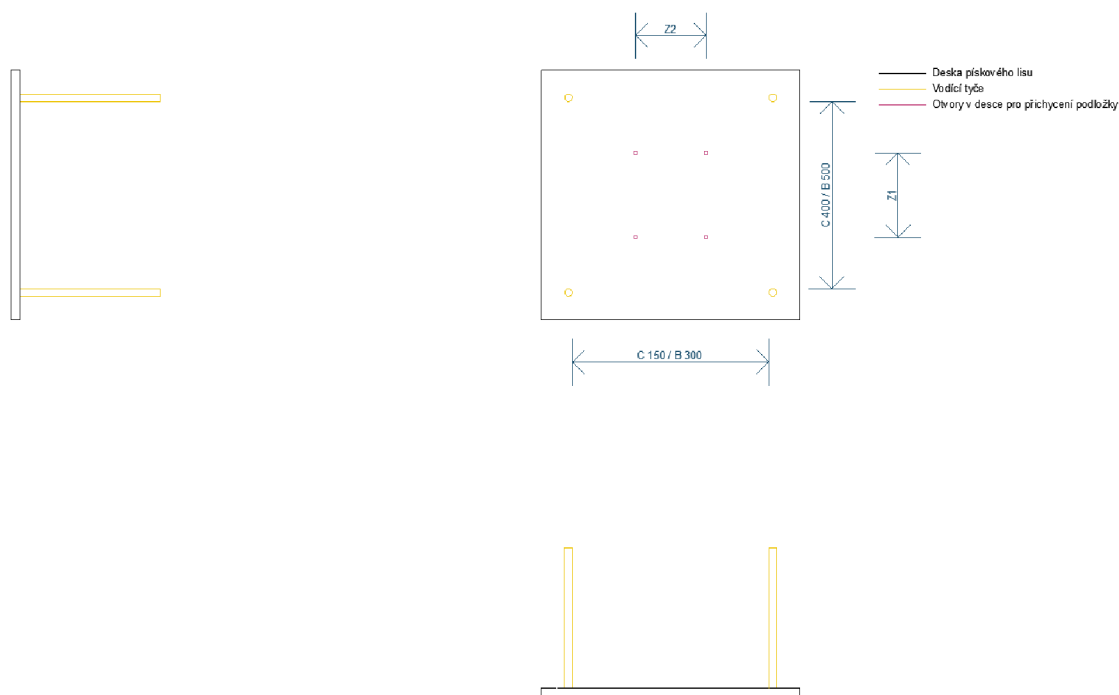
Zkouška odkapáváním je vhodná metoda pro zkoušení konzistence v laboratorních podmínkách. V navržené verzi (obrázek 3.10(a)) ovšem nelze simulovat přimíchání urychlovače v trysce. Pro umožnění této simulace by bylo potřebné nahradit nádrž s písem za plnohodnotnou tiskovou hlavici umožňující dávkování urychlovače. Mohla by to tedy být i vhodná metoda pro vývoj takové tiskové hlavice. [8]

Pro tuto zkoušku je dále nutná citlivá váha se záznamem, která je umístěna pod nádobou, kam odkapává materiál. [8]

V práci autora Ducoulombier, N. et al. [8] je demonstrováno měření a je vypočítána statistická závislost a přesnost této zkoušky. Pro přesné stanovení meze kluzu směsi je třeba provést alespoň 30 samostatných měření. Jedním měřením je myšleno odkápnutí jedné kapky. Dále bylo poukázáno, že vliv na tuto zkoušku mají dva parametry mimo složení receptury a to:

1. rychlost vytlačení materiálu a
2. rozměr trysky.

Pro stanovení jak tyto parametry ovlivňují zkoušku je ovšem potřebný další výzkum.



Obrázek 3.4: **Schéma desky s vodícími lištami.** Schéma desky s vodícími lištami.

Na obrázku 3.10(b) je příklad naměřených hodnot z manuálního měření a z měření s využitím 3D tiskárny. Na obrázku 3.10(c) je pak ukázka parametrů nutných pro stanovení výsledků a fotky odkapávání stejné receptury, pouze se změnou dávky urychlovače.

Výsledky zkoušky a použitá receptura, na které byla zkouška prováděna je v tabulce 5.2 v kapitole 5.4.

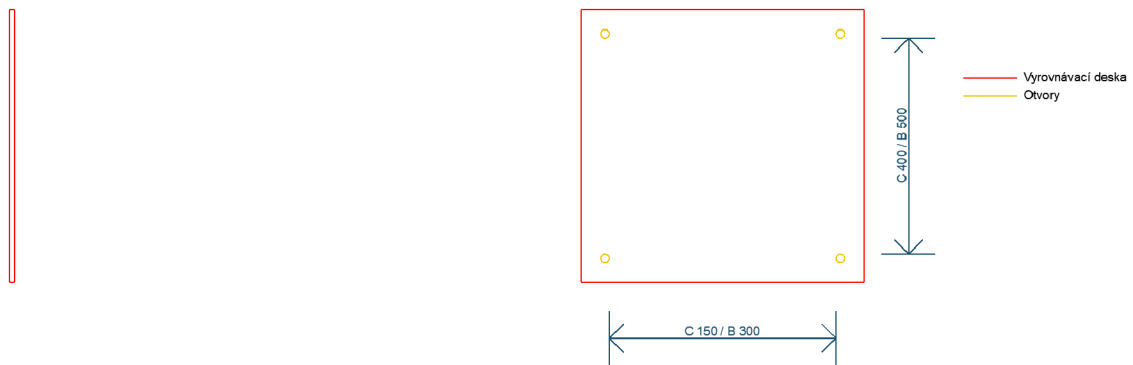
3.9 Testování odolnosti vůči deformaci

Tato zkouška je naznačena již v kapitole 3.6 a 3.7. V této části se ovšem věnuji třetí variantě, která byla navržena autorem Ye, J. et al. [2] a nepotřebuje k uskutečnění 3D tiskárnu.

Zkouška se provádí na tělese tvaru zkoseného válce o výšce 100 mm, dolním průměru 120 mm a horním průměru 100 mm. Po vytvoření tohoto tělesa je ihned umístěno na jeho vrchol závaží o hmotnosti 1 kg. Výsledkem zkoušky je deformace a změna výšky tělesa. Čím menší změna, tím lepší stavitelnost. Autoři limitovali zmenšení výšky tělesa na hodnotu 5 mm, pokud zmenšení bylo vyšší, tak receptura nevyhověla. Fotka této zkoušky je na obrázku 3.11. [2] Metoda zatížení vzorku byla navržena i v kapitole 3.3 pro zjištění jiných parametrů, v rámci efektivity by bylo vhodné tyto dvě zkoušky zkombinovat.

3.10 Ultrazvuk

Další možností je měření ultrazvukovými pulsy, které dokáží posoudit elastické vlastnosti. Takovéto měření je ovšem kvalitativní a je potřebná kalibrace pro každou recepturu. Bylo by to tak vhodná metoda pro ověření vlastnosti pro zařízení využívající stále stejné materiály a recepturu. [8]



Obrázek 3.5: **Schéma zatěžovací desky.** Zatěžovací deska je tenký a lehký plech s otvory pro vodící tyče a pro umístění zatěžovacích nádob.

3.11 Smrštění

Receptury pro 3D tisk mají vysoký obsah jemných podílů oproti tradičním betonům, je tak třeba dbát větší důraz na smrštění. Zároveň oproti tradičním betonům 3D tisk vystavuje prvek vyšší rychlosti vysychání, protože je celá plocha vystavena během tisku vzduchu. Tyto dva faktory tak vedou k nutnosti výzkumu smrštění navržených receptur. Pouze málo studií se ovšem této problematice věnuje. Celkově by se dalo říci, že pouze málo prací se věnuje trvanlivostem 3D tisku a všichni se snaží zatím vyřešit problematiku tisku. Tato oblast je, ale ovšem velice důležitá a vyžaduje budoucí výzkum.

Vhodná metoda pro zkoušení smrštění by mohla být metoda dle normy ČSN EN 12617-4 (732128) Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí - Zkušební metody - Část 4: Stanovení smršťování a rozpínání. [6]

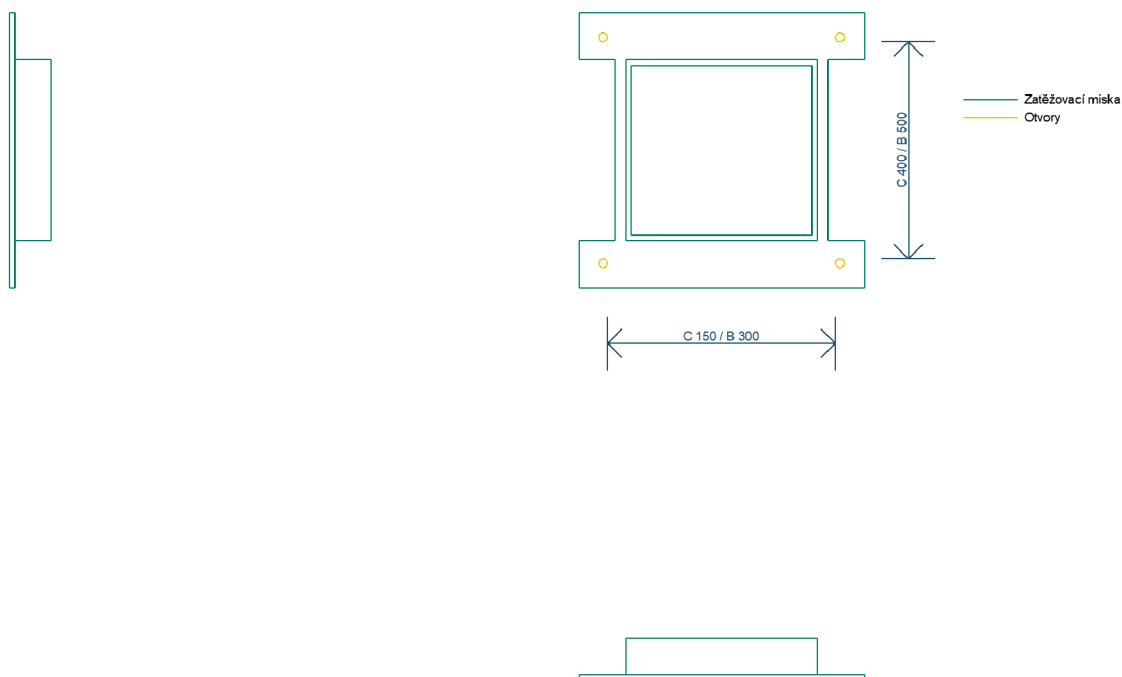
3.12 Testování pomocí 3D tiskárny

Testování pomocí 3D tiskárny obvykle probíhá praktickým tiskem a měřením výsledného vytištěného prvku, případně odečítáním parametru měřené někde na 3D tiskárně.

Jedna metoda testování viskozity s využitím 3D tiskárny už je probírána v kapitole 3.8, více se k ní tedy nebudu v této kapitole zmiňovat.

3.12.1 Definice parametrů receptury tiskem

Tiskárny využívané v 3D tisku jsou ve své podstatě systémy, ze kterých lze sbírat velké množství dat. Například teplota směsi a okolí, tlak v potrubí, rychlost tisku, rychlost čerpání a mnoho dalších. Na základě těchto parametrů by pak mělo být možné určit materiálové



Obrázek 3.6: Schéma zatěžovací nádoby.

vlastnosti. Tento přístup je ovšem zatím pouze v počátcích a je nedokonalý. [8] Více se mu věnuji v kapitole 8.

3.12.2 Testování deformace tvaru vrstvy

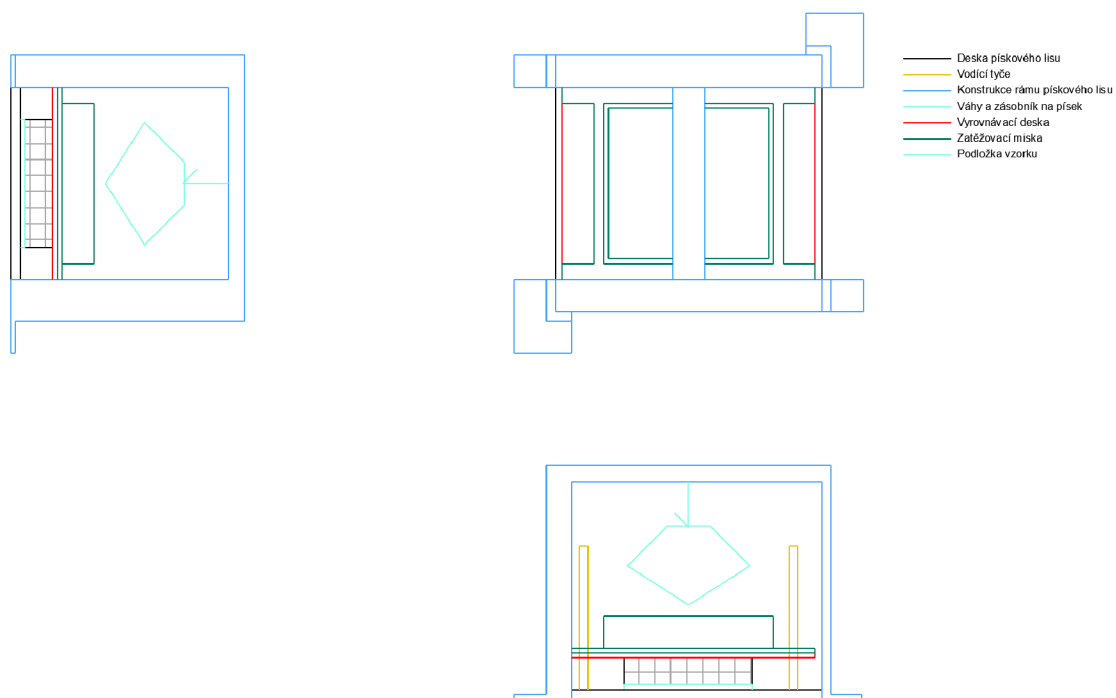
Deformace tištěné vrstvy může být způsobena mnoha důvody. V této části se ovšem zajímám o deformaci vlivem materiálu. Nejjednodušší metoda zkoušení je tisk a sledování změny rozměrů vrstev oproti velikosti trysce a nastavené výšce pohybu tiskárny. Jedná se tedy o vizuální posouzení, jak vypadají jednotlivé vrstvy a změření jejich rozměrů v průběhu zkoušky. Tato metoda je naznačena fotkou na obrázku 3.12(a) a schématem na obrázku 3.12(b). Zároveň pomocí této zkoušky lze zjistit maximální počet vrstev tisku. [7],[3]

Tato zkouška je ovlivněna nejen materiálovými parametry, ale i parametry tiskárny jako jsou:

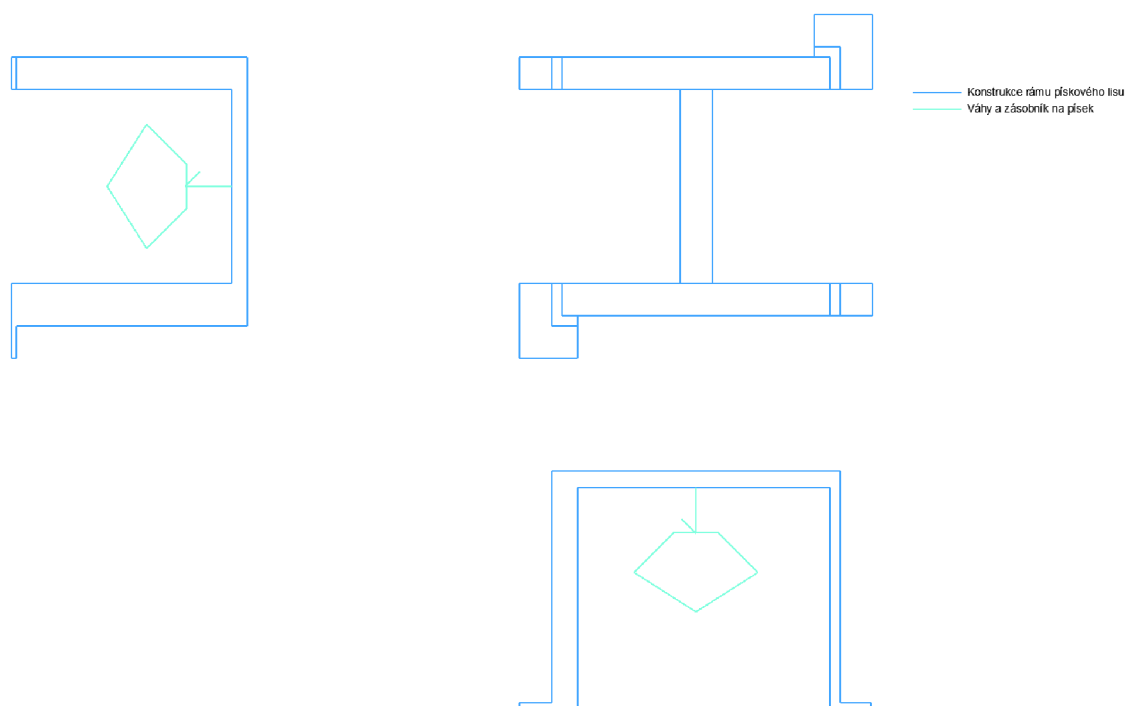
- rychlost kladení dalších vrstev,
- rychlost tisku,
- výška jednotlivých vrstev,
- rozměr a tvar tiskové hlavičky a
- mechanická přesnost tiskárny.

Metodou pokus omyl lze tak zjistit pro receptury jaké parametry jsou vhodné.

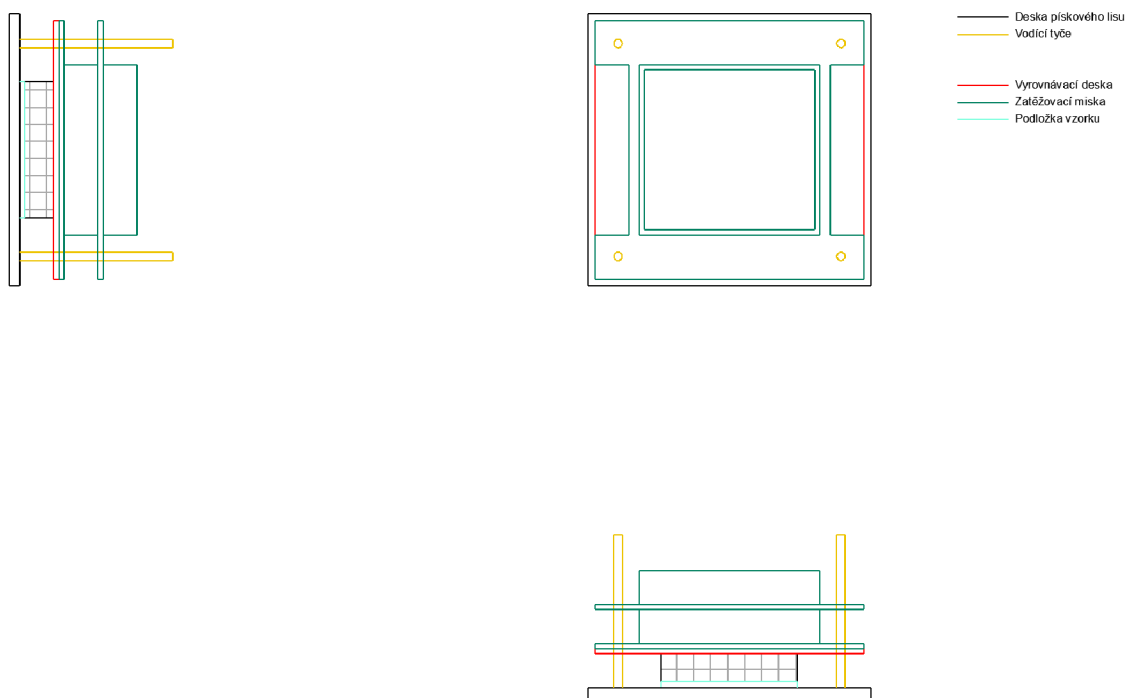
Zkoušení tímto způsobem je jednoduché a elegantní. Problémem ovšem je, že není nijak standardizováno a vyhodnocení každého týmu tak probíhá odlišně, což vede k výsledkům, které nejdou porovnat mezi sebou. Je to problém obdobný i u většiny ostatních zkoušek 3D tisku a nejspíše ho vyřeší pouze čas a spolupráce výzkumných týmů. [7],[9],[3]



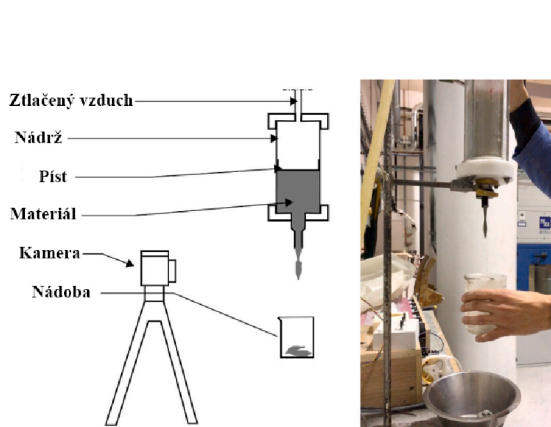
Obrázek 3.7: **Schéma složeného pískového lisu pro první metody.** První metoda zkoušení slouží pro zjištění maximálního zatížení čerstvé vrstvy.



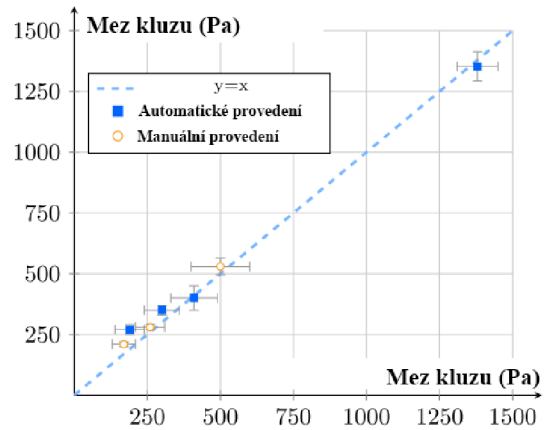
Obrázek 3.8: **Schéma konstrukce zásobníku s pískem.** Schéma konstrukce zásobníku s pískem zavěšeném na váze.



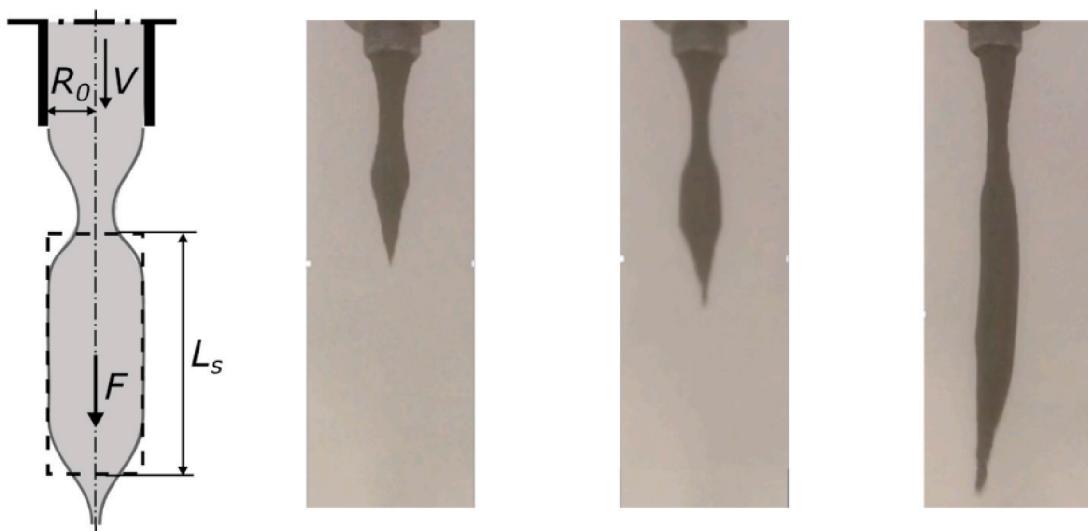
Obrázek 3.9: **Schéma druhé metody.** Schéma druhé metody ve fázi zatížení dvěma vrstvami.



(a) Schéma zkoušky odkapávání.

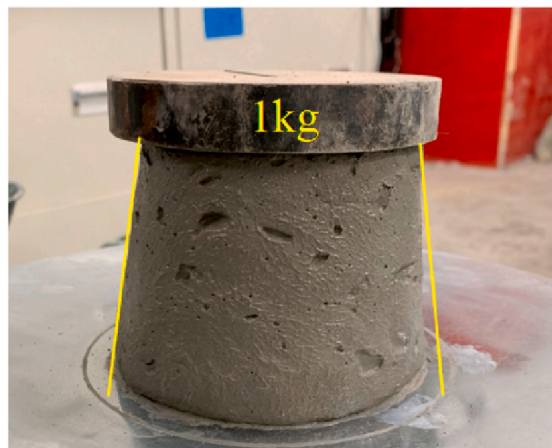


(b) Výsledky zkoušky provedené manuálně nebo pomocí 3D tiskárny.

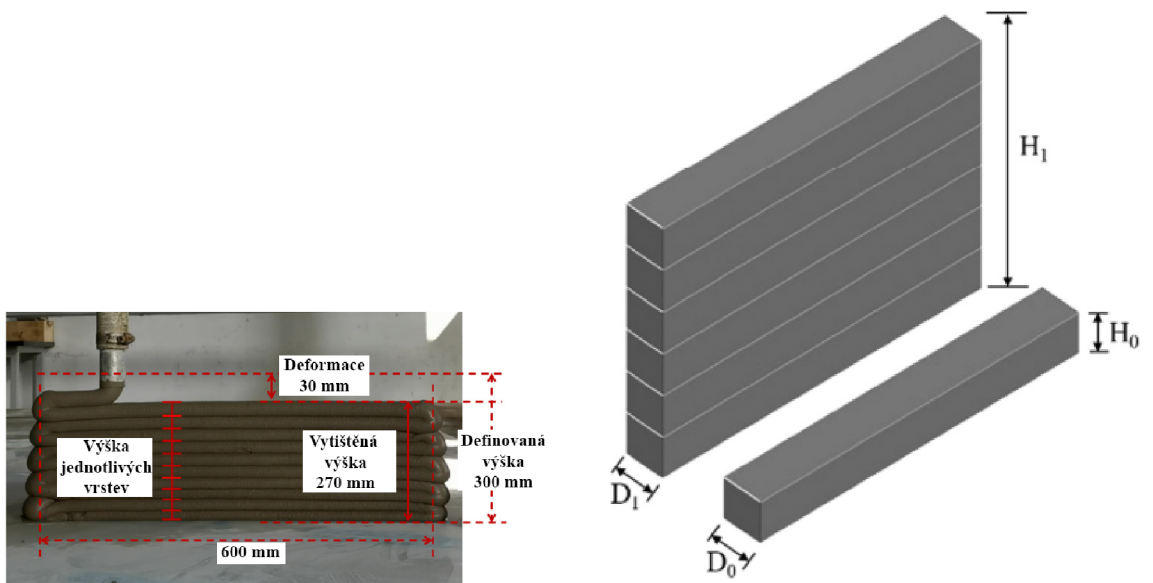


(c) Definice parametrů pro měření. V levo schématické znázornění a následně z od ruhého obrázku bylo v trysce přidáno dávkování urychlovače a lze tak sledovat vývoj viskozity pomocí této zkoušky.

Obrázek 3.10: **Zkouška odkapávání.** Na obrázku je schématické znázornění jak se zkouška provádí a jaké parametry se sledují pro vyhodnocení. [8]

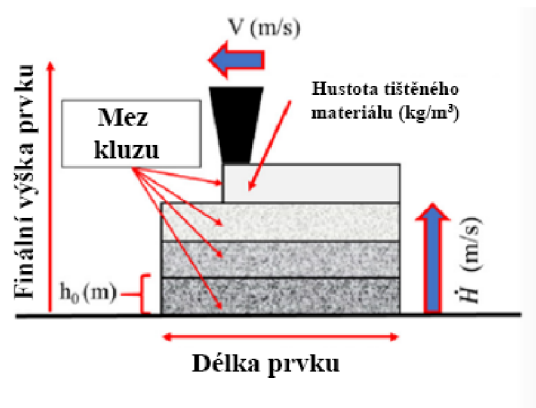


Obrázek 3.11: **Zkouška stavitelnosti.** Na obrázku je znázorněna metoda zkoušení stavitelnosti bez 3D tiskárny. [2]



(a) Reálná fotka deformace vrstev oproti výšce tisku definované robotem. [3]

(b) Schématické naznačení testování deformace vrstev. [7]



(c) Schématické znázornění parametrů působících na deformace vrstvy. [9]

Obrázek 3.12: **Deformace výšky vrstvy při tisku.** Na obrázku je fotka, schéma deformace vrstev a znázornění parametrů ovlivňujících deformace.

Kapitola 4

Zkušební metody pro 3D tisk v zatvrdlém stavu

Receptury pro 3D tisk lze rozdělit na vzorky vyrobené laboratorně a pomocí 3D tiskárny. Více byla tato problematika popsána v kapitole 2.2. Zároveň vzhledem k anisotropii je potřebné zkoušet více vzorků než u tradičních betonů. Navíc kvůli přípravě vzorků může dojít k jejich poškození a je tedy nutné jich otestovat více i z tohoto pohledu. Pro zkoušení jinak lze použít tradiční zkušební metody. [2],[6]

4.1 Zkoušení pevností

Zkoušení pevností je třeba provádět na vzorcích vyrobených odlitím do forem, které je potřebné porovnat se vzorky nařezanými z vytištěné konstrukce. Vzorků z tištěné konstrukce zároveň musí být více, kvůli možnému poškození a anisotropii. Anisotropie vzorků z 3D tisku je nejspíš způsobena možností většího obsahu vzduchu v prostoru mezi vrstvami. Tato oslabená zóna vede ke koncentraci napětí, které pak vede ke snížení pevností. Pro přímé stanovení tohoto oslabení lze využít pevnost v tahu. [6] Dále tato oslabená zóna vede ke snížení trvanlivostí. Zároveň dalším oslabením je vznik mikrotrhlin, během vysychání a tvrdnutí směsi, které vedou ke snížení pevností zejména v tahu za ohybu. [6],[3]

Seznam pevností, které lze zkoušet:

- Pevnost v tlaku v různých směrech na vzorcích vyřezaných v čerstvém i zatvrdlém stavu.
- Pevnost v tahu (síla spojení jednotlivých vrstev).
- Pevnost ve smyku (síla usmyknutí jednotlivých vrstev).
- Pevnost tří (čtyř) bodovým ohybem.
- Modul pružnosti.

4.1.1 Pevnost v tlaku

Na obrázcích 4.1 je schematické zobrazení zkoušení vzorků v tlaku. Jak je vidět, lze zkoušet pevnost v mnoha směrech a je důležité u konstrukcí vytištěných 3D tiskem s těmito různými směry počítat. Směry zatěžování budou mít i důležitý dopad na návrh konstrukcí v rámci

statických působení. V současné době není standardizovaný rozměr vzorků pro zkoušení ani jejich směr zatěžování. [3],[10]

4.1.2 Pevnost v tahu ohybem

Pevnost v tahu ohybem má více možných směrů zkoušení než pevnost v tlaku, jak je vidět z obrázků 4.2. Pevnost v tahu ohybem je závislá i na soudržnosti vrstev. [10],[9],[3]

4.1.3 Pevnost v tahu

Pevnost v tahu je u 3D tisku důležitější parametr, než u tradičních metod. Tato důležitost je způsobena tiskem z tenkých vrstev a nutnosti otestování jejich soudržnosti. Možnosti a zkouška jsou zobrazeny na obrázcích 4.3.

4.2 Porozita vytištěného materiálu

Množství pórů v konstrukci z 3D tisku je otázkou několika studovaných prací. Výsledky jsou smíšené, kdy některé práce ukazují, že vytištěný materiál má menší obsah pórů než odlitý materiál díky tlaku čerpání a tlaku při vytlačení z trysky. Jiné ovšem naznačují, že má větší pórovitost. Shodují se ovšem, že místo kontaktu vrstev má vyšší pórovitost než okolní materiál. Toto lze pozorovat na obrázku 4.4, obrázek byl získán analýzou výsledků z průmyslového tomografu. [7],[5],[6],[3]

4.3 Trvanlivost vytištěného materiálu

Mezi trvanlivostní zkoušky, které bude nutné na vytištěném materiálu zkoušet jsou:

- mrazuvzdornost,
- obrusnost,
- chemická koroze,
- koroze výtuzí,
- požární odolnost.

Tyto zkoušky budou prováděny dle postupů platných norem, ale je třeba dbát i na různé směry možnosti zkoušení.

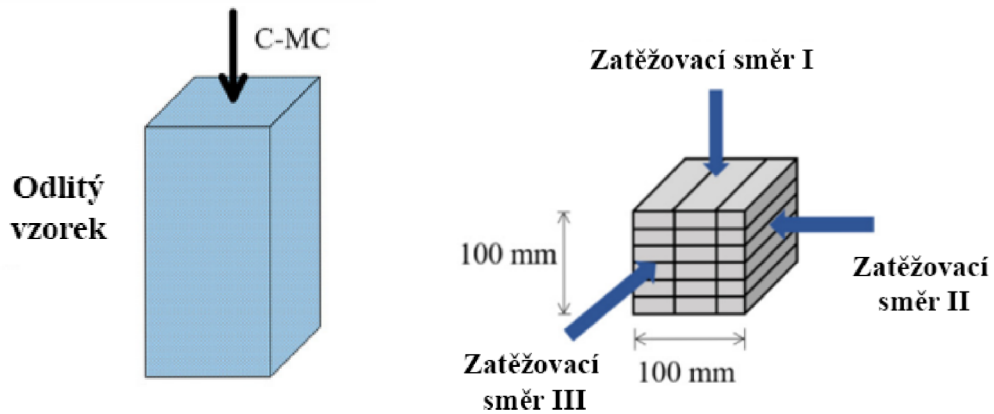
Trvanlivostními zkouškami se v rámci této práce nezabývám a jejich definice bude cílem budoucího výzkumu.

4.4 Další zkoušky

Mezi další zkoušky se řadí:

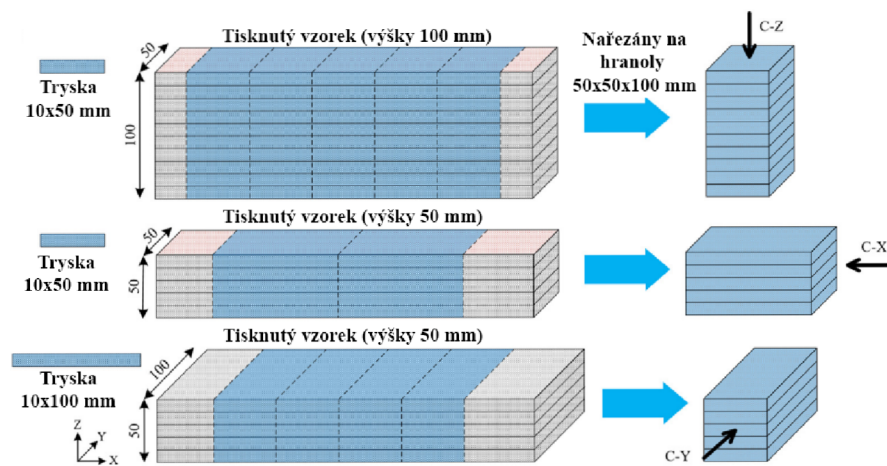
- vodotěsnost,
- zkoušky dotvarování a
- smrštění (více v kapitole 3.11).

Případně lze provádět i další tradiční zkoušky dle platných norem, ale je třeba dbát důraz na vyzkoušení různých směrů vzorků.

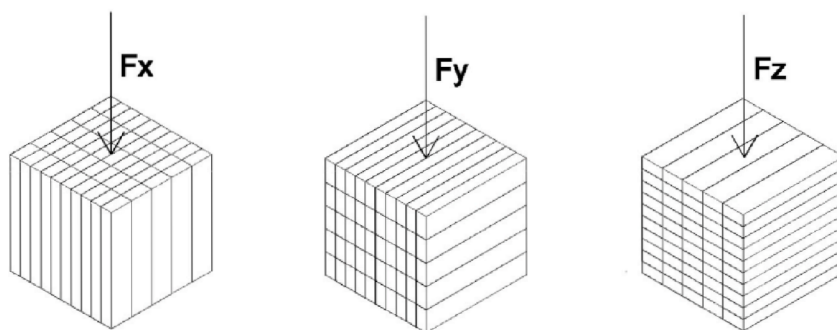


(a) Vzorek vytvořený ve formě a směr zkoušení. [10]

(b) Vyřezaný vzorek z 3D tisku a směry zatěžování pro pevnost v tlaku. [3]

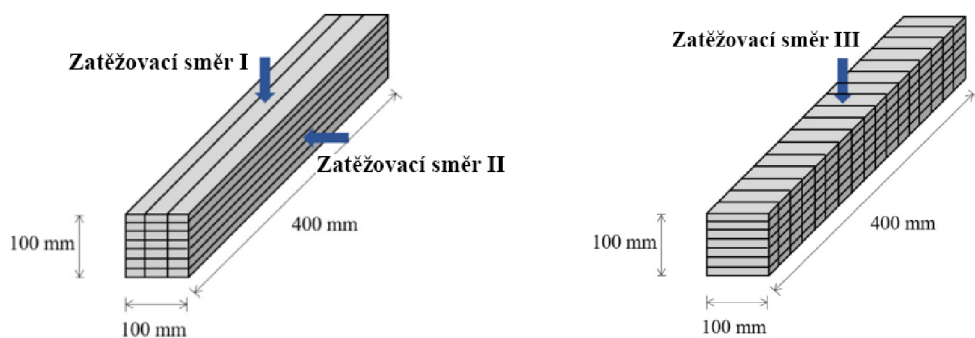


(c) Vyřezaný vzorek z 3D tisku a směry zatěžování pro pevnost v tlaku. [10]



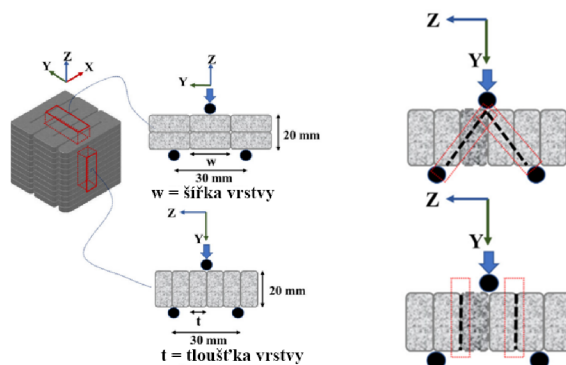
(d) Vyřezaný vzorek z 3D tisku a směry zatěžování pro pevnost v tlaku. [11]

Obrázek 4.1: Možnosti vyřezání vzorků a směry zkoušení pro pevnost v tahu.



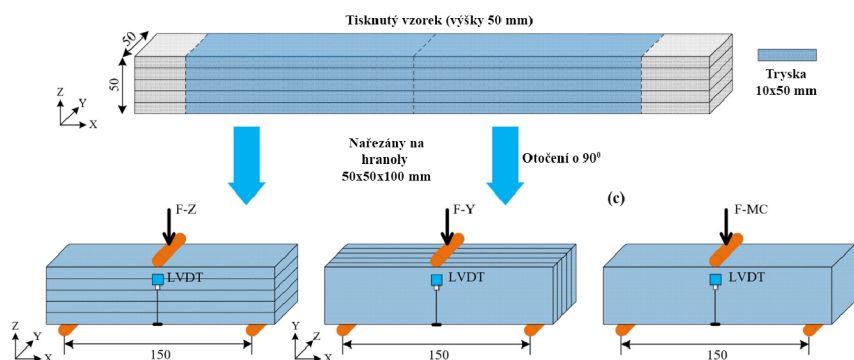
(a) Vyřezaný vzorek z 3D tisku a směry zatěžování pro pevnost v ohybu verze jedna. [3]

(b) Vyřezaný vzorek z 3D tisku a směry zatěžování pro pevnost v ohybu verze dva. [3]

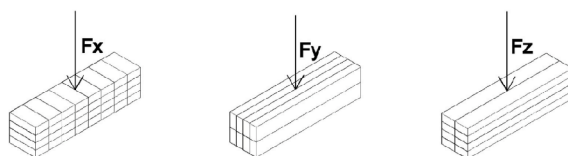


(c) Vyřezaný vzorek z 3D tisku a směry zatěžování pro pevnost v ohybu. [9]

(d) Možnost porušení vzorku. [9]

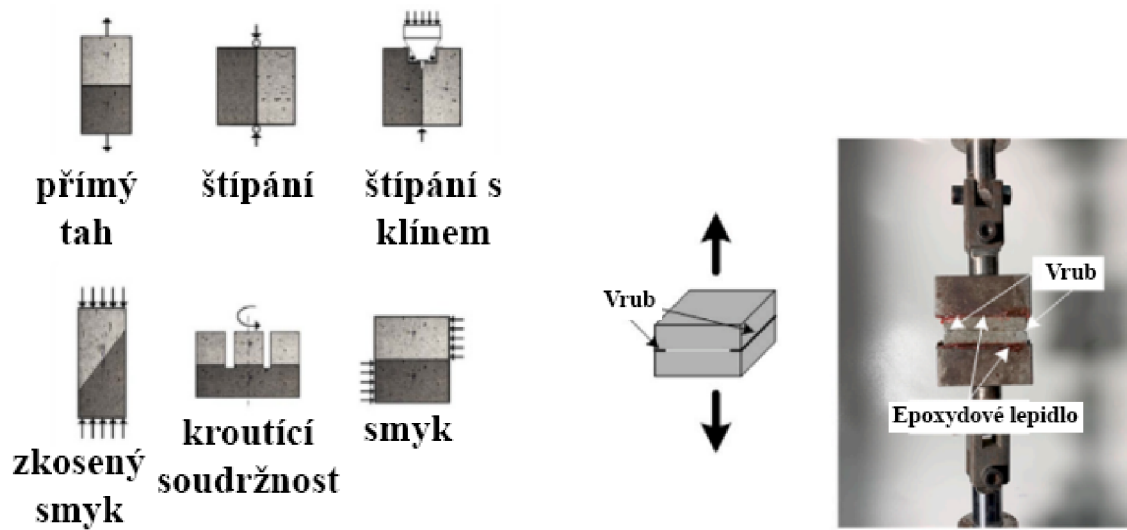


(e) Vyřezaný vzorek z 3D tisku a směry zatěžování pro pevnost v ohybu. [10]



(f) Vyřezaný vzorek z 3D tisku a směry zatěžování pro pevnost v ohybu. [11]

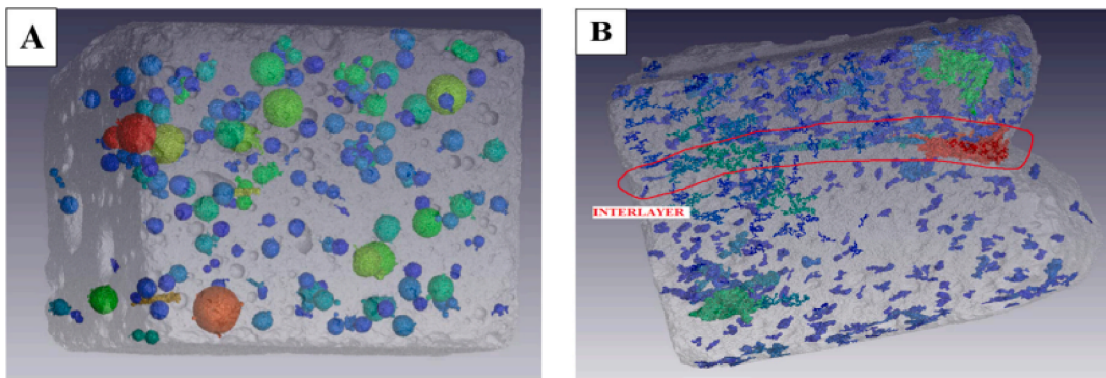
Obrázek 4.2: Možnosti vyřezání vzorků a směry zkoušení pro pevnost v ohybu.



(a) Různé možné způsoby zatěžování vytištěného vzorku s důrazem na pevnost soudržnosti vrstev. [3]

(b) Zkouška soudržnosti vrstev v tahu. [2]

Obrázek 4.3: Pevnost soudržnosti vrstvy.



Obrázek 4.4: **Tomografová analýza pórovitosti.** Na obrázku je znázorněna počítačová analýza pórovitosti výsledků z průmyslového tomografu. [5]

Kapitola 5

Navrhování složení cementových kompozitů pro 3D tisk

Návrh receptury je komplikovanější než návrh tradičních receptur. Obtížnost přináší množství požadavků na vlastnosti čerstvého materiálu. Větší vliv na receptury mají i použité materiály. Například velký dopad má i chemické složení cementu, protože ovlivňuje fungování přísad. Tento dopad je zvětšen, kvůli využití velkého množství cementu ve směsi. Toto velké množství cementu je zároveň ekonomicky a ekologicky náročné a je třeba tento dopad snížit využíváním sekundárních a recyklovaných surovin. Dále je i otázkou chování těchto receptur, kvůli většímu množství jemných částí oproti tradičním recepturám. [3]

5.1 Základní parametry důležité pro 3D tisk

Jak je již několikrát zmíněno, tak 3D tisk je závislý na větším množství parametrů. Základními požadavky pro 3D tisk jsou:

- vytlačitelnost,
- stavitelnost,
- čas cyklu vrstvení a
- vývoj pevnosti v čase.

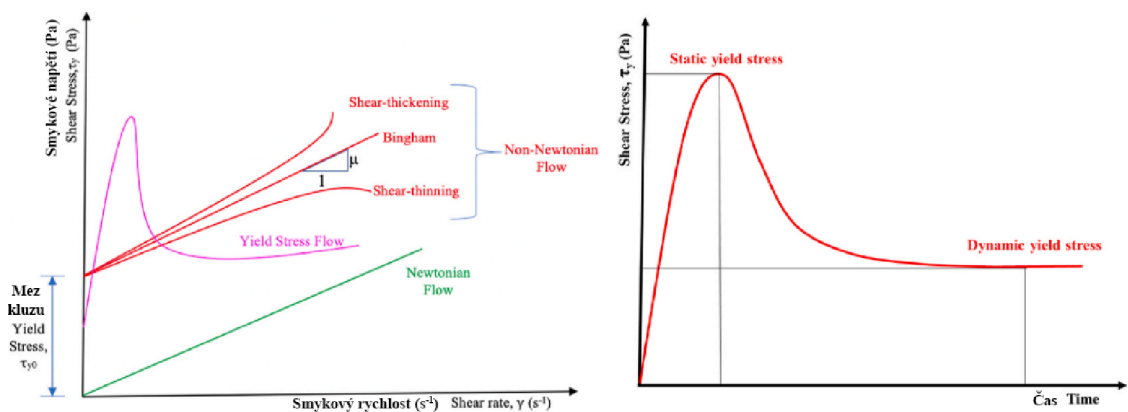
Tyto požadavky jsou úzce závislé na vlastnostech materiálu v čerstvém stavu. Těmi jsou:

- mez kluzu,
- viskozita,
- tixotropie nebo reopexie a
- časové závislosti těchto parametrů.

Souvislost těchto vlastností jsou zobrazeny v grafu 5.1. [12],[3]

Zároveň tyto vlastnosti materiálu jsou závislé na:

- hydratačním procesu,
- typu cementu,

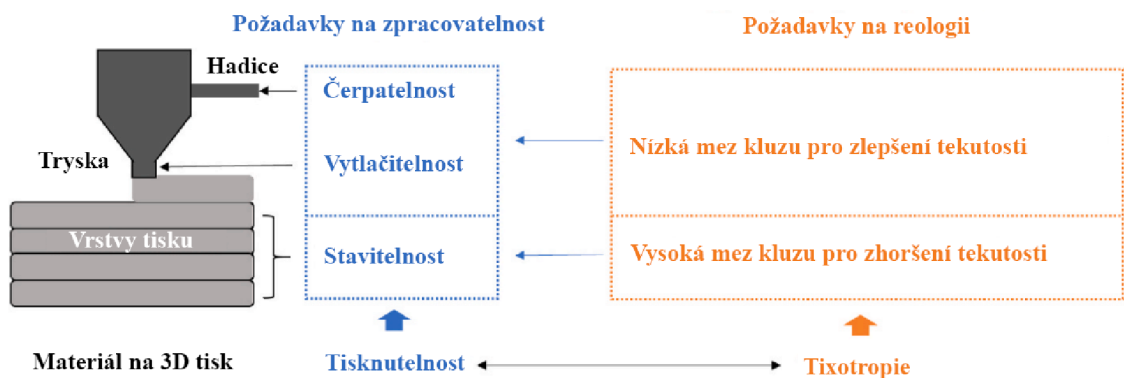


Obrázek 5.1: Grafy chování tekutých materiálů v čerstvém stavu. [12]

- typu příměsí,
- okolních podmínkách a dalších.

Dalo by se tedy říci, že 3D tisk je více závislý na větším počtu parametrů než tradiční betony. To samo o sobě vede ke spoustě problémů, které je třeba vyřešit zejména vhodným návrhem receptury, ale i vhodnou geometrií tisku a vhodným návrhem tiskárny. [3]

Při pohledu na množství požadavků na recepturu je zřejmé proč je návrh receptury tak náročný. Komplikace nastává v momentě, když materiál chceme čerpat a tisknout. Pro jednoduché čerpání je potřebná nízká viskozita a mez kluzu, pro tisk je ovšem potřebná velká viskozita a mez kluzu. To vede k další komplikaci návrhu receptury. Jedním z využívaných řešení tedy je návrh tiskové hlavičky, ve které dojde k přidavku přísady, která změní velikost viskozity a meze kluzu. Graficky je tento problém znázorněn na obrázku 5.2. [12],[6] Touto problematikou jsem se detailněji zabýval ve své bakalářské práci. [4]



Obrázek 5.2: Znázornění protichůdnosti požadavků na recepturu. [12]

5.2 Využívané metody návrhy receptur pro 3D tisk

V praxi existují dvě metody návrhu. První metodou je jednoduchý pokus omyl. Druhou metodou je návrh receptury pomocí analýzy, tento postup je ovšem proti prvnímu využíván méně. [12]

Počátek návrhu je založen na požadavcích tisknutelnosti, která je závislá na rozměrech trysky. Rozměr trysky nám udává maximální zrna kameniva. Výběrem další suroviny jsou přísady, díky kterým můžeme jednoduše ovlivnit stavitelnost, vývoj pevností a další. Téměř v každé receptuře se užívá superplastifikátorů. Pokračováním návrhu je výběr příměsí a její poměrné množství vůči cementu. Těmito surovinami ovlivníme mez kluzu, doporučená hodnota meze kluzu je mezi 1,5-2,5 kPa. Při výběru kameniva a jemných podílů na hodnotu statické meze kluzu má větší dopad objemový zlomek než plocha povrchu. Pro návrh křivky zrnitosti jsou využívány Fullerova a Thomsonova teorie a Marson-Percyův model. Pro ovlivnění viskozity jsou vhodné superplastifikátory na bázi polykarboxylátů společně s nano jíly nebo mikrokřemičité úlety. [3]

Na závěr je dobré uvést, že metody návrhu receptur pro 3D tisk jsou stále v počátcích. [3]

5.3 Využívané materiály

Výběr materiálů pro recepturu 3D tisku je důležitý vzhledem k požadavkům na materiál v čerstvém stavu. Jednotlivé materiály jsou probrány dále. [3]

5.3.1 Cement

Nejčastěji využívaným cementem je cement kategorie CEM I 42,5 R. Ve výjimečných případech je použit cement kategorie CEM I 52,5R. Zároveň je v recepturách uplatněno velké množství cementu pro vytvoření velkého množství cementové pasty, které umožní čerpání, a kvůli nutnosti urychlení směsí. [12],[6],[3]

5.3.2 Příměsí

Množství příměsí v recepturách 3D tisku je mnohem větší než u tradičních receptur a to kvůli tomu, aby bylo dosaženo tisknutelnosti. Zároveň to vede ke zvýšení cen receptur, protože jsou často využívány drahé příměsí jako nano jíly, metakaolin, mikrokřemičité úlety a nano sílica, které díky jsou své malé velikosti částic vhodné. Dále jsou používány levnější příměsí jako vysokoteplotní popílek, mikromletý vápenec a vysokopecní struska.

Tyto příměsí jsou přidávány, aby bylo dosaženo tixotropního chování. Navíc těmito surovinami lze ve velkém množství (až 50 %) nahrazovat cement. [3]

V tabulce 5.1 je popis jak jednotlivé příměsí ovlivňují vlastnosti v čerstvém, ale i zatvrdlém stavu.

5.3.3 Přísady

Nejvyužívanější přísadou je superplastifikátor. Je nutný pro vytvoření materiálových vlastností, které umožní tisk. [3]

Ze stejného důvodu lze využít i viskozitu modifikující agent (VMA). VMA zvyšuje viskozitu, mez kluzu a tixotropii. Nejpoužívanějším VMA jsou nano jíly a typy založené na celulóze a to například hydroxypropylmethylcelulóza, mikrokrytalická celulóza. VMA na

	Vliv na reologii	Vliv na vlastnosti v zatvrdlém stavu
Vysokoteplotní popílek	Vliv má pozitivní, dopad závisí na typu, velikosti a tvaru částic. Redukuje plastickou viskozitu. Oddaluje čas počátku tuhnutí.	Nižší počáteční pevnosti a snížení vývoje hydratačního tepla. Zvyšuje dlouhodobé pevnosti.
Křemičité úlety	Zvyšuje mez kluzu, plastickou viskozitu, rychlost flukoaace a snižuje tekutost. Zlepšuje soudržnost a vodní součinitel má velký vliv na recepturu.	Zvyšuje pevnost v tlaku a tahu za ohybu. Velké množství způsobuje větší autogenní smrštění.
Vysokopeční struska	Zlepšuje zpracovatelnost a snižuje plastickou viskozitu a mez kluzu. Snížení je kvůli nahrazení cementu a menšímu specifickému povrchu.	Zvyšuje dlouhodobou pevnost v tlaku a tahu za ohybu.
Mikromletý vápenec	Zvyšuje mez kluzu a plastickou viskozitu. Tato změna je závislá na specifickém povrchu.	Nemá výrazný vliv.
Metakaolin	Zvyšuje mez kluzu a tixotropii Zkracuje čas počátku tuhnutí, takže urychluje vývoj viskozity.	Zvyšuje pevnost v tlaku a tahu za ohybu. Snižuje ASR, smrštění a propustnost.
Nano silica	Zvyšuje mez kluzu a plastickou viskozitu. Zkracuje čas počátku tuhnutí, takže urychluje vývoj viskozity.	Zvyšuje pevnosti v tlaku a tahu za ohybu. Tvoří hustší mikrostrukturu.

Tabulka 5.1: Tabulka vlivů příměsí na reologii a zatvrdlý stav.

bázi celulózy zlepšují mez kluzu, viskozitu a stavitelnost, větší dávky ovšem velmi negativně ovlivňují pevnosti. Jíly jehličkového tvaru velice zlepšují tixotropii. [3]

Důležité jsou i urychlovače a zpomalovače tuhnutí. Využívaným urychlovačem je například uhličitan lithný a zpomalovačem glukonát sodný, který zároveň má efekt snížení vodního součinitele. I přesto, že urychlovače jsou pro 3D tisk nutností, přináší negativní efekty, jako je komplikované dávkování, návrh komplexních hlavic tisku a citlivost na složení cementu. Dále snižují urychlovače finální pevnosti receptur. [3]

5.3.4 Vlákna

Vlákna jsou s výhodou využívána pro několik účelů najednou. Prvním důvodem přidání vláken je zvýšení tixotropie, druhým je zabránění vzniku trhlin při zrání a třetím je výroba UHPFRC nebo zvýšení pevnosti v tahu a v tahu ohybem. Využívány jsou:

- organická vlákna,
- ocelová vlákna,
- čedičová vlákna,
- uhlíková vlákna a
- skleněná vlákna.

Mezi nejpoužívanější organická vlákna patří:

- polypropylenová vlákna,
- polyethylenová vlákna a
- polyvinylalkoholová vlákna.

Typická dávka vláken je 0,5-2 % z množství cementu. Problém využití vláken je pouze v blokaci při vyšší dávce, které může nastat během čerpání nebo ucpáním trysky. [3]

5.3.5 Kamenivo

V recepturách kamenivo zastupuje 60-70 % objemu, má tedy velký dopad na vlastnosti v čerstvém, ale i zatvrdlém stavu. S přidavkem kameniva se zvyšuje mez kluzu a plastická viskozita a to v závislosti na velikosti zrna. Navíc velká zrna kameniva snižují smrštění. V současné době ovšem jen malý počet výzkumných týmů v recepturách využívá větší zrna kameniva. Většina výzkumu je zaměřena na cementové pasty. Tento trend je způsoben problematickým čerpáním větších zrn pomocí šnekových čerpadel, které jsou nejvíce rozšířeny díky kontinuálnímu čerpání, a možnou blokací hlavic tiskárny. [3]

Při využití recyklovaného písku lze díky jeho nasákavosti dosáhnout po čerpání vyšší plastickou viskozitu a mez kluzu, ale snižují tixotropii. Tyto jevy se dějí díky natlačení vody do pórů a to je pozitivní vlastnost. Při vynechání hrubých zrn kameniva lze připravit receptury, které jsou velice kompaktní a vyšší meze kluzu. [3]

5.4 Příklady receptur a jejich parametry

V této části se zabývám rešerší receptur, které jsem našel. Receptury vždy pojmenovávám podle autorů práce, ve které byla receptura nalezena. Následně uvádím co v práci bylo zkoumáno a případně i výsledné parametry receptury.

Popisek	Manuální test			Automatický test			
	1	2	3	4	5	6	7
Číslo mixu	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 100 (g)	3,7	3	3	4,3	4,6	4,3	4,3
Polyacrylamide (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	530	350	270	400	1353
Neurčitost (Pa)	10	11	34	20	20	50	60

Tabulka 5.2: **Receptura 1 - Ducoulombier, N.** Použité suroviny a výsledky zkoušky odkapávání. [8]

5.4.1 Receptura 1 - Ducoulombier, N.

V tabulce 5.2 je receptura tohoto týmu a zároveň v ní jsou uvedeny výsledky zkoušky, kterou tým navrhl. Tato práce se zabývá vývojem zjištění viskozitních parametrů pomocí odkapávání. Více o zkoušce v kapitole 3.8. [8]

5.4.2 Receptura 2 - Ye, J.

Tato práce se zabývá vlivem různého množství vláken na vlastnosti v čerstvém stavu a vliv na pevnosti v tahu ohybem.

Cement je typu PII. 525 obyčejný portlandský cement (OPC), vysokoteplotní popílek typu F (FA), mikrokřemičité úlety (SF) a gumová drobenka (CR) s rozměry 120. Křemičitý písek (Sand) s průměrnou velikostí zrna 0,11 mm. Vodní součinitel je počítán z hmotnosti cementu, popílků a úletů. Receptura je v tabulce 5.3. Křivky zrnitosti jemných podílů mimo mikrokřemičité úlety jsou uvedeny v grafu 5.3(a). Vlastnosti PE vláken jsou v tabulce 5.4. Množství vláken v receptuře bylo 1 %, 1,5 % a 2 % pro otestování vlastností v čerstvém stavu a vliv na pevnosti. Změna konzistence provedená zkouškou na roztečením a penetrací (na obrázku 3.2) je na grafu 5.3(b) a výsledky v tahu ohybem (v kapitole 4.1.2) je na grafu 5.3(c). [10]

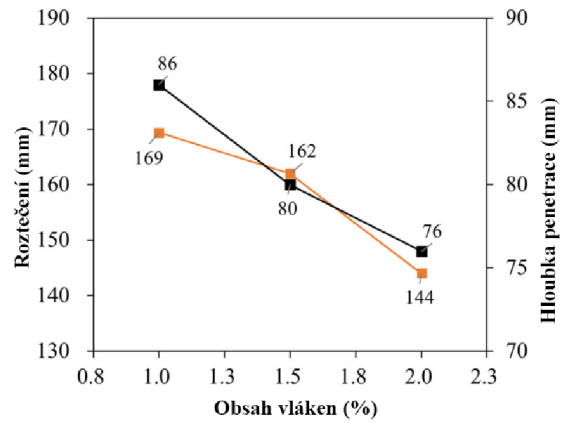
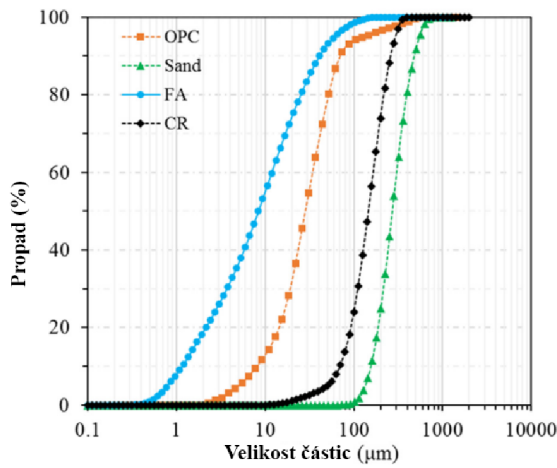
Dále bylo provedena zkouška stavitelnosti 3.12.2. Výsledky jsou v tabulce 5.5. [10]

Složka	Množství (Kg/m^3)
Cement	656
Vysokoteplotní popílek	118
Křemičitý písek	604
mikrokřemičité úlety	246
Gumová drobenka	57
Superplastifikátor	3
PE vlákna	10/15/20
Vodní součinitel	0,27

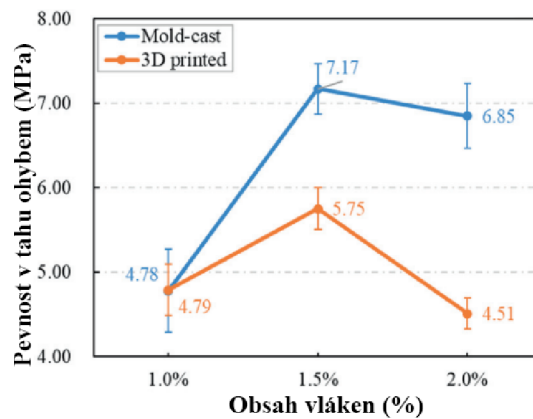
Tabulka 5.3: **Receptura 2 - Ye, J.** Dávka surovin v kg/m^3 . [10]

Vlastnost	Hodnota
Typ vlákna	PE
Délka (mm)	12
Průměr (μm)	25
Štíhlostní poměr	480
Protažení před porušením (%)	2,4
Modul pružnosti (GPa)	116
Pevnost v tahu (MPa)	2900
Hustota (g/cm^3)	0,97

Tabulka 5.4: Vlastnosti vlákna v receptuře 2. [10]



(a) Křivky zrnitosti jednotlivých surovin receptury 2. (b) Roztečení a penetrace v závislosti na množství vláken v receptuře 2. (Zkoušky na obrázku 3.2)



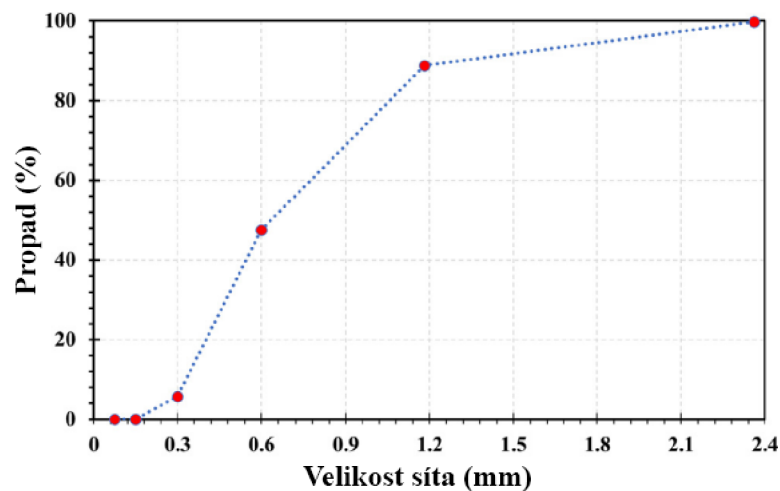
(c) Pevnost v tahu ohybem v závislosti na množství vláken pro recepturu 2. (Zkoušky v kapitole 4.1.2)

Obrázek 5.3: Křivka zrnitosti, vlastnosti v čerstvém stavu a pevnost v tahu ohybem pro recepturu 2. [10]

5.4.3 Receptura 3 - Heras Murcia, D.

V této práci byl zkoumán vliv směru kladení vrstev a typ plnění na stavitelnost a pevnostní charakteristiky.

Receptura je v tabulce 5.6. V receptuře je využit cement typu I-II portlandský, typ F vysokoteplotní popílek, mikrořemičité úlety jsou od Rheomac SF 100, BASF group. Superplastifikační přísada je na bázi polykarboxylátů od MasterGlenium 3030, BASF group. Dávka plastifikátoru je 1,05 % a vodní součinitel je 0,28 z hmotnosti cementu, popílku a křemičitých úletů. Maximální zrno písku je 2,36 mm, ale 94 % zrn je do velikosti 1,2 mm. Křivka zrnitosti je na grafu 5.4. Maximální velikost zrna byla vybrána pro umožnění velkého rozlišení tisknutých prvků. [9]



Obrázek 5.4: Křivka zrnitosti písku v receptuře 3. [9]

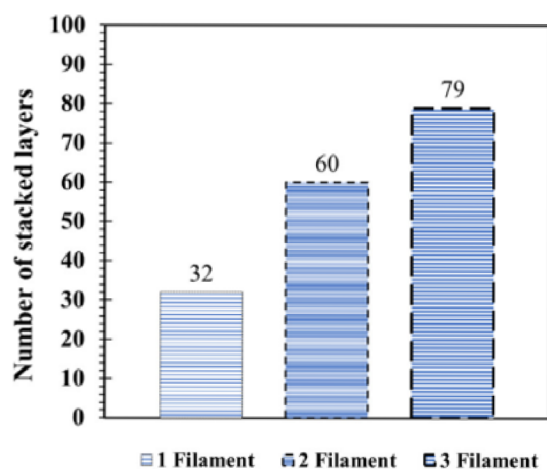
Na obrázku 5.5 je vyhodnocení a obrázek zhroucení při zkoušce stavitelnosti. Výsledky hustoty a pevností jsou na grafech 5.6 Tyto parametry jsou závislé na směru kladení vrstev a typu plnění, které je více rozebíráno v kapitole 6.6. [9]

Množství vláken	Parametr	Číslo vrstvy									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1 %	Výška (mm)	9	21	33	43	52	62	71	80	91	99
	Změna vůči nastavení (%)	1	2	2	0	1	0	1	1	1	2
	Šířka (mm)	99	102	103	104	103	105	105	105	104	103
	Změna vůči nastavení (%)	1	2	3	4	3	5	5	5	4	3
1,5 %	Výška (mm)	9	20	30	39	49	59	69	78	88	98
	Změna vůči nastavení (%)	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0
	Šířka (mm)	99	100	106	105	106	104	105	105	102	102
	Změna vůči nastavení (%)	1	0	6	5	6	4	5	5	2	2
2 %	Výška (mm)	9	19	28	39	48	57	68	78	87	97
	Změna vůči nastavení (%)	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0
	Šířka (mm)	99	100	104	102	100	103	104	104	106	104
	Změna vůči nastavení (%)	1	0	4	2	0	3	4	4	6	4

Tabulka 5.5: Výsledky zkoušky stavitelnosti. (Více o zkoušce v kapitole 3.12.2.)

Složka	Množství (kg/m^3)
Cement	546
Vysokoteplotní popílek	156
Mikrokřemičité úlety	78
Písek	1171
Voda	219
Superplastifikátor	8,2

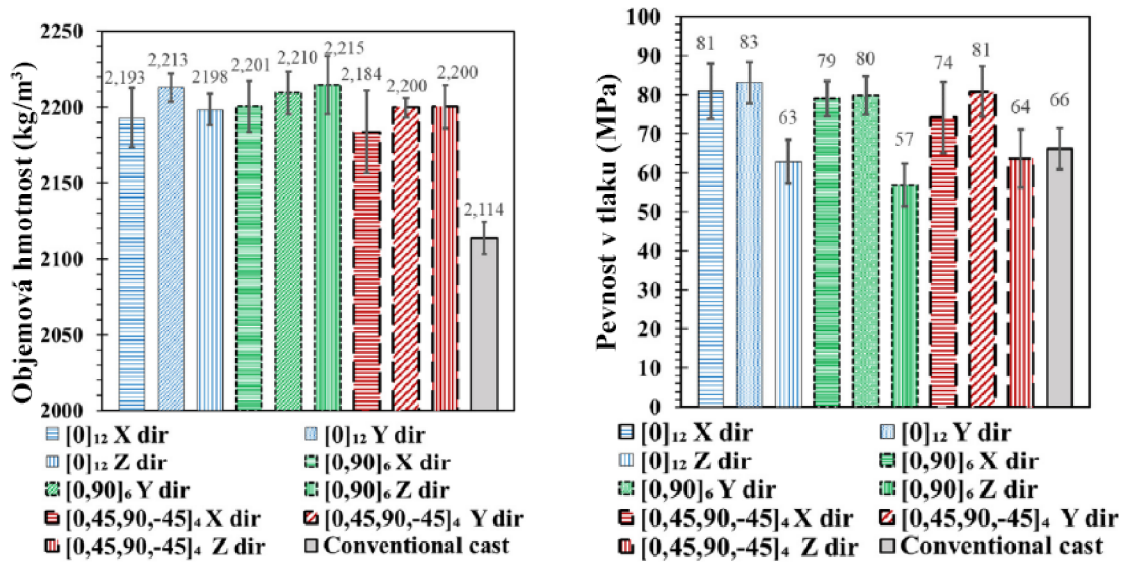
Tabulka 5.6: **Receptura 3 - Heras Murcia, D.** Dávka surovin v kg/m^3 . [9]



(a) Počet vrstev před deformací pro recepturu 3 s různými směry tisků a plnění. (Zkouška v kapitole 3.12.2 a směry tisků a plnění v kapitole 6.6.)

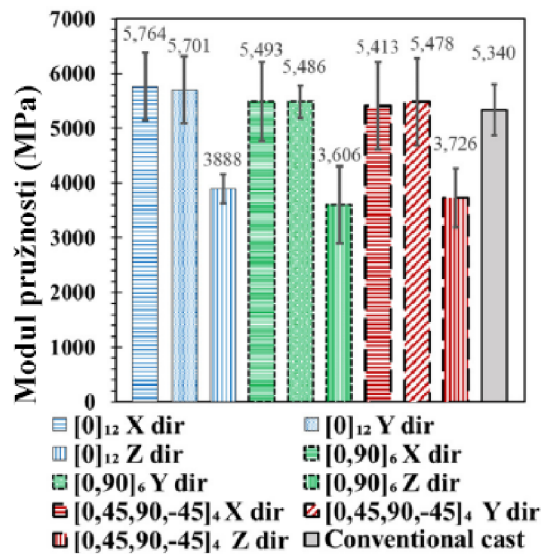
(b) Zhroucení při tisku.

Obrázek 5.5: Stavitelnost v závislosti na směru tisku a plnění. [9]



(a) Objemová hmotnost různých směrů tisků a plnění.

(b) Pevnost v tlaku různých směrů tisků a plnění.



(c) Modul pružnosti různých směrů tisků a plnění.

Obrázek 5.6: Objemová hmotnost a pevnostní charakteristiky receptury 3. Směry tisků a plnění v kapitole 6.6 a pevnostní zkoušky v kapitole 4 (V tomto případě zkoušení pevností kolmo na rovinu vrstev.). [9]

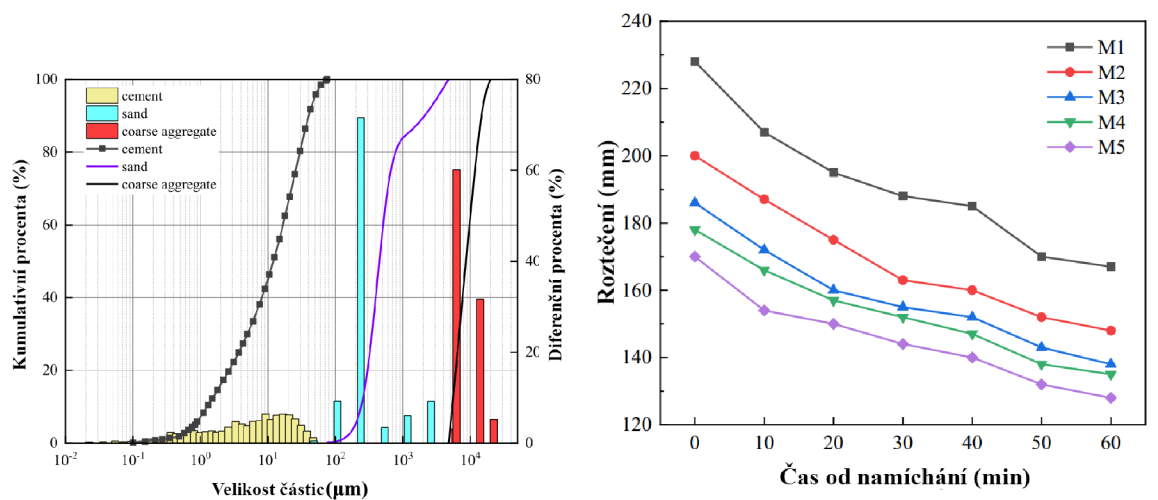
Tato studie ukazuje, že existuje další proměnná v oblasti 3D tisku a je důležitý vhodný návrh vhodného směru tisku a plnění. Více v kapitole 6.2. [9]

5.4.4 Receptura 4 - Chen, Y.

V receptuře je využit cement 42,5 portlandský vyroben cementárnou Nanjing Conch Cement Co., Ltd. (P.R. China). Chemické složení cementu je v tabulce 5.7. Jako kamenivo byl použit lokální (v místě provádění práce) říční písek s maximálním zrnem 4,75 mm a dvě čedičová kameniva o frakcích 5-10 mm a 10-20 mm. Vlastnosti kameniva jsou v tabulce 5.8 a na grafu 5.7(a) je křivka zrnitosti. Byla použita plastifikační přísada na bázi polykarboxylátů s redukcí vody 34% vyrobena společností Jiangsu Subote New Materials Company. Zahušťovací přísada je typu ether hydroxypropylmethylcelulózy, která měla viskozitu 200 000 $mPa \cdot s$ vyroben společností Linyi Yiqun Chemistry. Složení receptury je v tabulce 5.9.

Doporučený poměr cementu vůči kamenivu je 0,35-0,6. Tento poměr je doporučen, aby receptura byla tisknutelná. Nižší poměr zlepšuje maximální tisknoucí výšku a mechanické vlastnosti, ale zhoršuje tvar geometrie vícevrstvého, protože má tendenci se více zdeformovat. Tyto receptury mají oblast tisknutelnosti v rozmezí 178-200 mm. Vývoj roztečení je na grafu 5.7. [7]

Ve zkoušce stavitelnosti a deformace vrstev je více rozebírána v kapitole 3.3 a 3.12.2. Receptura M1 byla příliš tekutá a samovolně vytékala z trysky. Receptura M5 měla opačný problém a došlo k částečné blokaci během tisku. Receptury M2, M3 a M4 byly tisknutelné a bylo možné z nich postavit 8, 10 a 12 vrstev před kolapsem. Receptura M4 by nejspíše mohla vydržet více vrstev, ale autoři práce byly nuceni tiskárnu vypnout, kvůli její ochraně. [7]



(a) Křivka zrnitosti.

(b) Roztečení na střešacím stolku různých receptur v čase, více v kapitole 3.

Obrázek 5.7: Křivka zrnitosti a roztečení receptur [7]

Pro analýzu obsahu vzduchu a defektů byla využita analýza pomocí tomografu, popsána v kapitole 4.2. Výsledky jsou vidět na obrázcích 5.9.

Typ oxidu	Zastoupení oxidů hmotnostním poměrem
CaO	66,82
SiO ₂	17,28
Al ₂ O ₃	4,63
Fe ₂ O ₃	3,27
(Na ₂ O) _e	0,20
MgO	1,46
K ₂ O	1,06
SO ₃	3,74
TiO ₂	0,251
P ₂ O ₅	0,089
Ztráta žíháním	1,20

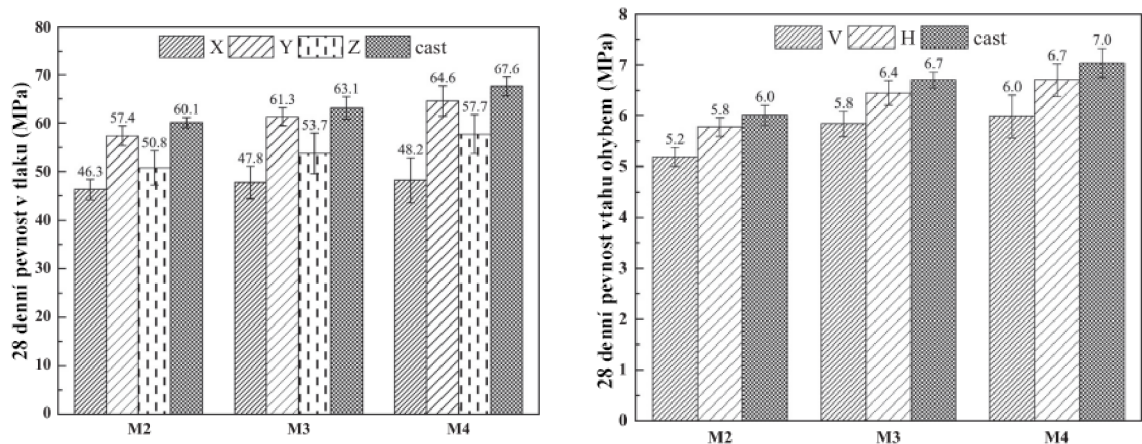
Tabulka 5.7: Chemické složení cementu [7]

Kamenivo	Obsah jílu (%)	Nasákavost (%)	Hustota (g/cm ³)	Tvarový index
Písek	0,86	0,31	2,66	-
Čedič (5-10 mm)	0,32	0,25	2,65	0,24
Čedič (10-20 mm)	0,33	0,32	2,77	0,36

Tabulka 5.8: Vlastnosti použitých kameniv [7]

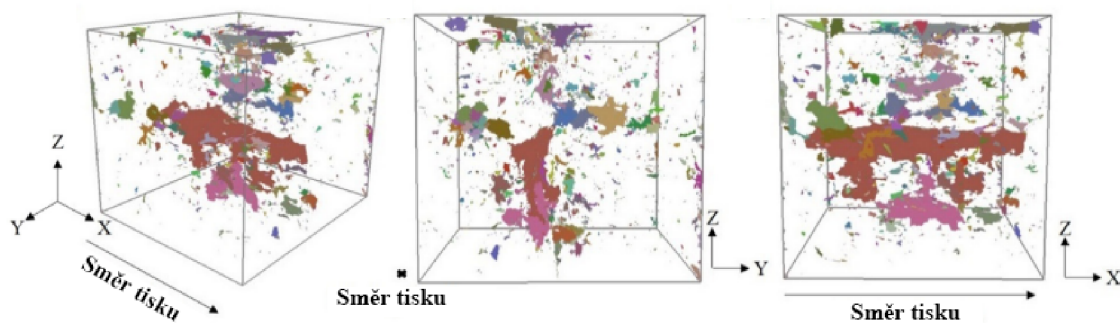
Složka	Receptury v objemovém poměru				
	M1	M2	M3	M4	M5
Poměr cement/kamenivo	0,65	0,6	0,45	0,35	0,3
Cement	0,287	0,277	0,224	0,209	0,189
Čedič (5-10 mm)	0,158	0,165	0,202	0,240	0,226
Čedič (10-20 mm)	0,107	0,111	0,135	0,160	0,151
Písek	0,180	0,188	0,229	0,272	0,255
Voda	0,268	0,259	0,210	0,156	0,176
Plastifikátor (%)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Zahušťovací přísada (%)	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

Tabulka 5.9: Receptura jednotlivých záměsí [7]

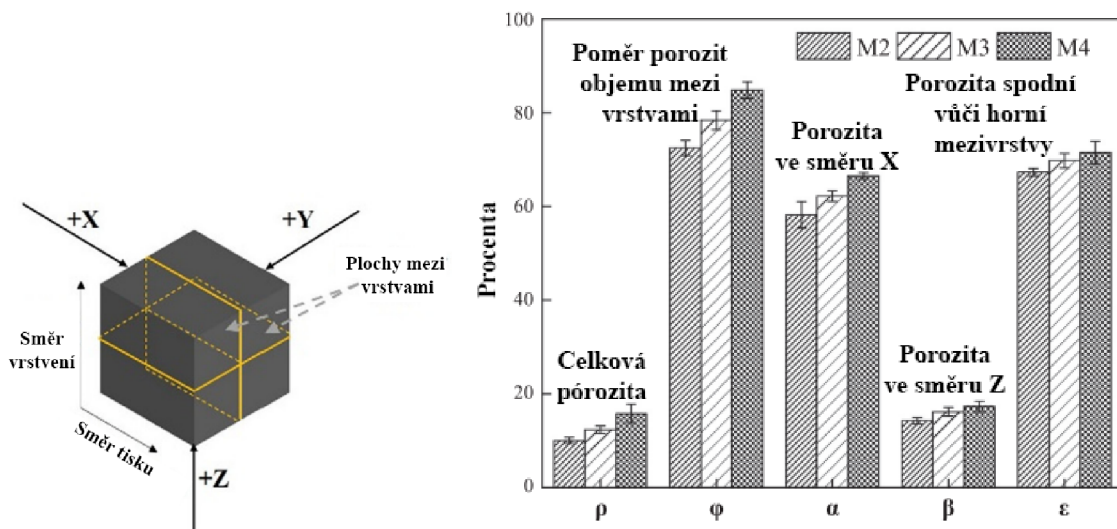


(a) 28 denní pevnosti v tlaku pro jednotlivé receptury (b) 28 denní pevnost v tahu ohybem pro jednotlivé receptury

Obrázek 5.8: Pevnosti v tlaku a tahu ohybem, zkoušené dle kapitoly 4.



(a) Grafické znázornění defektů a pórozity vybraného vzorku.



(b) Schéma os vůči tisku.

(c) Zjištěné parametry pórů a defektů.

Obrázek 5.9: popis pro oba 4.2 [7]

5.4.5 Receptura 5 - Arunothayan, Arun R.

Receptura je uvedena v tabulce 5.10. Cement je portlandský, typu GP (General Purpose) dle normy AS 3972. Chemické složení cementu a křemičitých úletů je v tabulce 5.11. Dále byly v receptuře využity tři různé písky rozdělené podle zrnitosti. Všechny tři písky jsou mikrokřemičité. Na grafu 5.10 je křivka zrnitosti cementu (OPC), mikrokřemičitých úletů (silica fume) a písků (sand). Plastifikátor je na bázi polykarboxylátů a nano jíly (ve formě velmi čistého vodnatého hlinitokřemičitanu hořečnatého), který byl využit jako modifikátor viskozity. Vlastnosti použitých vláken jsou v tabulce 5.12.

V tabulce 5.13 jsou tiskové parametry. Využité pro studium jejich vlivu na orientaci vláken. [13]

V rámci práce byla dokázána větší orientace vláken ve směru tisku, oproti odlitému vzorku. Čím více vláken je ve směsi, tím větší tato orientace je. Zároveň velikost trysky ovlivňuje orientaci vláken. Menší tryska vykazuje větší orientaci, než větší. Existuje ovšem limitní rozměr trysky, kdy rozměr trysky již neovlivňuje orientaci vláken. K orientaci vláken ve větší trysce dochází u jejich okrajů, vlivem tření. Rychlost tisku nijak směr vláken neovlivňuje. [13]

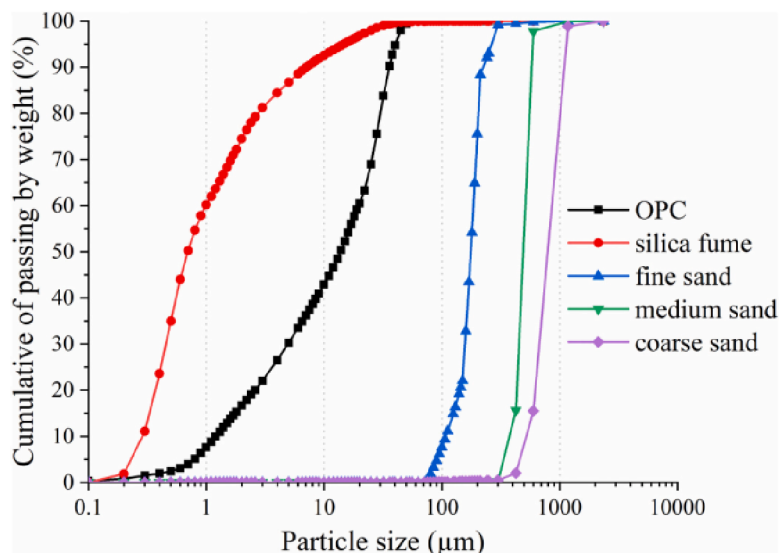


Fig. 1. Particle size distribution of dry materials; Reproduced from [8].

Obrázek 5.10: Křivka zrnitosti cementu, mikrokřemičitého úletu a písků. [13]

Složka	Hmotnostní poměr
Cement	0,7
Mikrokřemičité úlety	0,3
Jemný písek	0,4
Střední písek	0,3
Hrubý písek	0,3
Voda	0,16
Plastifikátor (objemový poměr)	0,01
Vlákna (z cementu a úletů)	0 %, 1 %, 2 %
Nano jíly	0,003

Tabulka 5.10: **Receptura 5 - Arunothayan, Arun R.** Množství v hmotnostním poměru. [13]

Typ oxidu	Cement	Křemičité úlety
CaO	62,91	0,01
SiO ₂	20,34	98,4
Al ₂ O ₃	4,47	0,33
Fe ₂ O ₃	4,58	0,31
Na ₂ O	0,31	0,01
MgO	1,24	-
K ₂ O	0,29	0,01
SO ₃	2,58	-
TiO ₂	-	0,01
P ₂ O ₅	-	0,2
Ztráta žíháním	3,27	1

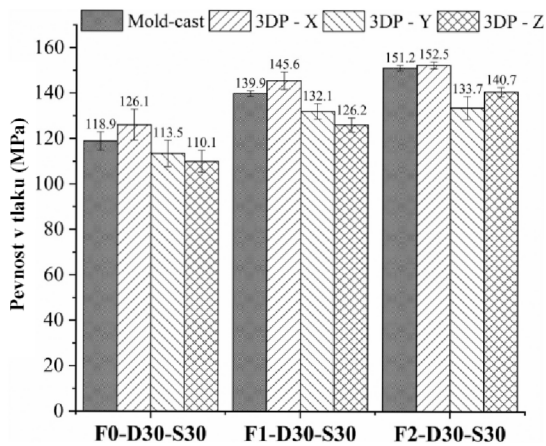
Tabulka 5.11: Chemické složení cementu a mikrokřemičitého úletu [13]

Vlastnost	Hodnota
Typ	Ocelové
Délka (mm)	6
Průměr (μm)	200
Štíhlostní poměr	30
Objemová hmotnost (g/cm^3)	7,85
Modul pružnosti (GPa)	200
Pevnost v tahu (MPa)	2500

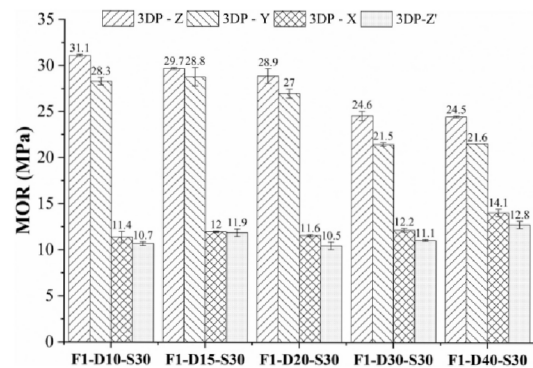
Tabulka 5.12: Vlastnosti použitých vláken [13]

Název receptury	Informace o tisku a množství vláken		
	Vlákna (%)	Průměr trysky (mm)	Tisková rychlost (mm/s)
F0-D30-S30	0	30	30
F1-D30-S30	1	30	30
F2-D30-S30	2	30	30
F1-D10-S30	1	10	30
F1-D15-S30	1	15	30
F1-D20-S30	1	20	30
F1-D40-S30	1	40	30
F1-D30-S20	1	30	20
F1-D30-S40	1	30	40
F1-D30-S50	1	30	50

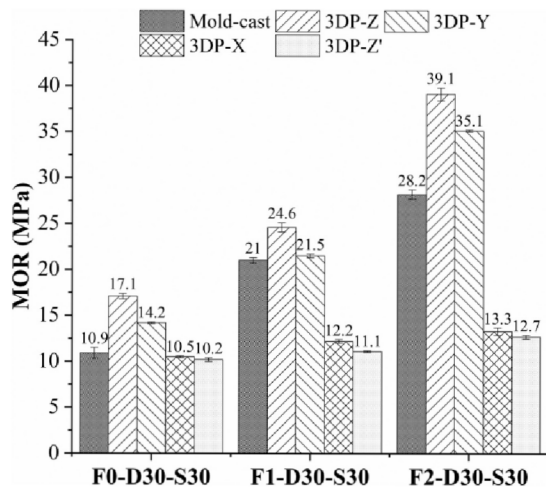
Tabulka 5.13: Tiskové parametry pro směsi (F-množství vláken v %, D-průměr trysky v mm, S-tisková rychlost v mm/s) [13]



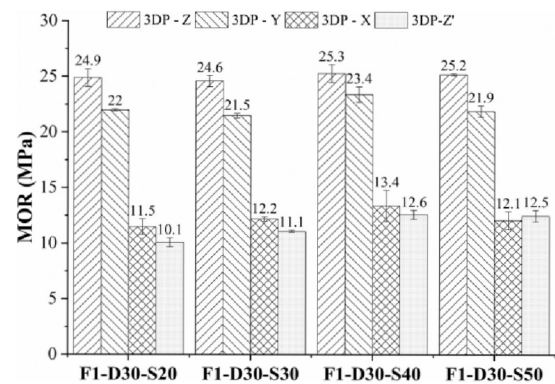
(a) Pevnost v tlaku v závislosti na dávce vláken.



(b) Modulus lomu (MOR) v závislosti na velikosti trysky.



(c) Modulus lomu (MOR) v závislosti na dávce vláken.

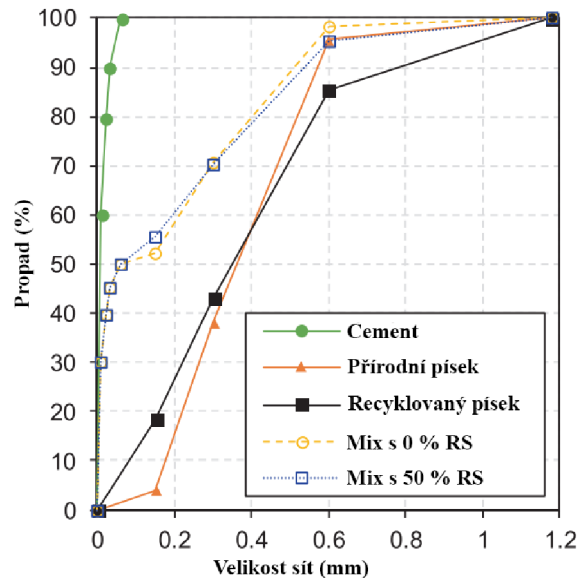


(d) Modulus lomu (MOR) v závislosti na rychlosti tisku.

Obrázek 5.11: Grafy pevnosti a modulu lomu receptur v závislosti na parametrech tisku. Více o zkoušení v kapitole 4. [13]

5.4.6 Receptura 6 - Ding, T.

V této práci bylo cílem zjistit vliv různých délek polyethylenových vláken (vlastnosti vláken v tabulce 5.14.) a efekt recyklovaného písku (vlastnosti použitých písků v tabulce 5.15 a křivka zrnitosti na obrázku 5.12). Jako cement byl použitý portlandský Grade 42,5, modifikátor viskozity ve formě hydroxypropylmethylcelulóza (HPMC) a superplastifikátor na bázi polykarboxylátů. [14]



Obrázek 5.12: Křivka zrnitosti použitých surovin. [14]

Pevnost v tahu za ohyb receptur s přírodním pískem (značeny NS) a s recyklovaným pískem (značeny RS), s různou dávkou vláken, jsou vyneseny na grafu 5.13. Testovány byly v různých směrech. Větší dávka vláken měla pozitivní dopad na pevnost v tahu ohybem (na grafu 5.13(b)) a na lomovou energii (na grafu 5.13(c)). Metody zkoušení jsou popsány v kapitole 4.1.2 [14]

Vlastnost	Hodnota
Typ	PE
Délka (mm)	6/12
Průměr (μm)	20
Štíhlostní poměr	300/600
Objemová hmotnost (g/cm^3)	0,97
Modul pružnosti (GPa)	100
Pevnost v tahu (MPa)	2400

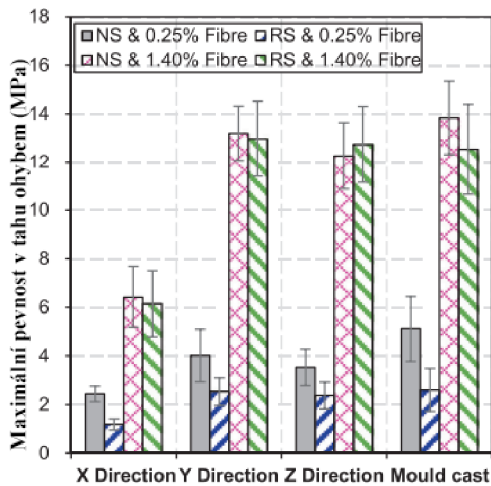
Tabulka 5.14: Vlastnosti použitých vláken [14]

Vlastnost	Přírodní písek (NS)	Recyklovaný písek (RS)
Modul jemnosti	1,62	1,53
Maximální zrno (mm)	0,9	0,9
Zdánlivá hustota (kg/m^3)	2586,5	2410,7
Volně sypaná hustota (kg/m^3)	1399	1014
Kompaktní hustota (kg/m^3)	1491	1070
Vlhkost (%)	0,2	0,6
Nasákavost (%)	1	15

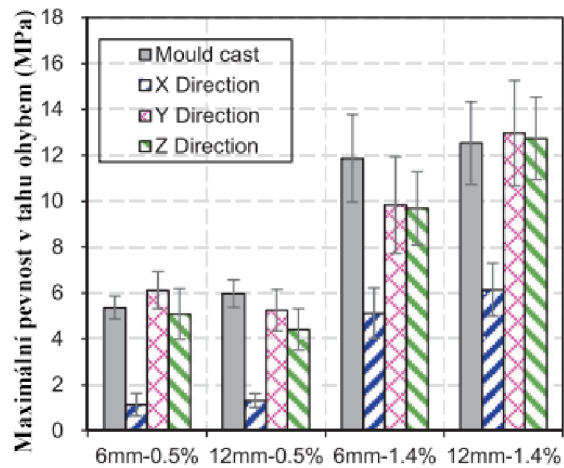
Tabulka 5.15: Vlastnosti použitých písků [14]

Složka	Receptury v kg/m^3							
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
Poměr recyklovaného vůči přírodního písku (%)	0	0	0	0	50	50	50	50
Cement	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Přírodní písek	1000	1000	1000	1000	500	500	500	500
Recyklovaný písek	0	0	0	0	500	500	500	500
PE vlákna (%)	0,25	0,5	1	1,4	0,25	0,5	1	1,4
Voda	350	350	350	350	420	420	420	420
Superplastifikátor (%)	0,71	0,73	1,12	1,98	0,86	1	1,24	2,18
HPMC	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28

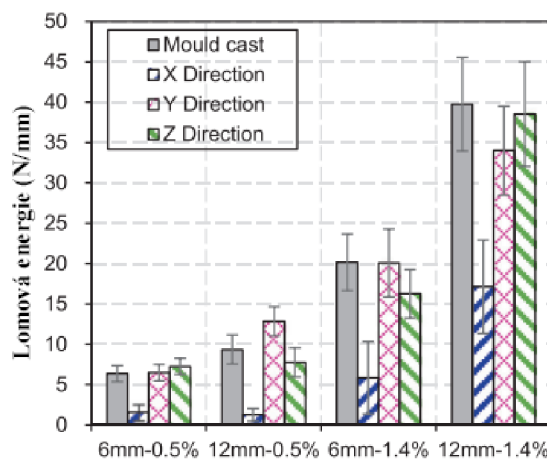
Tabulka 5.16: Receptura 6 - Ding, T. Složení jednotlivých receptur [14]



(a) Maximální pevnost v tahu ohybem pro různé směry zatěžování a efektu recyklovaného písku.



(b) Maximální pevnost v tahu ohybem v závislosti na dávce vláken a efektu recyklovaného písku.



(c) Maximální lomová energie v závislosti na dávce vláken a efektu recyklovaného písku.

Obrázek 5.13: Pevnosti 3D tištěných vzorků pro různé délky vláken, vliv recyklovaného písku a době zrání. Zkoušení v kapitole 4.1.2. [14]

5.4.7 Receptura 7 - Ye, J.

Použité suroviny jsou stejné jako pro Recepturu 2 - Ye, J. (kapitola 5.4.2). V této práci se ovšem autoři zabývali vhodnou dávkou gumové drobenky. Použité receptury jsou v tabulce 5.17. Na grafu 5.14(a) je roztečení na stolku a penetrace v čase pro recepturu CR40. V grafu 5.14(b) je pevnost tahová a v tahu za ohybu a tahové napětí pro všechny receptury. A v grafu 5.14(c) je pevnost ve smyku monolitických vzorků a tištěných vzorků pro recepturu CR40 a na obrázku 5.14(d) jsou fotky zkoušených vzorků a směry zatěžování. [2]

Složka	Receptury (kg/m^3)			
	CR0	CR20	CR40	CR60
Cement	655	655	655	655
Vysokoteplotní popílek	604	604	604	604
Mikrokřemičité úlety	118	118	118	118
Písek	410	328	246	164
Gumová drobenka	-	28	57	85
Voda	363	363	363	363
Superplastifikátor	2	3	3,5	4
Vlákna	20	20	20	20

Tabulka 5.17: **Receptura 7 - Ye, J.** Složení použitých receptur. [2]

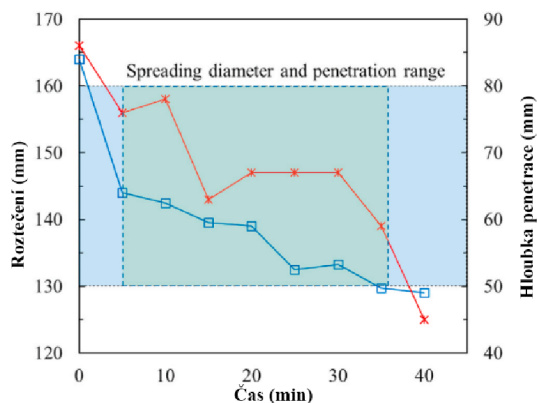
5.4.8 Receptura 8 - Kruger, J.

Je použit cement CEM II/A-L 52.5 N, superplastifikátor typu polykarboxylát etheru, jemné kamenivo s maximálním zrnem 4.75 mm. Receptura je v tabulce 5.18.

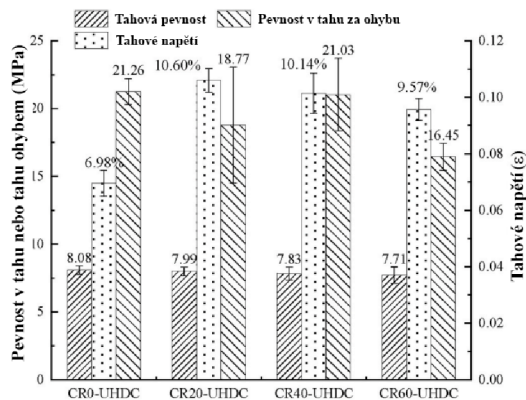
Receptura má 28 denní pevnost v tlaku 70 MPa a modul pružnosti 30 GPa. Tato práce nebyla zaměřená na vlastnosti v čerstvém stavu, ale na obsah vzduchu monolitických vzorků oproti vytištěným. Část výsledků této práce je v grafu 5.15 a více o této metodě je v kapitole 4.2. [5]

Materiál	Výrobní jméno	Množství (kg)
Cement	PPC SureTech 52,5 N	579
Vysokoteplotní popílek	DuraPozz Class F	165
Mikrokřemičité úlety	Chryso DSF	83
Jemné kamenivo	Malmesbury	1167
Voda	-	261
Superplastifikátor	Chryso Premia 310	5,75

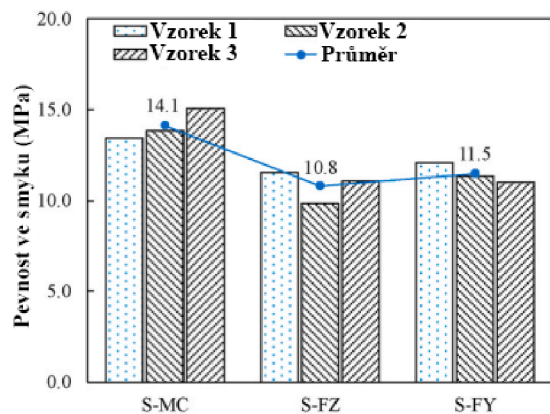
Tabulka 5.18: **Receptura 8 - Kruger, J.** Složení receptury a výrobci surovin. [5]



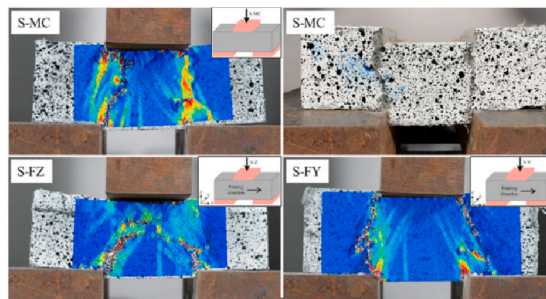
(a) Roztečení na stolku a penetrace v čase. Popis zkoušek v kapitole 3.2.



(b) Pevnost tahová a v tahu za ohybu a tahové napětí.

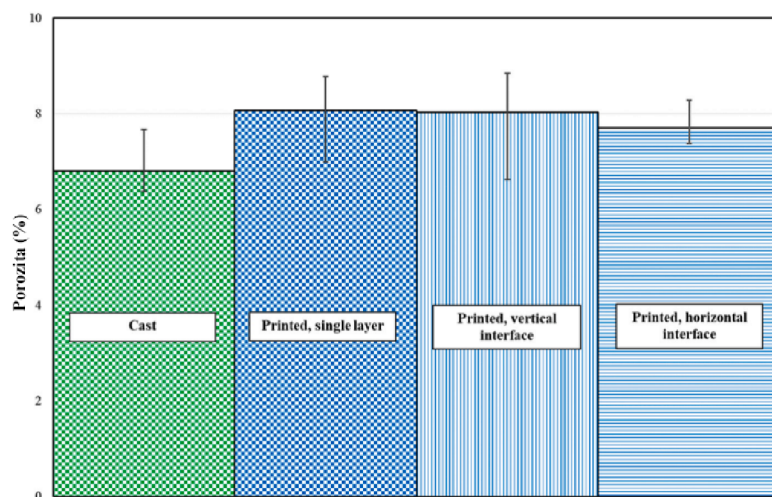


(c) Pevnost ve smyku tří vzorků monolitických (S-MC) a šesti vzorků receptury (CR40) v různých směrech zatěžování (S-FZ A S-FY).



(d) Fotky a schéma zetěžování a zatěžovacích směrů.

Obrázek 5.14: Vlastnosti v čerstvém stavu v závislosti na čase (více v kapitole 3) a dále různé pevnosti v zatvrdlém stavu (více v kapitole 4). [2]



Obrázek 5.15: Na obrázku je část výsledků z práce autora Kruger, J. [5]

5.4.9 Receptura 9 - Ding, T.

byly použity přírodní písek a recyklovaný písek. Vlastnosti písků jsou v tabulce 5.19. V této práci byl přírodní písek postupně nahrazován recyklovaným pískem náhradami 12.5 %, 25 % a 50 %. Dále byl použitý obyčejný portlandský cement 42,5, superplastifikátor na bázi polykarboxylátů, hydroxypropylmethylcelulóza (HPMC) a nano jí. Receptura je v tabulce 5.20 a křivky zrnitosti jednotlivých materiálu na grafu 5.16(a).

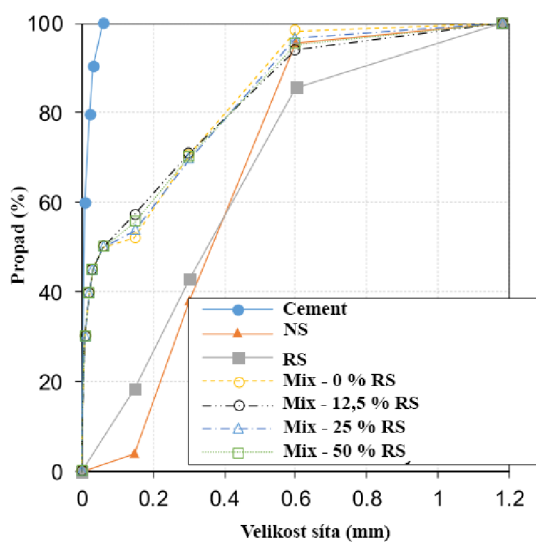
V grafu 5.16(b) je vidět vývoj konzistence jednotlivých receptur v čase. Zkouška na střešacím stolku byla provedena každých 15 minut. Pevnost v tlaku se zvyšujícím se podílem recyklovaného písku klesala (na grafu 5.16(c)). Při zkoušce pevnosti v tahu ohybem recyklovaný písek zvýšil efekt anisotropie a výsledky tak nejsou konstantní ve všech směrech (na grafu 5.16(d)). [11]

Složka	Receptury (g)			
	M1	M2	M3	M4
Cement	1000	1000	1000	1000
Přírodní písek	1000	875	750	500
Recyklovaný písek	0	125	250	500
HPMC	1,28	1,28	1,28	1,28
Superplastifikátor	0,83	1,03	1,25	1,85
Voda	350	361,25	372,5	395

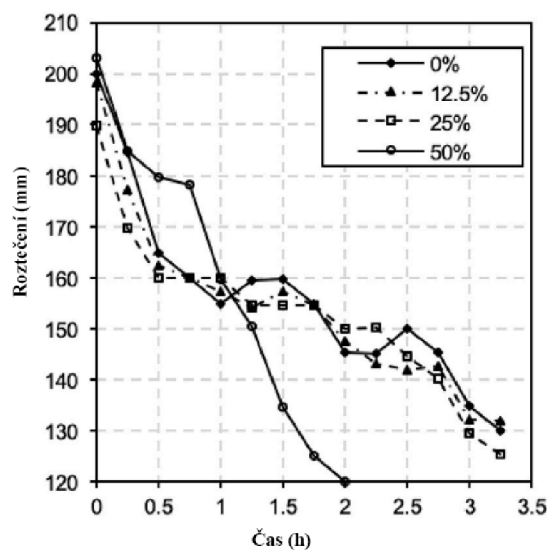
Tabulka 5.20: Receptura 9 - Ding, T. Složení jednotlivých receptur.

Vlastnost	Přírodní písek (NS)	Recyklovaný písek (RS)
Modul jemnosti	1,62	1,53
Maximální zrno (mm)	0,9	0,9
Zdánlivá hustota (kg/m^3)	2586,5	2410,7
Volně sypaná hustota (kg/m^3)	1399	1014
Kompaktní hustota (kg/m^3)	1491	1070
Vlhkost (%)	0,2	0,6
Nasákavost (%)	4,5	13,5

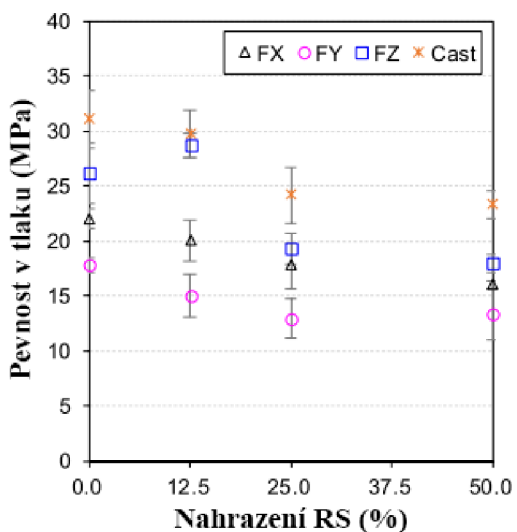
Tabulka 5.19: Vlastnosti použitého písku [11]



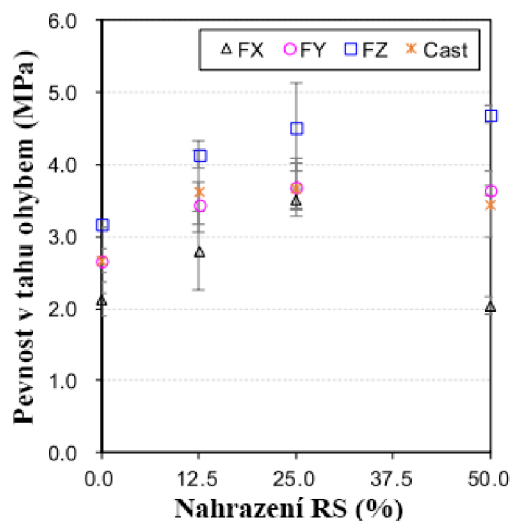
(a) Křivky zrnitosti jednotlivých materiálů.



(b) Roztečení na střešacím stolečku v čase. (Postup v kapitole 3.3.)



(c) Pevnost v tlaku pro jednotlivé receptury a směry. (zkoušení v kapitole 4.1.1)



(d) Pevnost v tahu ohybem pro jednotlivé receptury a směry. (zkoušení v kapitole 4.1.2)

Obrázek 5.16: Křivka zrnitosti, roztečení na střešacím stolečku, pevnost v tlaku a v tahu ohybem. [11]

5.4.10 Receptura 10 - Xiao, J.

Práce se zabývá mechanickými vlastnostmi a mikrostrukturou 3D tištěného betonu s vlákny a recyklovaným pískem, ale výsledky této práce zde nebudou uvádět.

Byl využit cement CEM I 42,5, písky mají maximální zrno do 0,9 mm. Přírodní písek má hustotu $2,59 \text{ g/cm}^3$ a recyklovaný písek $2,41 \text{ g/cm}^3$ s nasákavostí 1,5 %. Maximální náhrady přírodního písku recyklovaným byla 50 %. Byla použita PE vlákna a jejich vlastnosti jsou v tabulce 5.21. Dále byl použit nano jíel, superplastifikátor a hydroxypropylmethylcelulóza

Vlastnost	Hodnota
Typ	PE
Délka (mm)	12
Průměr (μm)	27
Štíhlostní poměr	440
Objemová hmotnost (g/cm^3)	0,97
Modul pružnosti (GPa)	117
Pevnost v tahu (MPa)	2500

Tabulka 5.21: Vlastnosti použitých vláken [15]

Složka	Receptury (kg/m^3)				
	M1	M2	M3	M4	<i>Pro odlití laboratorní</i>
Cement	320	320	320	320	320
Přírodní písek	320	160	320	160	320
Recyklovaný písek	0	160	0	160	0
Nano jíly	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
Vlákná	0	0	3,2	3,2	0
Superplastifikátor	0,24	0,27	0,42	0,49	0,24
HPMC	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41
Voda	112	134	112	134	112

Tabulka 5.22: **Receptura 10 - Xiao, J.** Složení jednotlivých receptur. [15]

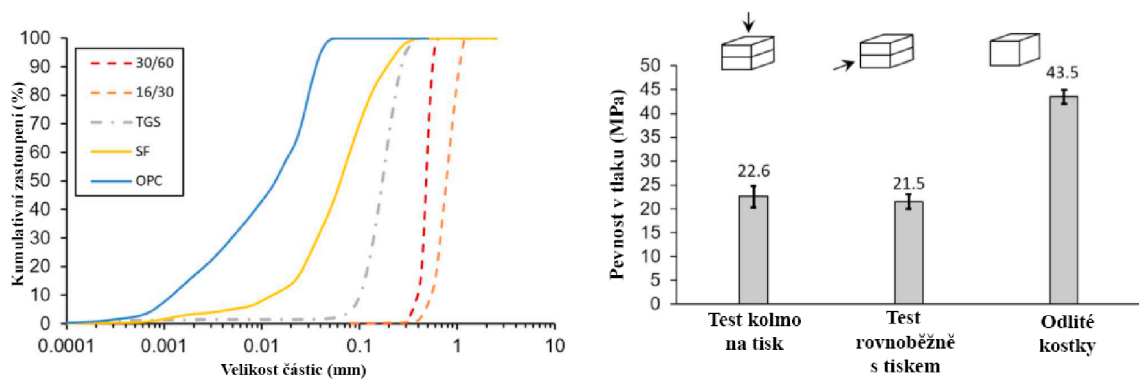
(HPMC) pro modifikaci konzistence a dávka byla určena na základě strásacího stolku, kde by roztečení mělo být mezi 190 a 210 mm (zkouška v kapitole 3.3). Receptura je v tabulce 5.22. [15]

5.4.11 Receptura 11 - Marchment, T.

V receptuře je použit portlandský cement pro obecné účely, písek TGS byl dodán od TGS Industrial Sand Ltd., Australia a zbylé dva písky byly dodány od Sibelco Pty Ltd. Superplastifikátor je na bázi karboxyetherový polymer a jedná se o model MasterGlenium SKY 8379 a modifikátorem viskozity je MasterMatrix 362. Receptura je v tabulce 5.23 a křivky zrnitosti složek jsou na grafu 5.17(a). Na grafu 5.17(b) jsou pevnosti v tlaku a na obrázku 5.17(c) je obrázek ze zkoušky. [16]

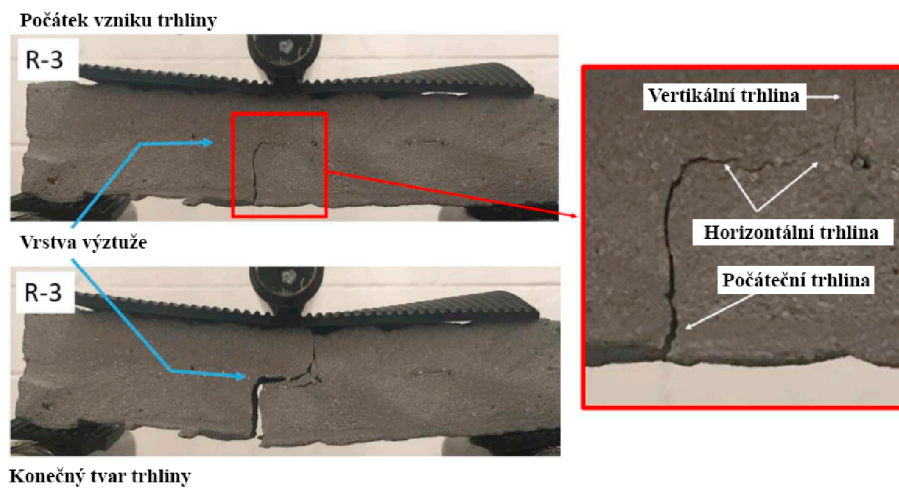
Složka	Hmotnostní poměr
Cement	0,9
Mikrokřemičité úlety	0,1
Písek (30/60)	0,47
Písek (16/30)	0,7
Písek (TGS)	0,88
Voda	0,28
Superplastifikátor (ml)	6,7
Modifikátor viskozity (ml)	8

Tabulka 5.23: Receptura 11 - Marchment, T. Složení jednotlivých receptur. [16]



(a) Křivky zrnitosti surovin.

(b) Pevnosti v tlaku v různých směrech zatěžování. (V kapitole 4.1.1).



(c) Obrázek vývoje trhlin v tahu ohybem.

Obrázek 5.17: Křivka zrnitosti, pevnostní charakteristiky a tvar trhliny. [16]

Složka	Autor / Receptura v hmotnostním poměru					
	Le et al.	Malaeb et al.	Weng et al.	Gosselin et al.	Ji et al.	Mechtcherine et al.
Cement	1	1	1	1	1	1
Příměsi	0,286	0	1	0,286	0	0,4
Mikro silika	0,1	0	0,1	0,286	0	0,3
Jemné kamenivo	2,143	1,920	0,5	1,286	3,2	>3,369
Hrubé kamenivo	0	0	0	0	3,620	<0,886

Tabulka 5.24: Receptury od různých autorů. [17]

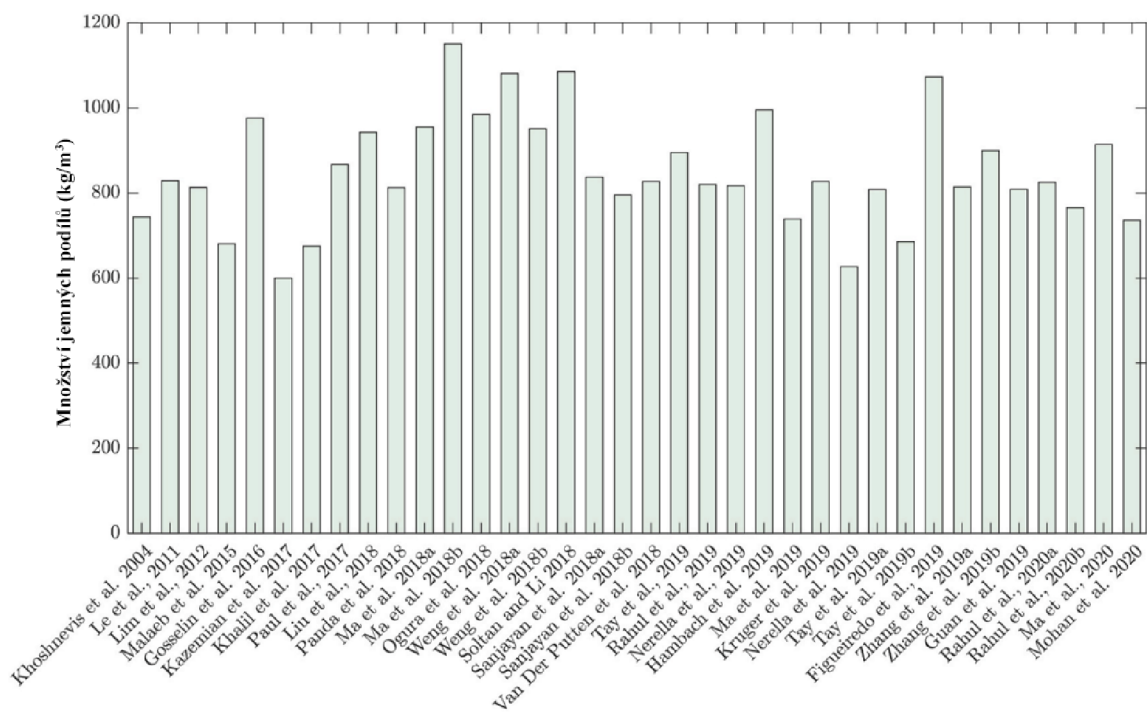
5.4.12 Receptura 12 - 18

V tabulce 5.24 je několik receptur od různých autorů. Chybí ovšem dávky přísad, ale lze počítat s dávkou superplastifikátoru v dávce od 0,1% až 2 %. Často jsou využívány i přísady modifikující reologii a u nich je dávka určena výrobcem. [17]

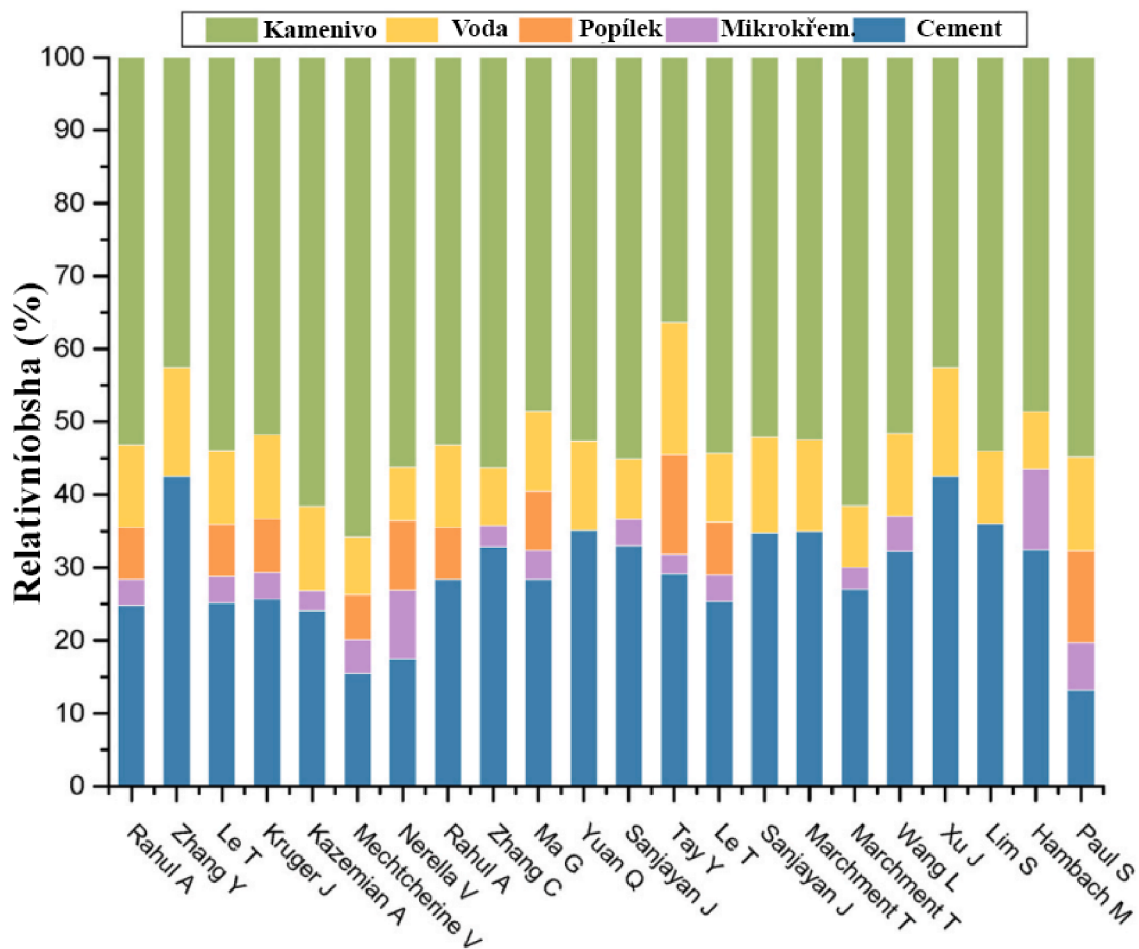
5.5 Shrnutí receptur

Na grafu 5.18 lze vidět porovnání celkového množství pojiva (cement s příměsí), které je využíváno v recepturách 3D tisku. Na grafu 5.19 je vidět relativní procentuální zastoupení jednotlivých složek využívaných v 3D tisku.

Množství jemných podílů, tedy cementu s příměsí se pohybuje nejběžněji mezi 600 až 900 kg/m^3 . Naprosté minimum je kolem 300 kg/m^3 a maximum je 1200 kg/m^3 . Je rozšířené využití mikrokřemičitých úletů a nano jíílů, případně metakaolinu. Dále ve většině případů je využíváno maximální zrno kameniva do 2 mm. Čínské studie zkoumají využití recyklovaného písku a práce poukazují, že to je možné. Běžně jsou využívány i vlákna různých druhů, ale zejména dílky 6 mm. V každé receptuře je využita plastifikační přísada, nejčastěji superplastifikační, na bázi polykarboxylátů. Často je také využívána přísada modifikující viskozitu na bázi celulózy. [7],[2],[8],[5],[12],[10],[13],[14],[11],[16],[6],[17],[3],[15]



Obrázek 5.18: **Množství pojiva v různých 3D recepturách.** V grafu je vyneseno celkové množství pojiv v recepturách pro 3D tisk. [6]



Obrázek 5.19: **Různé receptury pro 3D tisk.** V grafu jsou různé receptury pro 3D tisk. [12]

Kapitola 6

Parametry 3D tiskáren

Výběr parametrů pro 3D tisk je velice důležitá část technologie. Existuje spousta možností nastavení parametrů a i spousta konstrukcí 3D tiskárny. Výzkum v této kategorii je zatím malý, ale vzhledem k popularitě 3D tisku je jen otázka času než bude tato problematika dostatečně prozkoumána a otestována. Metody kladení vrstev jsou závislé na mezi kluzu v trysce. Měření viskozity a meze kluzu je ovšem velice komplikované a to zejména v reálném čase a pro množství materiálu, která jsou čerpána. Na mez kluzu je třeba brát ohled i při vyztužování, protože velice ovlivňuje kvalitu obalení výztuže. [8]

6.1 Typy kladení vrstev

Vrstvy lze klást několika způsoby. Můžeme typy kladení dělit podle tvaru trysky, ale to již bylo provedeno v rámci bakalářské práce [4].

Nekonečná cihla

Při tomto typu vytlačení materiál má na úrovni hlavice dostatečně vysokou viskozitu, aby dokázal držet tvar. Vytlačený materiál tak zůstává nezdeformovaný. Tento tisk je vidět na obrázku 6.1(a). [8]

Volné tečení (roztékání)

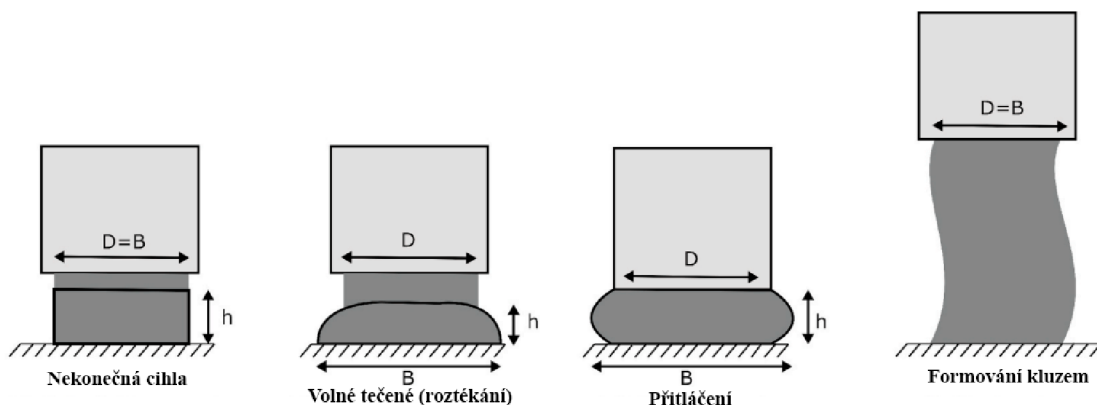
K volnému tečení nebo roztékání dochází pokud tištěný materiál nemá dostatečně vysokou viskozitu a mez kluzu. Vlivem gravitace dochází k tečení, dokud se síla gravitace nevyrovná mezi kluzu. Vzniká tak tvar méně závislý na rozměrech trysky. Roztékání je vidět na obrázku 6.1(b). [8]

Přitlačení

Nejvyužívanější metodou kladení vrstev je přitlačení tištěného materiálu tryskou. Toto přitlačení má za následek deformaci vrstvy, ale výhodou je lepší přilnavost jednotlivých vrstev, díky přídavné síle, která na ně působí. Tohoto tisku lze docílit rychlejším čerpáním a pomalejším pohybem hlavice tiskárny. Tato metoda umožňuje nejlepší kontrolu nad geometrií tisku, ale způsobuje sílu navíc, která působí na předcházející vrstvy. Tato síla má za následek zvýšení požadavku na velikost meze kluzu materiálu. Tento postup kladení vrstev je na obrázku 6.1(c). [8]

Formování kluzem

Formování kluzem je metoda tisku, která se samotnou cementovou pastou nebo betonem není možná. Pro umožnění tisku touto metodou je potřebná dvojitá tryska, která zároveň při tisku cementové pasty nebo betonu ho obaluje v tenké vrstvě, která drží jeho tvar, aby se nedeformoval. Tento postup kladení vrstev je na obrázku 6.1(d). [8]



Obrázek 6.1: **Různé verze kladení vrstev.** Na obrázku jsou různé verze kladení vrstev podle tvaru trysky a výšky kladení. [8]

6.2 Směr kladení vrstev

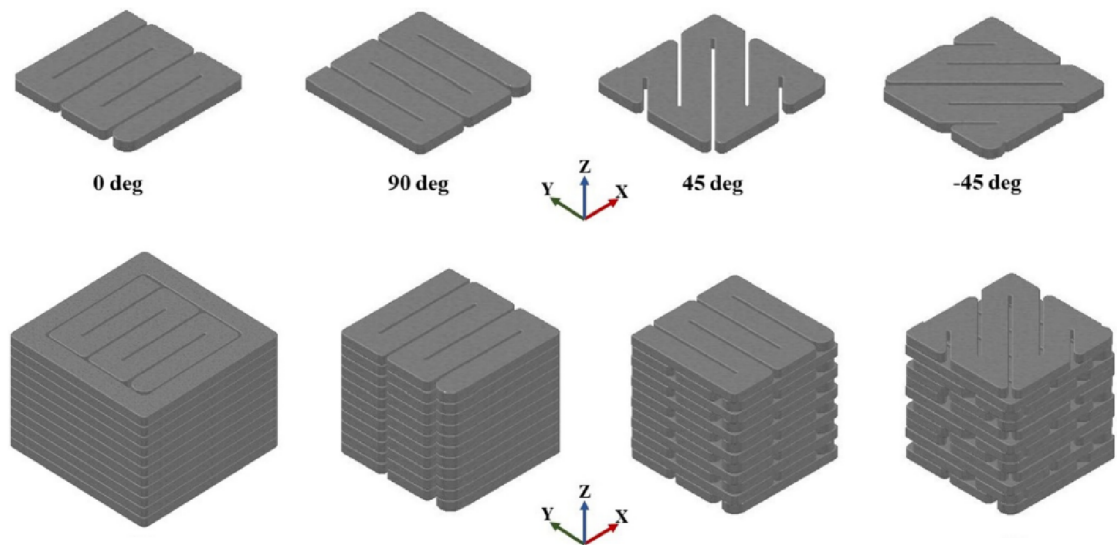
Na výsledné parametry vytištěné konstrukce má velký dopad i směr tisku, překládání a skládání vrstev. Další dopad má metoda vyplnění prázdných prostorů v konstrukci. Vhodný návrh těchto směrů by měl vycházet z požadavků na pevnostní charakteristiky v různých směrech. Vytištěná konstrukce je tedy oproti monolitické konstrukci více citlivá na směr zatížení. Na obrázku 6.2 je schéma různých možností tisku kostky, pevnostní charakteristiky a použitá receptura je v kapitole 5.4.2 a tiskárna je v kapitole 6.6.2. Tato vlastnost se zároveň projevuje anisotropií vytištěných prvků, ale to bylo popsáno v kapitole 4.

Z počátku se tato závislost jeví jako nevýhoda, ale díky tomuto vlivu směrů lze naopak navrhovat štíhlejší konstrukce, které mají parametry přesně odpovídající požadavkům ze statického návrhu. Takovéto konstrukce jsou pak plně využívány, mají menší spotřebu materiálu při výrobě a menší hmotnost. [9]

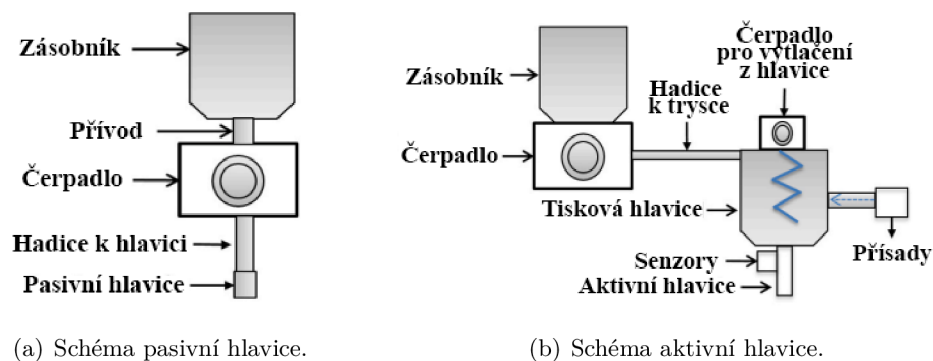
6.3 Typy tiskových hlavic

Tiskové hlavice lze rozdělit podle jejich tvaru, ten má vliv na tvar vrstev. Zajímavější je rozdělení na pasivní a aktivní tiskové hlavice. Pasivní hlavice slouží pouze jako výstup materiálu pro 3D tiskárnu. Schéma pasivní hlavice je na obrázku 6.3(a). Pasivní hlavice má výhodu jednoduché konstrukce, ale je primitivní a nedokáže ovlivnit viskozitu tištěného materiálu.

Aktivní hlavice má komplexní návrh a je potřeba vyřešit kontinuální rozmíchávání přísad do tištěného materiálu. Schéma je na obrázku 6.3. Aktivní hlavice jsou rozšířeny, protože dokáží vyřešit kontradikci požadavků na materiál. Při čerpání materiál může být tedy velmi



Obrázek 6.2: Některé možnosti směru kladení vrstev. [9]



Obrázek 6.3: Schéma aktivní a pasivní hlavice pro 3D tisk [17].

tekutý, takže s nízkou viskozitou a mezí kluzu, a zároveň na úrovni hlavice díky přidavku přísady bude tuhý, takže s vysokou viskozitou a mezí kluzu. Nevýhodou je ovšem náročnost návrhu takové trysky. Při špatném návrhu může docházet k nedostatečnému rozmíchání přísady do objemu směsi nebo blokaci hlavice, v případě příliš velkého navýšení viskozity a meze kluzu. [17]

6.4 Možnosti tisku staveb

Pomocí 3D tisku lze k provádění staveb přistupovat ze dvou pohledů s dvěma řešeními. V závislosti na umístění tiskárny lze provádět stavby in-situ nebo je vytvářet v hale jako prefabrikáty. Druhý pohled je zda pomocí 3D tiskárny je vytištěný finální objem konstrukce nebo zda je vytištěn pouze ztracené bednění, které je následně vylito tradičním betonem.

Kombinací těchto pohledů a řešení nám vzniknou čtyři základní způsoby provádění stavby z 3D tisku. Schématicky jsou tyto verze na obrázku 6.4. [17]

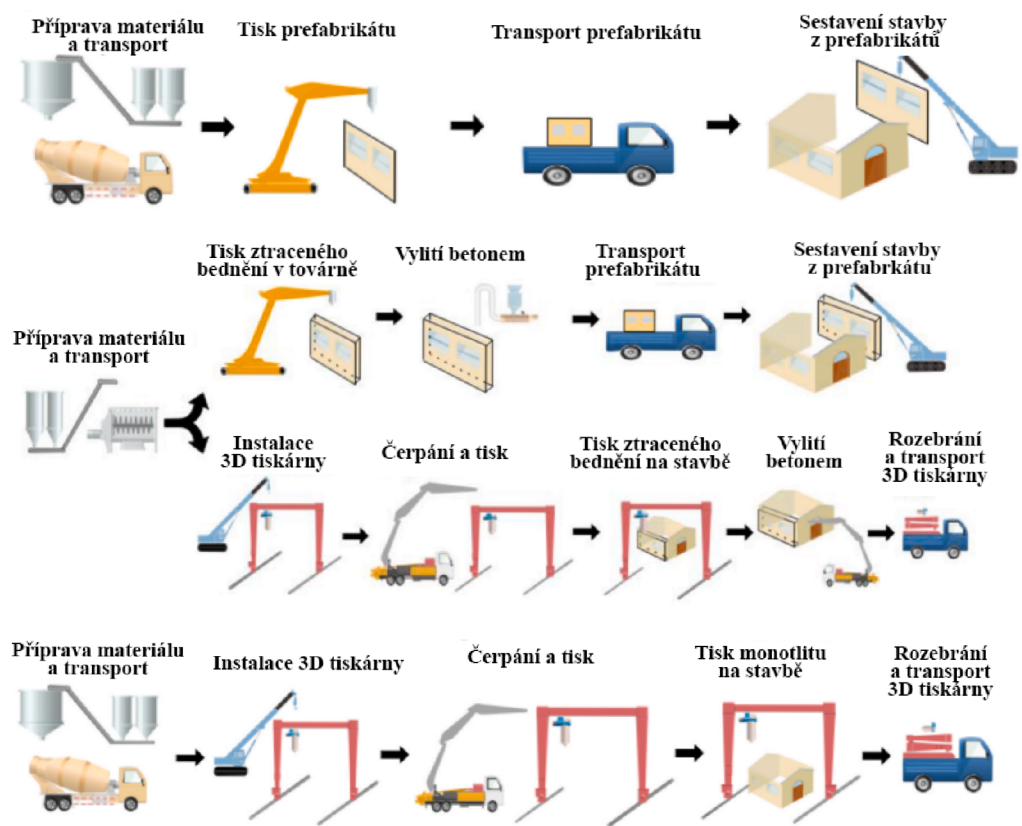


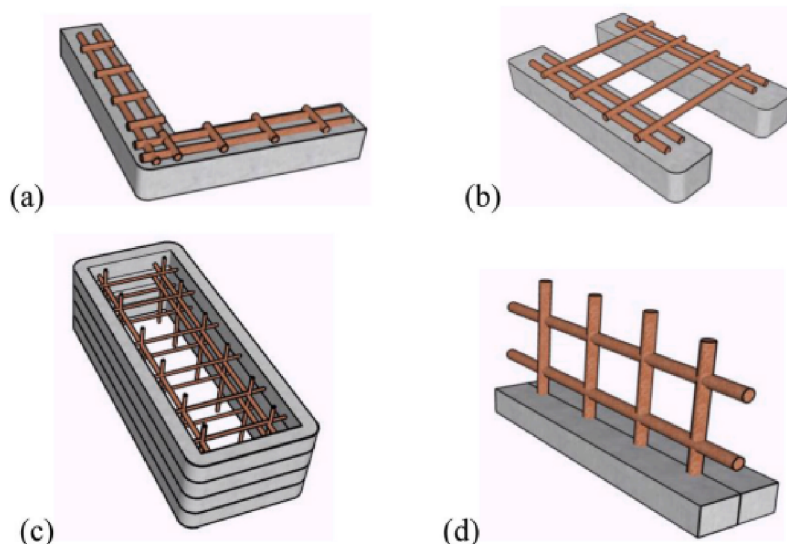
Fig. 1. Three types of large-scale 3DPC: (a) 3D printing elements, (b) 3D printing formworks, and (c) Monolithic 3DPC on-site.

Obrázek 6.4: Schéma základních způsobů provádění staveb. [17]

U jednotlivých možností je ovšem třeba dbát na parametry, které se tím změjí. Patří mezi ně například vzdálenost čerpání, velikost trysky, stabilita okolních podmínek, doba od prvotního míchání s vodou a další. Tyto vlastnosti mohou zásadně ovlivnit požadavky na materiál v čerstvém stavu a na vývoj těchto vlastností v čase, což vede ke změně receptury. [17]

6.5 Možnosti vyztužení tištěných konstrukcí

Existuje několik metod vyztužení. Nejpoužívanější je zlepšení tahových pevností pomocí vláken v receptuře nebo je možné využít vkládání výztuže mezi vrstvy tisku 6.5(a) a (b), další možností je vložit výztuž do vytištěné konstrukce a zalít betonem 6.5(c). Alternativní možností je využít dodatečně předpínané výztuže v otvorech konstrukce nebo výztuž upnutá na venkovní straně prvku. Poslední možností je návrh speciální trysky, která dokáže tisknout kolem výztuže skrz vrstvy 6.5(d). Tiskárna je detailněji popsána v kapitole 6.6.6 [18] a alternativní verze je v kapitole 6.6.7. [17] Dále je možnost vpichování hřebíků do vrstev, tato možnost je popsána v práci [7], problémy této metody a ostatních vpichovacích metod jsou takové, že při vpichu dojde ke vzniku mikrotrhlin a výztuž není kvůli vysoké viskozitě materiálu dostatečně obalena. Oba tyto problémy mají dopad na pevnostní charakteristiky.



Obrázek 6.5: Možnosti v ukládání výztuže do tištěných konstrukcí. [17]

Alternativní metodou je společný tisk. Tiskárna tiskne konstrukci, ale zároveň tiskne i ocelovou výztuž metodou 3D tisku. Tato metoda umožňuje optimalizaci jak tvaru konstrukce, tak i tvaru výztuže, ale je otázkou jaký vliv má vysoká teplota z tisku kovů na vlastnosti materiálu kolem. V posledním případě je možné konstrukci vůbec nevyztužovat a navrhnout ji tak, aby byla celá v tlaku. [7],[18]

6.6 Příklady tiskáren a jejich parametrů tisku

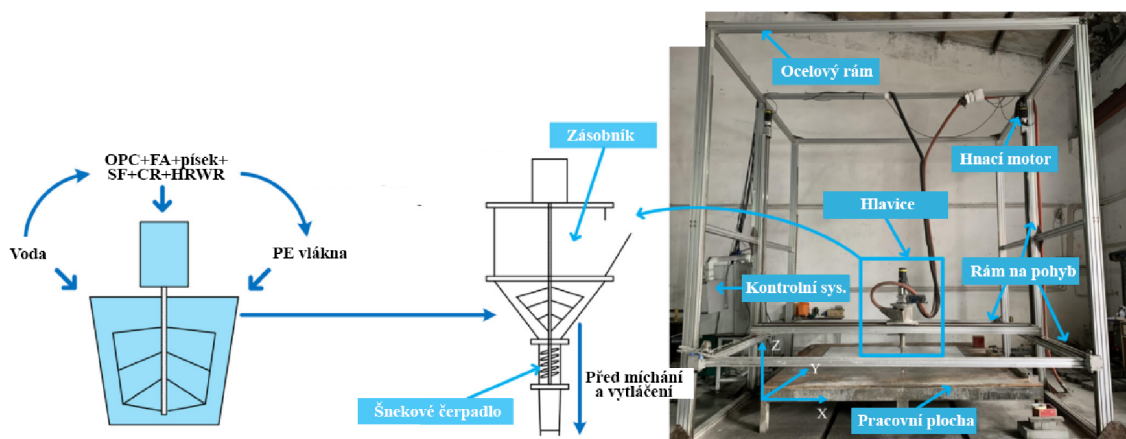
V této části se zabývám rešerší tiskáren, které jsem našel. Tiskárny vždy pojmenovávám podle autorů práce, ve které byla tiskárna nalezena a odkáži případně i na receptury, které pomocí tiskárny byly tisknuty.

6.6.1 Tiskárna 1 - Ye, J. a Xiao, J.

Tato tiskárna byla použita pro tisk receptur 2 (v kapitole 5.4.2), 7 (v kapitole 5.4.7) a 10 (v kapitole 5.4.10). Jedná se o laboratorní tiskárnu vyvinutou na univerzitě Tongji. Postup míchání, schéma tiskárny a obrázek s popisem tiskárny je na obrázku 6.6.

Míchání probíhá cyklicky a materiál není čerpán, ale je umístěn do 20 litrové nádrži nad hlavicí tiskárny, ze které je následně odebírán. Hlavice tiskárny lze jednoduše měnit buď na kruhovou nebo obdélníkovou různých rozměrech. Schéma na obrázku 6.7. Rychlost tisku je 10 mm/s a rychlost čerpání 1 L/min pro velikosti trysek 15x30 mm, 10x50 mm a 10x100 mm.

Pracovníci pro tisk využívají častěji obdélníkovou hlavici, protože při využití kruhové vznikají mezi vrstvami otvory, jak je vidět na obrázku 6.7. [2],[10],[15]



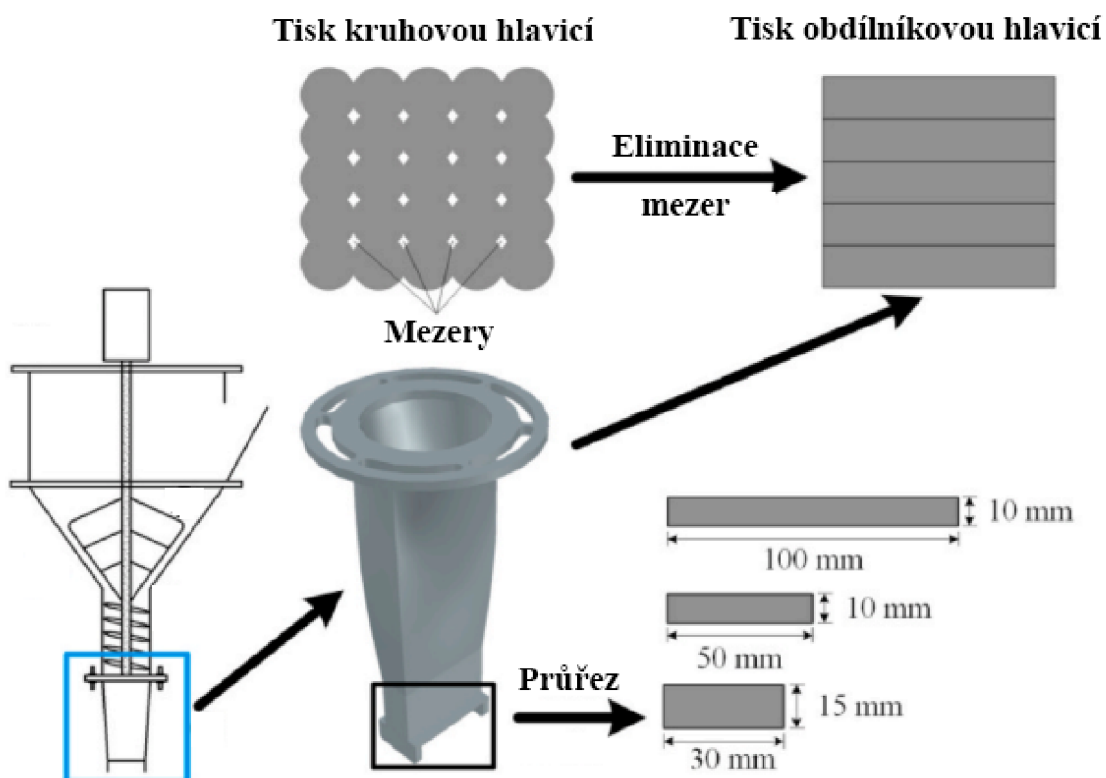
Obrázek 6.6: Tiskárna 1 - Ye, J. a Xiao, J. Na obrázku je postup přípravy materiálu pro tisk a fotka tiskárny. [10]

6.6.2 Tiskárna 2 - Heras Murcia, D.

Tato tiskárna byla použita pro tisk receptury 3 (v kapitole 5.4.3). Jedná se o laboratorní tiskárnu a její fotky jsou na obrázku 6.8. Pro tisk byla využita kruhová tryska o průměru 20 mm a výšce vrstvy 10 mm, rychlost čerpání byla mezi 2,88 L/min a 10,68 L/min v závislosti na reologii tištěného materiálu a rychlost pohybu byla 50 mm/s. Tiskárna má tiskovou plochu velikosti 2x2x2 m. [9]

6.6.3 Tiskárna 3 - Chen, Y.

Tato tiskárna byla použita pro tisk receptur 4 (v kapitole 5.4.4). Jedná se o laboratorní tiskárnu a její schémata jsou na obrázku 6.9. Tisková plocha je 3000x1000x650 mm a maximální rychlost tisku je 50 mm/s. Tisková hlavice je čtvercová o hraně 55 mm a je jednoduše vyměnitelná. Tato tisková hlavice s vytlačovacím systémem byla navržena pro maximální velikost zrna 20 mm. Do této tiskárny ovšem není materiál čerpán, ale je manuálně plněn do zásobníku nad tryškou. [7]



Obrázek 6.7: Schéma jedné používané trysky. [2]

6.6.4 Tiskárna 4 - Arunothayan, Arun R.

Tato tiskárna byla použita pro tisk receptur 5 (v kapitole 5.4.5). Jedná se o laboratorní tiskárnu a její schémata jsou na obrázku 6.10. Rychlost tisku se pohybovala mezi 20 až 50 mm/s a průměry trysek jsou na obrázku 6.11. [13]

6.6.5 Tiskárna 5 - Ding, T.

Tato tiskárna byla použita pro tisk receptur 6 (v kapitole 5.4.6) a 9 (v kapitole 5.4.9). Jedná se o laboratorní tiskárnu a její fotky jsou na obrázku 6.12. Na obrázku je vyvinutá tiskárna o tiskové ploše 3x3x3 m. Hlavice je kruhová o průměru 30 mm a tvoří vrstvy o šířce 30 mm a výšce 15 mm. Rychlost tisku je 50 mm/s a rychlost čerpání je 1,35 L/min. Pro tisk je využíván formát STL (Stereo Lithography). [14],[11],[19]

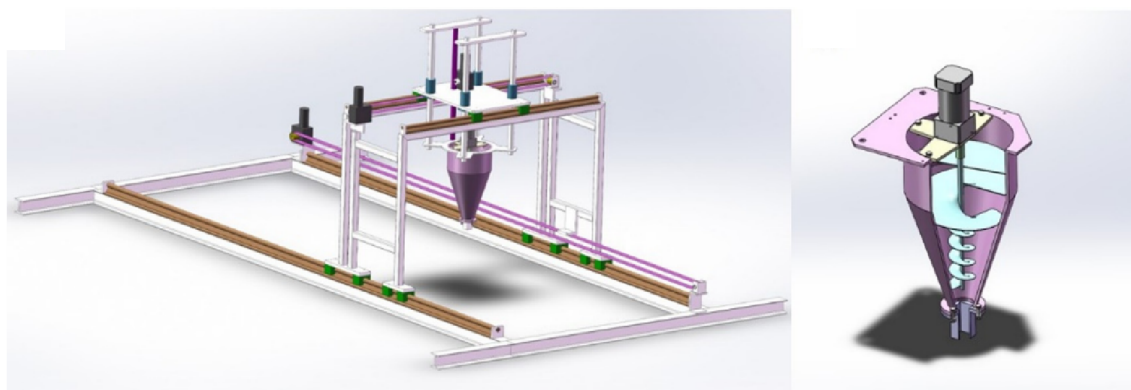
Při tisku má výška trysky dopad na soudržnost vrstev a v práci [11] bylo zjištěno, že nejvhodnější výška trysky pro recepturu 9 (v kapitole 5.4.9) je 5 mm.

6.6.6 Tiskárna 6 - Kristombu, B.

Na obrázku je speciální tisková hlavice pro tisk výztuží ve směru kolmo na vrstvy. Tato verze využívá předem umístěnou výztuž a následně tiskne kolem této výztuže díky návrhu hlavice. [18]



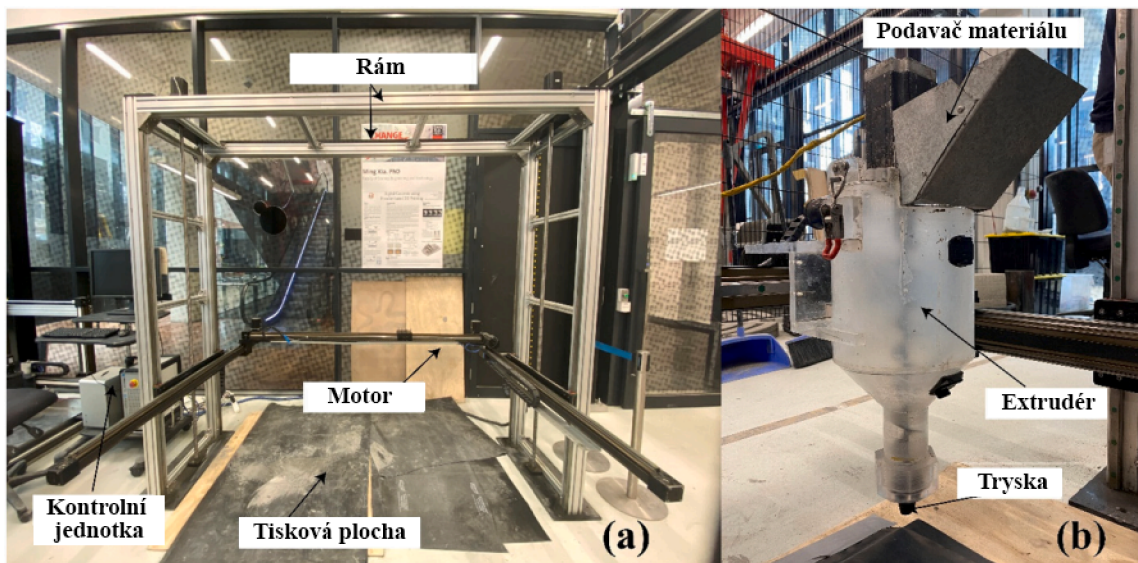
Obrázek 6.8: **Tiskárna 2 - Heras Murcia, D.** Na obrázku jsou fotky tiskárny a zařezaný vzorek z tisku. [9]



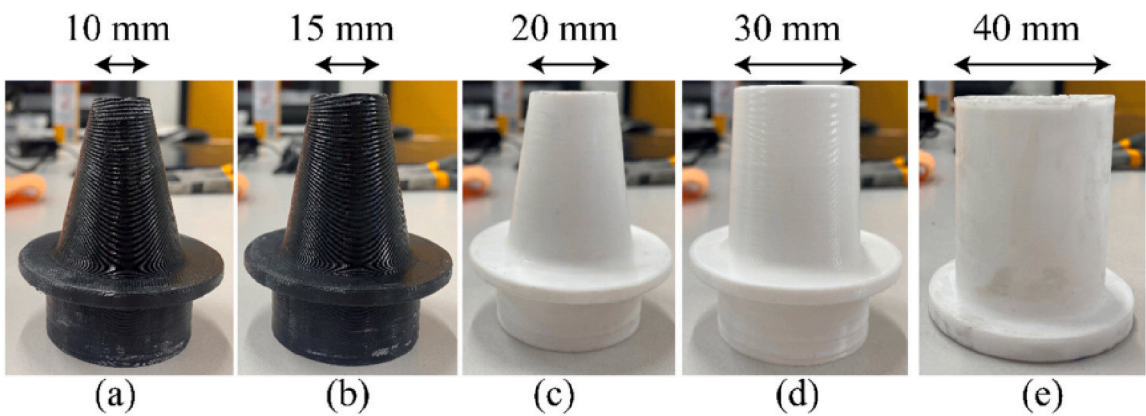
Obrázek 6.9: **Tiskárna 3 - Chen, Y.** Na obrázku je schéma tiskárny a tiskové hlavice. [7]

6.6.7 Tiskárna 7 - Marchment, T.

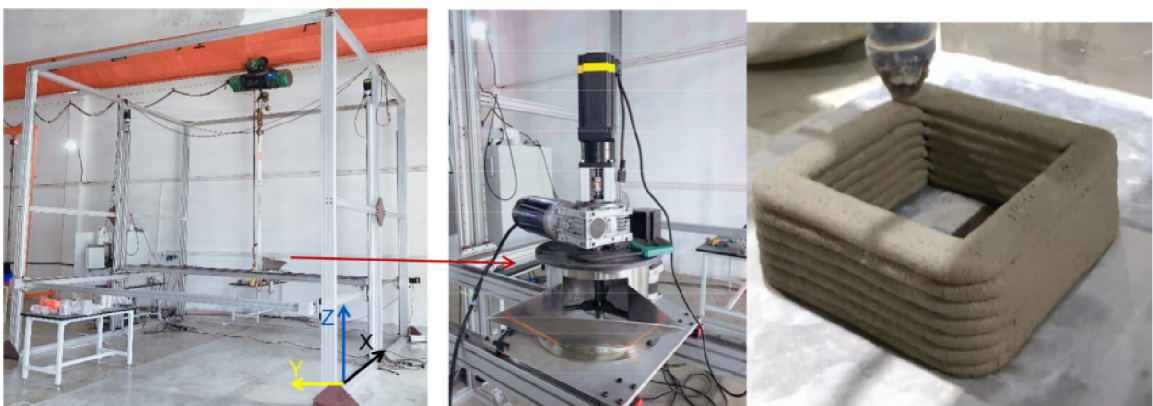
Tato tiskárna byla použita pro tisk receptur 11 (v kapitole 5.4.11). Na obrázku je schématické znázornění tiskové hlavice. 6.14. Tiskárna využívá píst o průměru 50 mm a délce 400 mm jako zásobník materiálu, ze kterého je materiál vytlačen skrz speciální tiskovou hlavicí, která materiál formuje na velikost 30x17 mm. Řez touto tryskou je na obrázku 6.15. Schématické znázornění procesu tisku materiálu s výztuží je na obrázku 6.16 a ukázkový vzorek je na obrázku 6.17. [16]



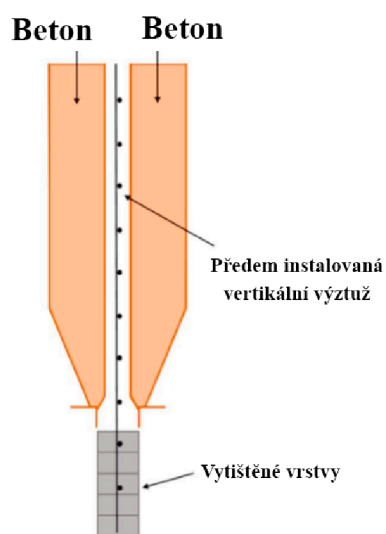
Obrázek 6.10: Tiskárna 4 - Arunothayan, Arun R. Na obrázku jsou fotky tiskárny a hlavice. [13]



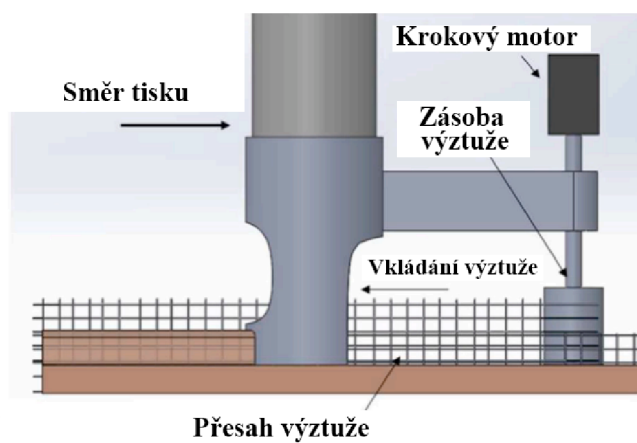
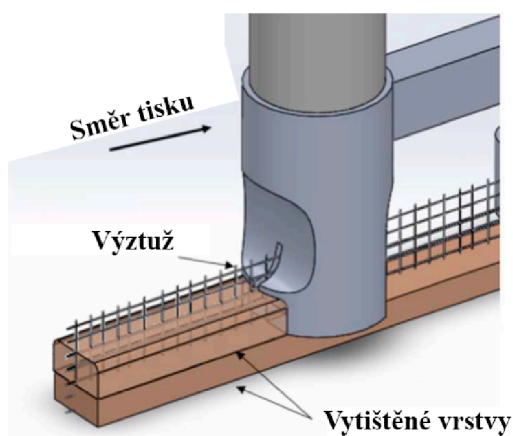
Obrázek 6.11: Na obrázku jsou různé průměry trysek, které byly v rámci práce zkoušeny. [13]



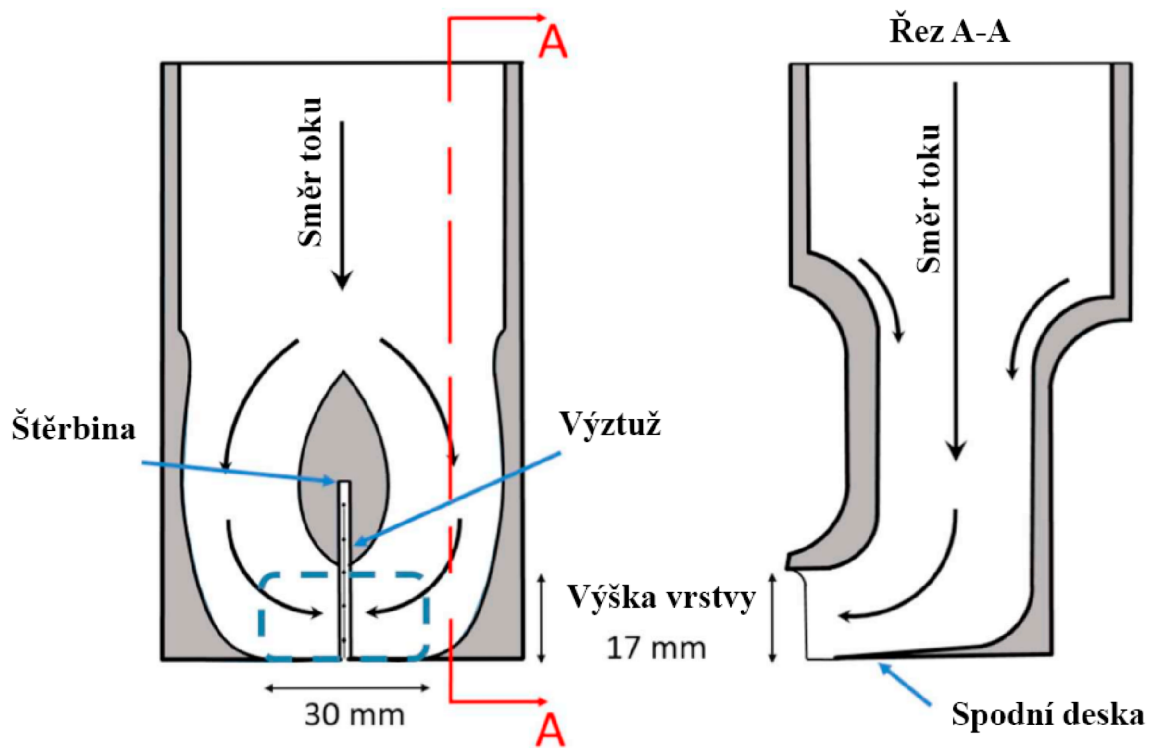
Obrázek 6.12: Tiskárna 5 - Ding, T. Na obrázku jsou fotky tiskárny. [19]



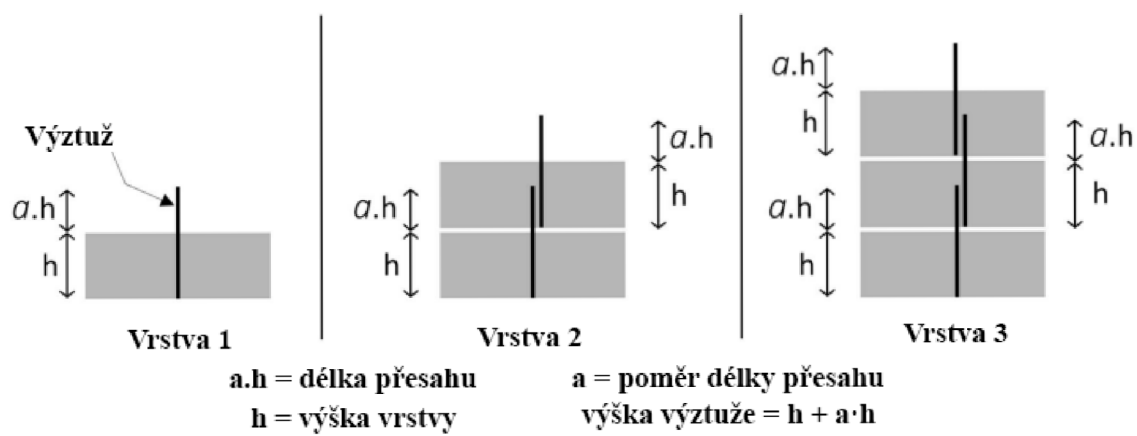
Obrázek 6.13: Tiskárna 6 - Kristombu, B. Na obrázku je speciální hlavice pro tisk s výztuží. [18]



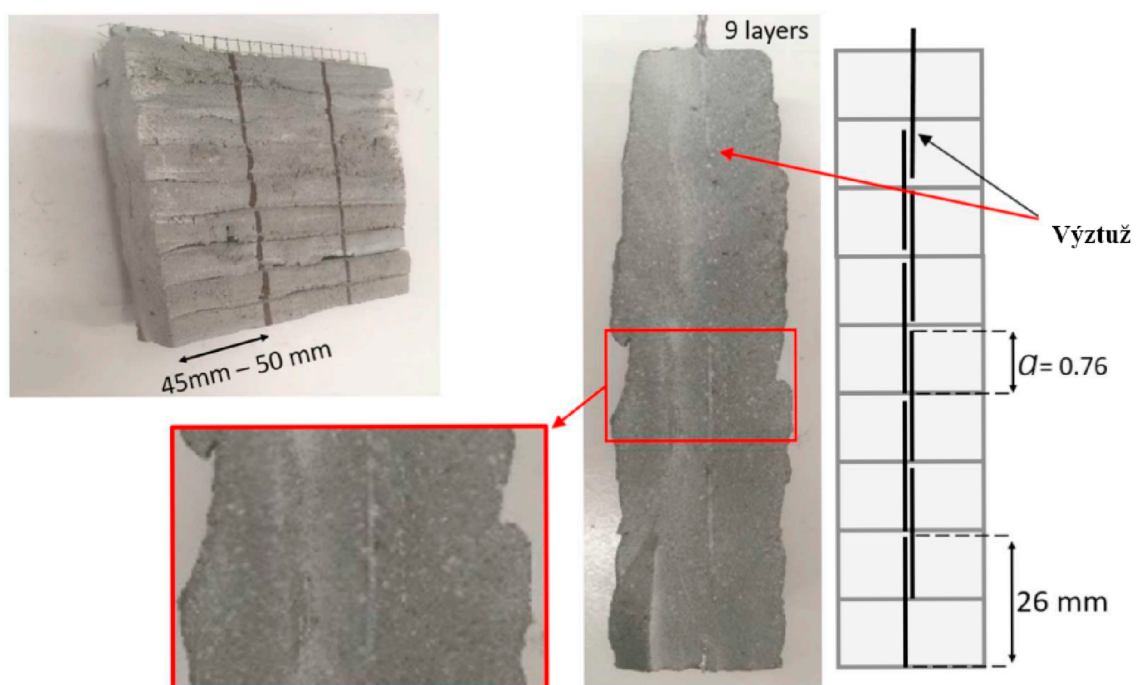
Obrázek 6.14: Tiskárna 7 - Marchment, T. Schéma a popis fungování speciální tiskové hlavice. [16]



Obrázek 6.15: Řez tryskou. [16]



Obrázek 6.16: Schématické znázornění procesu tisku materiálu s výztuží. [16]



Obrázek 6.17: Fotky vytištěného vzorku. Jeho porušení je na obrázku 5.17(c). [16]

6.7 Shrnutí tiskáren

Tiskárna je důležitou částí 3D tisku, její vývoj je tedy stejně důležitou částí jako vývoj materiálu. V rámci této práce byly popsány převážně laboratorní tiskárny, které mají zásobník materiálu. Materiál tedy není nutné čerpat a odpadá tak jedna ze zásadních problémů tisku. Zároveň pro výzkum prováděný v pracích, kde jsou tyto tiskárny využívány, toto není problém vzhledem k cílům prací.

Převážně je využívána kruhová tryska, která je ale nevýhodná v případě tisku plných prvků, ale v případě tisku tenkostěnných prvků je vyhovující. Průměry kruhové trysky se pohybují v mezi 10-40 mm, ale 30 mm je využíváno nejčastěji. Rozměry obdélníkové trysky se pohybují pro šířku mezi 30-100 mm a pro výšku mezi 10-17 mm. Alternativně je prováděn výzkum na speciálních hlavicích, které dokáží zakomponovat výztuž kolmo na směr kladení vrstev. Rychlost tisku je mezi 20-50 mm/s s rychlostí čerpání mezi 1,35-10,68 L/min. [7],[2],[10],[9],[13],[16],[19],[18],[15]

Kapitola 7

Návrh vlastní receptury

Návrh vlastní receptury byl velice náročný a skončil pouze polovičním úspěchem. Největší komplikace při návrhu byla nemožnost otestovat numericky vlastnosti směsi. Nejen, že neexistují vhodné zkoušky pro laboratorní testování při tvorbě nových receptur, ale ani neexistují testy pro definici těchto hodnot. Návrh se tak může orientovat pouze podle zkušeností.

Mimo mou nezkušenost v praxi jsem měl pouze málo příležitostí k otestování tisku navrhovaných receptur. K tomuto přispěly nejvíce dva faktory. Prvním faktorem je, že společnost ICE se svou divizí 3D tisku až v nedávné době dospěla k bodu, kdy mohou testovat různé receptury. Druhým faktorem je množství materiálu, které je potřebné k otestování. Dále se bohužel nepodařilo úspěšně namíchat použitelné směsi, ale zároveň bych se nebál říct, že jsem získal důležité poznatky pro budoucí výzkum.

7.1 Použité suroviny

V této části jsou vyjmenovány suroviny, které byly použité při míchání diplomové práce.

7.1.1 Cement

Pro míchání byl využit cement CEM I 42,5 R pytlovaný od výrobce Mokrý s objemovou hmotností 3130 kg/m^3 a měrným povrchem $309 \text{ m}^2/\text{kg}$. Tento cement byl vybrán z důvodu dostupnosti.

7.1.2 Příměsi

Jako příměsi byly vyzkoušeny vysokopecní struska, vysokoteplotní popílek Počerady, mikromletý vápenec Štramberský a hašené vápno. Detailní informace uvedu pouze pro mikromletý vápenec, protože ostatní suroviny byly použity pouze v první etapě míchání. Hašené vápno bylo použito omylem, ale mělo vlastnosti, které byly zajímavé a proto ho zde uvádím (více v kapitole 7.2).

Mikromletý vápenec od výrobce Štramberský má objemovou hmotnost 2680 kg/m^3 a měrným povrchem $280 \text{ m}^2/\text{kg}$.

7.1.3 Přísady

Jako hlavní přísada byla v práci použita Superplastifikační přísada **Dynamon NRG 1044** (značen 1044) od výrobce Mapei na bázi polykarboxylátů. V první etapě míchání byly použity plastifikátory:

Vlastnost	Cement	Mikromletý vápenec
Výrobce	Mokrá	Štramberk
Typ	CEM I 42,5 R	-
Objemová hmotnost kg/m^3	3130	2680
Měrný povrch m^2/kg	309	280

Tabulka 7.1: Vlastnosti použitého cementu a mikromletého vápence

Vlastnost	Hodnota
Typ	PE
Délka (mm)	6
Průměr (μm)	18
Štíhlostní poměr	330

Tabulka 7.2: Vlastnosti použitých vláken

- Sika Visco Crete 1035 (na bázi polykarboxylátů) (*značen 1035*),
- MC Power Flow 3130 (na bázi polykarboxylátů) (*značen 3130*),
- MC Power Flow 1130 (na bázi polykarboxylátů) (*značen 1130*),
- Stacheplast BV (na bázi ligninosulfonátů) (*značen BV*) a
- Stachment NN (FM) (na bázi sulfonovaného polykondenzátu) (*značen NN*).

Jiné přísady než plastifikátory v rámci ručního míchání nebyly využívány. Při testování tisknutelnosti byly využívány urychlovače, které byly přidávány v trysce.

7.1.4 Vlákná

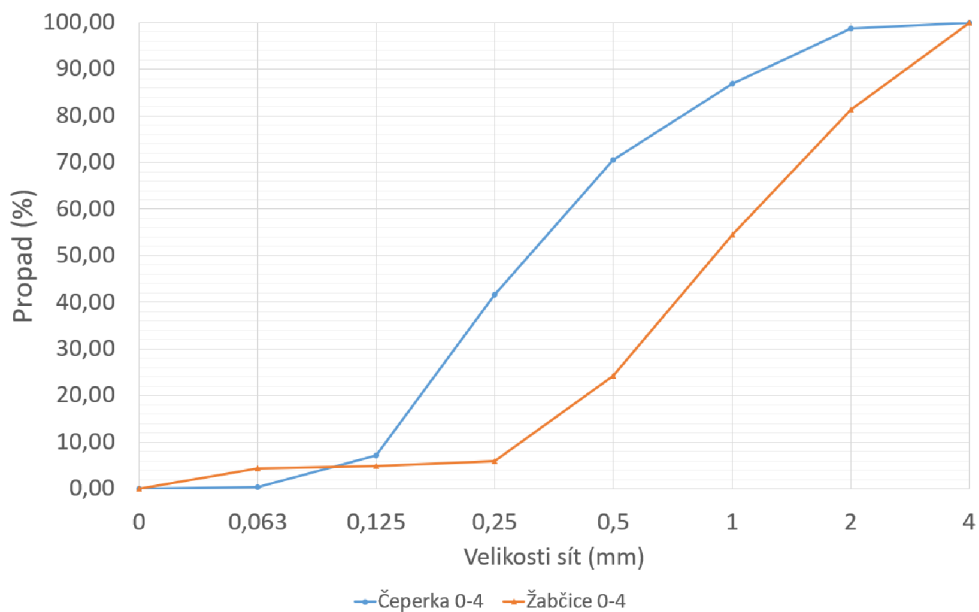
Vlákná jsou polypropylenová (PP) délky 6 mm a o průměru 18 μm .

7.1.5 Kamenivo

byly využity dva písky s maximálním zrnem 4 mm. Kamenivo se zrny do 8 mm nebylo v rámci práce zkušeno, kvůli nemožnosti čerpání takové receptury v době psaní. Hlavním kamenivem byl těžný písek Čeperka 0-4, který byl využit v druhé etapě a pro zkoušky tisknutelnosti. Druhým kamenivem je těžný písek Žabčice 0-4. Křivky zrnitosti obou kameniv jsou na grafu 7.1. Vlhkost písku Žabčice 0-4 během míchání byla přibližně 1 %. Vlhkost písku Čeperka 0-4 byla mezi 4,5-6,5 % a objemová hmotnost je 2568 kg/m^3 .

7.2 První etapa návrhu receptur

První etapa návrhu receptur sloužila jako orientační pro odhalení chyb v mnou navržených recepturách v rámci konzultací a pro odhadnutí prvotní receptury na základě sadě pokusů. V tabulce 7.3 jsou receptury, které byly namíchány v rámci této etapy. Míchání bylo prováděno v plastovém kelímku pomocí ručního mixéru. Pro receptury této etapy je využíváno pouze kamenivo Žabčice 0-4. V tabulce 7.4 jsou objemové hmotnosti a 7 denní pevnost v tahu ohybem a v tlaku. Od každé receptury bylo vytvořeno pouze jedno těleso rozměrů 40x40x100 mm.



Obrázek 7.1: Křivky zrnitosti použitých kameniv.

Největší chyba této etapy byla obrovská dávka plastifikátorů do směsi. Tuto chybu jsem v době míchání úplně přehlédl. Na množství plastifikátorů v recepturách jsem došel zamícháním cementu, strusky a vody v kelímku a pomalým přidáváním plastifikátoru, dokud nebyla dosažena vhodná konzistence. Tímto způsobem jsem došel k takto velkým dávkám plastifikátoru.

Receptura	Cement	Struska	Popílek	Vápno	Mikromletý vápenec	Žabčice 0-4	1035	3130	1130	NN	BV	Voda	Stolek
M1	350	150	0	0	0	1237,5	60	0	0	0	0	145,5	X
M2	350	150	0	0	0	1237,5	0	50	0	0	0	145,5	200
M3	350	150	0	0	0	1237,5	0	0	40	0	0	145,5	140
M4	350	150	0	0	0	1237,5	0	0	0	50	0	145,5	135
M5	350	150	0	0	0	1237,5	0	0	0	0	50	145,5	110
M6	350	0	150	0	0	1237,5	0	0	40	0	0	145,5	135
M7	350	0	0	150	0	1237,5	0	0	40	0	0	145,5	105
M8	350	150	0	0	0	1237,5	0	0	25	25	0	145,5	125
M9	350	75	0	75	0	1237,5	0	0	30	25	0	145,5	145
M10	400	300	0	0	0	1237,5	0	0	55	0	0	145,5	175
PS-40	370	150	0	0	0	1237,5	0	0	40	0	0	145,5	170
ES-40	350	250	0	0	0	1237,5	0	0	45	0	0	145,5	165
M11	350	0	0	0	150	1237,5	0	0	40	0	0	145,5	160
M12	350	0	125	25	0	1237,5	0	0	40	0	0	145,5	140
PM-40	370	0	0	0	150	1237,5	0	0	42	0	0	145,5	147
EM-40	350	0	0	0	250	1237,5	0	0	40	0	0	145,5	160
PS-20	250	270	0	0	0	1237,5	0	0	36	0	0	145,5	140
ES-20	250	350	0	0	0	1237,5	0	0	41	0	0	145,5	140

Tabulka 7.3: První návrh receptur a roztečení na strásacím stolku (všechny hodnoty v gramech, kromě roztečení v mm).

Receptura	Objemová hmotnost (kg/m^3)	Pevnost v tahu ohybem (MPa)	Pevnost v tlaku (MPa)
M3	2200	5,4	33,4
M4	2110	4,8	28,4
M5	2130	0,6	3,4
M6	2200	6,0	34,1
M7	2270	6,3	35,5
M10	2400	6,1	39,2
PS-40	2280	6,2	37,2
ES-40	2260	6	37,5
M11	2250	6,9	37,5
M12	2220	6,3	37,2
PM-40	2250	5,9	32,8
EM-40	2300	5,7	34,8
PS-20	2360	6,1	32,5
ES-20	2210	6,2	29,7

Tabulka 7.4: Objemová hmotnost a 7 denní pevnost v tahu ohybem a v tlaku na trámečcích 40x40x100 mm.

7.2.1 Testování plastifikátorů

V rámci první etapy návrhu byly namíchány receptury o stejné dávce cementu, se stejnou dávkou a typem příměsí a s konstantním množstvím vody. Všechny tyto suroviny byly zamíchány v kelímku a postupně byl přidáván plastifikátor, dokud nebyla dosažena konzistence, která vypadala vhodně pro tisk. Takto bylo vyzkoušeno 5 druhů plastifikátorů vůči sobě.

Jedná se o receptury *M1*, *M2*, *M3*, *M4* a *M5*. Zmínil bych pouze recepturu *M1* a *M2*, které ani po zrání 24 hodin neztvrdly. Tyto vzorky byly tedy vyřazeny ze zkoušky pevností.

7.2.2 Testování příměsí

V dalším kroku byly otestovány jednotlivé příměsí s jedním plastifikátorem, který se podle předchozího testu jevil jako nejvhodnější. V tomto kroku dávka všech složek zůstala identická a sledována byla pouze změna roztečení na zkoušce střešacího stolku.

Jedná se o receptury *M6*, *M7* a *M11*. Receptura *M11* byla namíchána dodatečně v pozdější fázi pro doplnění výsledků a pozorování. Během tohoto kroku došlo k záměně surovin a omylem tak bylo během míchání využito práškové hašené vápno. Tento neobvyklý materiál jako přísada se ovšem ukázal jako zajímavý pro modifikaci konzistence směsi.

7.2.3 Testování mixu plastifikátorů

Během zkoušení jednotlivých plastifikátorů se ukázalo, že i přesto že je receptura identická, tak každý plastifikátor modifikuje konzistenci směsi jiným způsobem. Některé plastifikátory ji tvořily více mazlavou a jiné zase více tixotropní. Dostal jsem tak otázku zda by nebylo možné namíchat různé plastifikátory a získat kombinaci jejich efektů.

Namíchány byly receptury *M8* a *M9*. Chování směsí bylo opravdu odlišné oproti recepturám *M3* a *M4*. Bylo to ovšem moment, kdy jsem si uvědomil, že míchání plastifikátorů pro účel modifikace konzistence by mohla být samostatná práce, tak jsem tuto myšlenku

v této práci dále nezkoušel. Navíc ani jedna z těchto receptur po 24 hodinách nez tuhla a byly tak vyřazeny ze zkoušky pevností.

7.2.4 Testování mixu cementu a příměsí

Tyto receptury vycházely z pozorování předchozích receptur. Mimo tuto skupinu stojí receptura *M12*, která byla poslední s hašeným vápnem. V této variantě jsem zkoušel zda nebude mít efekt vznik částečného geopolymeru vlivem volného hydroxidu vápna s popílkem. Na 7 denních pevnostech se ovšem navýšení ani pokles pevností oproti ostatním recepturám neprojevil. Co se týče vlastností v čerstvém stavu, tak ty bych hodnotil pro 3D tisk velice vhodně, i přesto ovšem vápno bylo vyřazeno z důvodu objemové nestability vzorků.

Ostatní receptury *M10*, *PS-40*, *ES-40*, *PM-40*, *EM-40*, *PS-20* a *ES-20*. Receptura *M10* byla označena jako příliš tekutá, aby držela tvar při tisku, ale zároveň byla tekutá příliš málo pro čerpání. Tento jev se projevil i u jedné receptury v další etapě a nejspíše je způsoben přechodem z tixotropního chování na reopixní chování.

Z receptur *PS-40*, *ES-40*, *PM-40*, *EM-40*, *PS-20* a *ES-20* byla jako nejvhodnější pro 3D tisk hodnocena receptura *PM-40*. Tato receptura dobře držela svůj tvar i bez urychlovače a vypadala čerpatelná. Druhá nejlépe hodnocená je receptura *EM-40*.

7.2.5 Shrnutí první etapy

V první etapě jsem provedl zásadní chybu, kdy bylo do receptur přidáno enormní množství plastifikátoru. Tato chyba mohla být způsobena jednoduše mou nepozorností a nedostatkem znalostí nebo za to mohou samotné plastifikátory.

Využil jsem plastifikátory ze školních laboratoří, které tam mohou stát delší dobu, mohou tedy tak být po době spotřeby a zároveň mohou volně segregovat. Zároveň při odlití plastifikátorů jsem nádobou, ze které jsem odebíral plastifikátor nezamíchal a je tak možné, že jsem používal velmi naředěné plastifikátory. Dávka by pak byla tak enormní, protože je přidáváno více vody než plastifikátoru. Osobně bych se spíše přikláněl, že jsem udělal chybu a plastifikátory naprosto předávkoval.

Při zkoušení příměsí bylo omylem použité hašené vápno. Všechny receptury s vápnem měly velmi dobré vlastnosti v čerstvém stavu, které by mohly vyhovovat 3D tisku, ale vzorky s vápnem měly vyvinuté bílé prasklinky. Nejspíše tak při použití vápna dochází k výraznějším objemovým změnám. Na pevnostech se ovšem nic neprojevílo, ale je potřeba výzkum v této oblasti.

Míchání různých plastifikátorů bylo provedeno jen velice rychle a zdá se to jako zajímavá cesta k ovlivnění viskozity, která by mohla být levnější než využívání modifikátorů viskozity. [3] Mám ovšem pocit, že tato problematika vyžaduje výzkum, na který v rámci této práce bohužel nebyl prostor a tak byla tato možnost vyřazena.

V poslední fázi byly zkoušeny různé poměry cementu a příměsí. Navíc bylo vyřazeno vápno a popílek. Z pozorování byla jako nejvhodnější receptura vyhodnocena *PM-40* s poměrem cement vůči mikromletému vápenci 1:0,4. Více ekonomickou recepturou je ovšem *EM-40* s poměrem 1:0,7. Je důležité zdůraznit, že to platí pouze pro receptury s pískem Žabčice 0-4 a že je zde velká dávka plastu a je možné, že s menší dávkou tato varianta nebude příliš dobře fungovat.

Receptura	Cement	Mikromletý vápenec	Čeperka 0-4	1044	Voda	Vlákna PP
1x3	500	300	1235	13	241	0,5
2x2 Žabčice	500	300	1235	13	280	0,5
3x3	600	400	1092,5	15,6	287,5	1
S-5-3-E	500	300	1264	13,3	191,5	0
S-5-3	500	300	1264	13,3	161,5	0
S-6-4	600	400	1017	15	161,5	0
S-5-4	500	400	1188	13	149,5	0
S-4-2,5	400	250	1306	12	130,75	0

Tabulka 7.5: Druhý návrh receptur (všechny hodnoty v gramech).

Receptura	Objemová hmotnost (kg/m^3)	Pevnost v tahu ohybem (MPa)	Pevnost v tlaku (MPa)
1x3	2230	7,0	49,4
3x3	2270	7,8	48,9
S-5-3-E	2490	X	102,3
S-5-3	2360	X	87,5
S-6-4	2350	X	103,1
S-5-4	2360	X	104,0
S-4-2,5	2340	X	98,3

Tabulka 7.6: Objemová hmotnost, 7 denní pevnost v tahu ohybem a v tlaku na trámečcích 40x40x100 mm (pro 1x3, 2x3 a 3x3) a 28 denní pevnosti v tlaku na kostkách o hraně 100 mm (pro S-5-3-E až S-4-2,5).

7.3 Druhá etapa návrhu receptur

Druhá etapa návrhu byla zahájena na základě požadavku na vývoj recepturu pro tiskovou soustavu týmu společnosti ICE. Předchozí receptury ovšem nebyly využity, kvůli chybě v dávkování plastifikátoru a na základě rad vedoucího práce prof. Ing. Rudolfa Hely, CSc., který doporučil zvýšit celkovou dávku jemných podílů. Na tomto základě byly navrženy receptury v tabulce 7.5. V tabulce 7.6 jsou objemové hmotnosti a 7 denní pevnost v tahu ohybem a v tlaku pro receptury 1x3 a 3x3, zkoušeny na jednom vzorku 40x40x100 mm, pro receptury S-5-3-E, S-5-3, S-6-4, S-5-4 a S-4-2,5 jsou v tabulce 28 denní pevnosti, zkoušeny na třech krychlich o hraně 100 mm.

Receptury byly míchány v 8 litrové cementářské míchačce. Vyrobené vzorky byly zavibrovány a uloženy do vody po doby 28 dní.

Receptura	Cement	Mikromletý vápenec	Čeperka 0-4	1044	Voda	Vlákná PP
<i>1x1</i>	<i>500</i>	<i>300</i>	<i>1235</i>	<i>13</i>	<i>219</i>	<i>0,5</i>
<i>1x2</i>	<i>500</i>	<i>300</i>	<i>1235</i>	<i>13</i>	<i>234</i>	<i>0,5</i>
<i>1x3</i>	<i>500</i>	<i>300</i>	<i>1235</i>	<i>13</i>	<i>241</i>	<i>0,5</i>
<i>2x1 Žabčice</i>	<i>500</i>	<i>300</i>	<i>1235</i>	<i>13</i>	<i>255</i>	<i>0,5</i>
<i>2x2 Žabčice</i>	<i>500</i>	<i>300</i>	<i>1235</i>	<i>13</i>	<i>280</i>	<i>0,5</i>
<i>2x3 Žabčice</i>	<i>500</i>	<i>300</i>	<i>1235</i>	<i>13</i>	<i>305</i>	<i>0,5</i>
<i>3x1</i>	<i>600</i>	<i>400</i>	<i>1092,5</i>	<i>15,6</i>	<i>246,5</i>	<i>0,5</i>
<i>3x2</i>	<i>600</i>	<i>400</i>	<i>1092,5</i>	<i>15,6</i>	<i>287,5</i>	<i>0,5</i>
<i>3x3</i>	<i>600</i>	<i>400</i>	<i>1092,5</i>	<i>15,6</i>	<i>287,5</i>	<i>1</i>
S-5-3-E	500	300	1264	13,3	191,5	0
S-5-3	500	300	1264	13,3	161,5	0
S-6-4	600	400	1017	15	161,5	0
S-5-4	500	400	1188	13	149,5	0
<i>S-4-2,5x1</i>	<i>400</i>	<i>250</i>	<i>1306</i>	<i>11</i>	<i>68,75</i>	<i>0</i>
S-4-2,5	400	250	1306	12	130,75	0

Tabulka 7.7: Recepturu i mezi receptury pro výpočet parametrů receptury. (všechny hodnoty v gramech).

Receptura	Jemné podíly	Poměr				Vodní součinitel		Stolek
		<u>cement</u> příměs	<u>cement</u> písek	<u>jemné podíly</u> písek	<u>jemné podíly+písek</u> do 0,25 mm písek-písek do 0,25 mm	<u>voda</u> cement	<u>voda</u> jemné podíly	
1x1	800	1,67	0,38	0,62	1,82	0,44	0,27	137
1x2	800	1,67	0,38	0,62	1,82	0,47	0,29	155
1x3	800	1,67	0,38	0,62	1,82	0,48	0,30	160
2x1 Žabčice	800	1,67	0,38	0,62	0,75	0,41	0,25	117
2x2 Žabčice	800	1,67	0,38	0,62	0,75	0,46	0,29	153
2x3 Žabčice	800	1,67	0,38	0,62	0,75	0,51	0,32	180
3x1	1000	1,50	0,45	0,75	2,28	0,43	0,26	153
3x2	1000	1,50	0,45	0,75	2,28	0,48	0,29	190
3x3	1000	1,50	0,45	0,75	2,28	0,48	0,29	185
S-5-3-E	800	1,67	0,38	0,60	1,80	0,39	0,24	Příliš tekuté
S-5-3	800	1,67	0,38	0,60	1,80	0,32	0,20	155
S-6-4	1000	1,50	0,56	0,93	2,40	0,27	0,16	Příliš tekuté
S-5-4	900	1,25	0,40	0,72	2,01	0,30	0,17	Příliš tekuté
S-4-2,5x1	650	1,60	0,29	0,47	1,56	0,31	0,19	130
S-4-2,5	650	1,60	0,29	0,47	1,56	0,33	0,20	150

Tabulka 7.8: Vypočítané parametry receptury.

7.3.1 Porovnání písku Žabčice 0-4 a Čeperka 0-4

Písek Čeperka 0-4 a Žabčice 0-4 se chovají velice odlišně. Toto odlišné chování je způsobeno rozdílem v křivce zrnitosti. Písek Čeperka 0-4 má do 1 mm 87 % zrn, zatímco písek Žabčice 0-4 má do 1 mm pouze 55 % zrn. Toto se projevilo nejen na větší spotřebě vody, ale i na chování v čerstvém stavu. Receptura *2x2 Žabčice* s pískem Žabčice 0-4 se chovala méně plasticky a byl méně mazlavý, měl tedy vyšší mez kluzu.

7.3.2 Receptury pro tisk

Pro tisk byly navrženy receptury *S-5-3*, *S-6-4*, *S-5-4* a *S-4-2,5*. Všechny tyto receptury by nejspíše byly vhodné se správným množstvím vody a aktivní tryskou s urychlovačem. Nejvhodnější ovšem bude receptura *S-5-3* a *S-4-2,5*, které se v čerstvém stavu chovali nejlépe. Pevnosti v tlaku těchto receptur se pohybují na úrovni 100 MPa. Zadání tedy nebylo splněno a je otázkou zda je vůbec možné navrhnout receptury pro 3D tisk s pevnostním rozmezím 20-40 MPa, vzhledem k tomu, že i receptury jiných autorů běžně dosahují 60 MPa.

7.3.3 Shrnutí druhé etapy

Během míchání směsí s velkým obsahem jemných částic, zejména receptura *S-6-4*, se nechovala tixotropně, tak jak bylo zamýšleno, ale chovala se reopexně. Což je tedy přesně opačně než je potřeba pro technologii 3D tisku potřebné. Během míchání směs ztuhla a vypadala jako mnohem sušší konzistence, ovšem ihned při vypnutí míchání směs ztekutěla a nedržela tvar. Toto nejspíše bylo způsobeno nevhodným poměrem cementu vůči písku a jemných podílů vůči písku. Zejména nejspíše bude důležitý poměr jemných podílů vůči pískům, v této receptuře se přibližoval jedničce a to je nevhodné. Zároveň by bylo vhodné tento poměr porovnávat i společně s křivkou zrnitosti jednotlivých kameniv.

Díky postupnému přidávání vody do receptur a průběžnému měření roztečení na stříšacím stolku byly vytvořeny grafy 7.2 na kterých lze sledovat velkou závislost mezi vodními součiniteli a roztečením na stolku. Zároveň lze sledovat i efekt různých kameniv a nedostatek tohoto porovnání, protože nebere v potaz vlákna a množství jemných podílů. Vliv vláken lze dobře vidět na grafu 7.2(b). A na tomto grafu je vidět i jak malý zásah do receptury má dopad na viskozitu.

7.4 Testování na tiskárně společnosti ICE

Testování receptury ve Žďáře ve společnosti ICE bylo náročné a kvůli mé chybě v zápisu receptur, došlo k přelití receptury *S-6-4*. To mělo za následek velmi snadné čerpání, ale při vytlačení, při přimíchání urychlovače došlo k blokaci, kvůli prudkému zhoršení meze kluzu a viskozity. Toto byla jediná receptura, která se zkoušela tisknout v době psaní této práce.

Bohužel prostředí ve společnosti ICE v době psaní této práce není připravené, abych mohl otestovat více receptur. Není vyřešen design aktivní trysky a řeší se problémy i s čerpáním větších zrn kameniva.

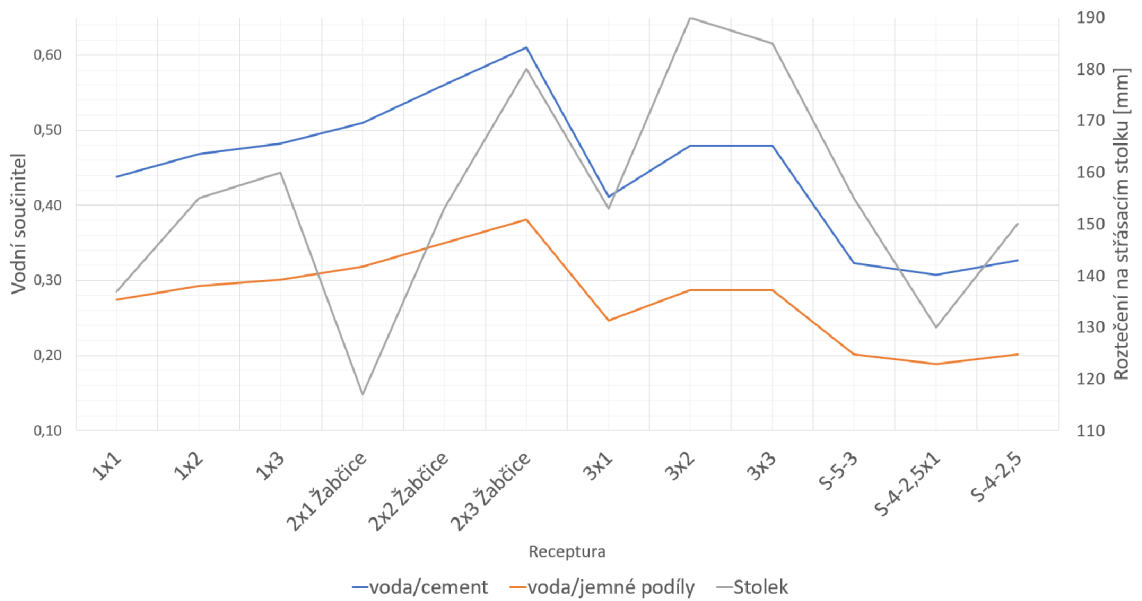
Na základě pozorování má poslední navržená receptura *S-4-2,5* všechny předpoklady pro provedení úspěšného tisku.

7.5 Shrnutí navržených receptur

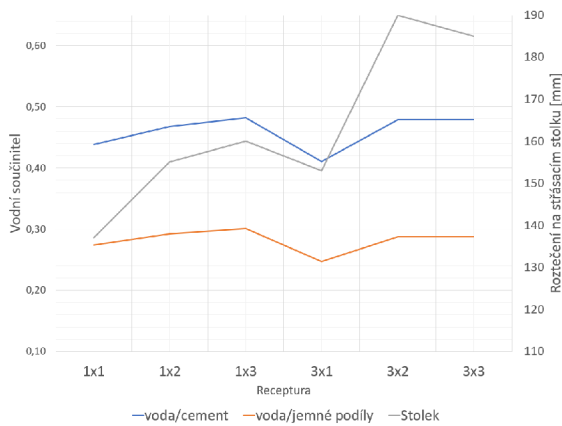
V rámci míchání a vyhodnocování bylo zjištěno, že vhodným ukazatelem tixotropie je poměr jemných podílů vůči písku. Toto je zmíněno i v 5.4.4, kde ovšem autoři uvažují poměr mezi cementem a kamenivem. Pozorování ovšem naznačují, že lepším ukazatelem je uvažovat v poměru množství všech jemných podílů (i z kameniva do 0,25 mm). Na grafu 7.3 je vidět porovnání těchto dvou poměrů a při změně kameniva poměr cement vůči příměsím tuto změnu nedokáže zaznamenat, ale poměr jemných (i s kamenivem do 0,25 mm) ano. Navíc je, vidět že při kombinaci s vodním součinitelem kopírují dobře roztečení. Všechny vynesené poměry jsou vynásobené stovkou. Anomálie je ovšem u receptur *S-5-3-E*, *S-6-4* a *S-5-4*, které do tohoto předpokladu nezapadají, bude je tedy potřebné namíchat a změřit znovu. Pokles roztečení u receptury *3x3* byl způsoben přidáním vláken. Pro ověření, zda tato závislost má statistický význam bude potřebný další výzkum.

Dávka jemných podílů pro receptury se pohybovala mezi 650-1000 kg/m^3 , což odpovídá zjištěným výsledkům z článků uvedených v kapitole 5. Zároveň na grafech 7.2 je vidět úzkost korelace vodních součinitelů vůči roztečení, ale zároveň je důležité i použité kamenivo a množství vláken. Tyto vlastnosti ovšem nejsou ve vodním součiniteli zahrnuty a cílem budoucího výzkumu bude tedy vytvořit vhodný součinitel, který by tyto parametry zahrnoval.

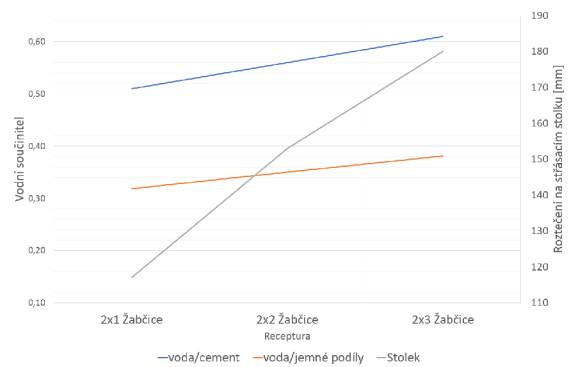
Navrhnutí vhodné receptury, kterou by se podařilo vytisknout, se bohužel v psaní této práce nepodařilo, ale díky provedeným experimentům jsem si prohloubil znalosti v oblasti návrhu receptur pro 3D tisk, které jsou velice atypické. Dalším cílem bude otestovat více receptur ve spolupráci se společností ICE a dále zkoumat vliv jednotlivých složek na reologii v čerstvém stavu, s čímž souvisí již probraný vývoj zkušebních metod.



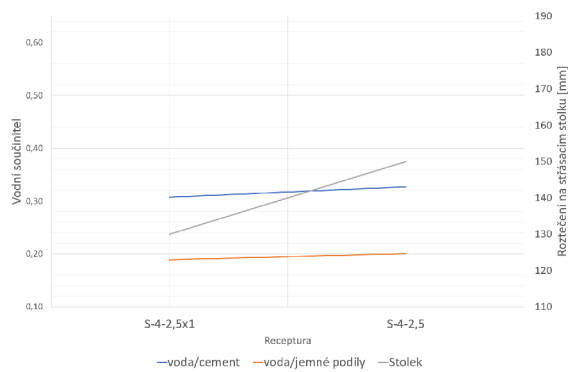
(a) Porovnání všech receptur.



(b) Porovnání receptury 1x a 3x.

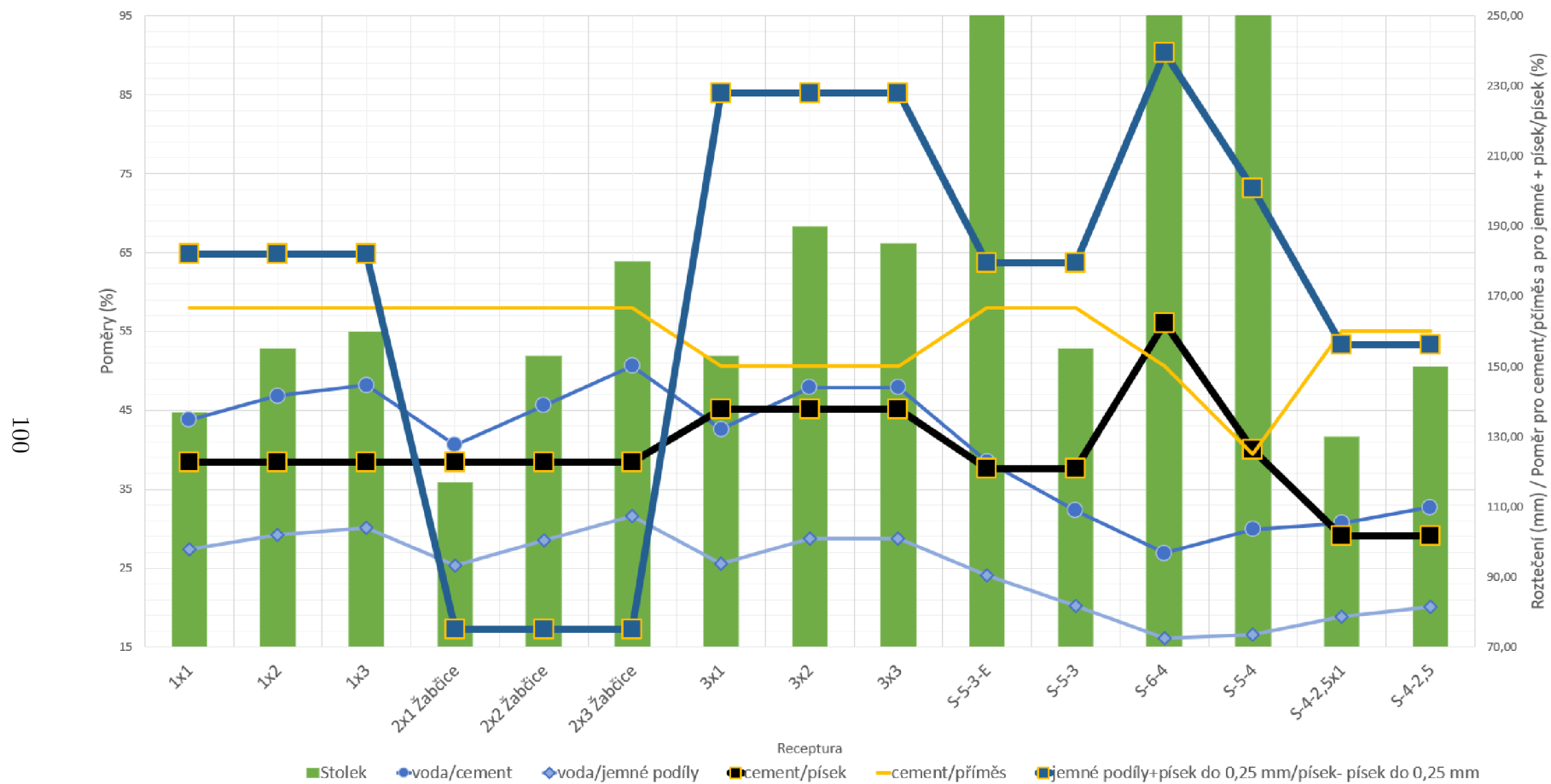


(c) Porovnání receptury s kamenivem Žabčice 0-4.



(d) Porovnání receptury S-4-2,5.

Obrázek 7.2: Závislost vodního součinitele na rozečtení na střešacím stolku.



Obrázek 7.3: Porovnání vodních součinitelů a poměrů jemných podílů vůči písku s roztečením.

Kapitola 8

Digitální výroba

Jak je uvedeno v diplomové práci výše, tak je s dnešními zkušebními metodami velice náročné navrhnout vhodnou recepturu pro 3D tisk. Dnes je možné recepturu pro 3D tisk navrhnout v podstatě pouze metodou pokus omyl, za velkých nákladů spojených s objemy, které jsou nutné pro ověření tisknutelnosti receptury. Zároveň v podstatě nelze porovnávat více směsí jinak než pozorováním a pocitem založených na zkušenostech. Dále takto navržená směs vyhovuje pouze geometrii tisku, na kterém byla prakticky testována a pro parametry tiskárny, které pro testování byly použity. Není možné recepturu lehce upravit pro změnu parametrů tisku případně jinou geometrii. Při takovýchto změnách je třeba prakticky znovu ověřit zda receptura vyhovuje změnám či nikoliv.

Zásadní problém, který je třeba vyřešit je vývoj zkušebních metod pro zjištění základních parametrů čerstvé receptury a jak fungují s tiskovými parametry.

Cílem této práce je dokázat, že tento "jednoduchý" přístup jednoduše není možný. Do dnešního dne je ve stavebnictví aplikována zkušenost, která je budována desítky let a je částečně přenášena z učitele na žáka. Pro tradiční výrobní metody tento přístup byl vyhovující, ale z mého úhlu pohledu studenta technické školy, který se v tomto oboru bude pohybovat a věnuje se již od bakalářské práce problematice automatizace výrobních metod, tak se tento přístup stává nedostatečným. Určitě je to velmi důležitý základ, na kterém budu celou tuto práci, ale zároveň není dostatečný pro použitelné vyhodnocení. Je potřeba najít způsoby jak tuto lidskou "zkušenost" a "pocit" přenést do měřitelných hodnot. Přišel jsem tak s touto radikální metodou řešení tohoto problému, který věřím bude aplikovatelný nejen pro 3D tisk.

Tato radikální metoda vychází zejména z obtížnosti měření požadovaných vlastností a má za cíl ušetření materiálu při návrhu receptur a samotném tisku. Tohoto je docíleno díky využití nepřímého měření a aproximace, vůči počítačové simulace. Navíc zapadá do moderního přístupu, který postupně přichází do stavebnictví a využívá tak trend, který lze ještě ovlivnit. V dnešní době je již běžnou praxí návrh budov s využitím BIM modelů a celkově kompletní digitální modelování. Tento trend ovšem stále nepronikl do zkušebnictví ani do samotného provádění. 3D tisk ovšem dokáže využít této digitalizace návrhu pro tisk a sám je automatizovanou metodou provádění. Jedná se tedy o první krok přechodu provádění staveb do digitálního prostředí.

Díky automatickému charakteru 3D tisku je možné sbírat velké množství dat. Myšlena tím je teplota okolí, vlhkost, teplota směsi před čerpáním, během čerpání, teplota tištěné konstrukce, intenzita slunečního záření, tlak v potrubí, odpor proti čerpání, spotřeba čerpadla a mnoho dalších údajů. V dnešní době jsou ovšem tyto hodnoty v podstatě k ničemu.

8.1 Základní myšlenka

Základní myšlenkou je vytvořit řetězec návrhu, který je založen cyklicky na realitě, která vytváří simulaci a simulaci, pomocí které je aproximována realita pro další užití.

Pro vysvětlení zde uvedu teoretický příklad návrhu a provedení stavby pomocí 3D tisku. Tento návrh bych rozdělil do:

1. Zadání stavby.
2. Návrh stavby pomocí CADu (vytvoření 3D modelu stavby).
3. Zpracování 3D modelu pro 3D tiskárnu (slicování).
4. Nalezení požadovaných parametrů tisku a receptury (simulací, výpočtem).
5. Laboratorní návrh receptury.
6. Ověření tradičních vlastností receptury.
7. Provedení stavby.

8.1.1 Zadání stavby, návrh stavby pomocí CADu (vytvoření 3D modelu stavby) a zpracování 3D modelu pro 3D tiskárnu (slicování)

První dva body návrhu jsou mimo obor zájmů této práce a jsou v praxi zvládnuty.

Třetí bod je prováděn pomocí různých softwarů a každá výzkumná nebo komerční skupina zabývající se 3D tiskem má svůj postup pro zpracování tohoto kroku, ale výsledkem je převod modelu do instrukcí pro tiskového robota. Rozšířeným používaným softwarem je Rhinoceros 6 s plug-inem Grasshopper. [1]

8.1.2 Nalezení požadovaných parametrů tisku a receptury (simulací, výpočtem)

Na základě instrukcí třetího bodu, případně z modelu z druhého bodu by byla vytvořena simulace tisku (více v kapitole 8.2). Pomocí provedení desítek simulací tisku by byly stanoveny limitní parametry pro tiskového robota a recepturu.

Druhá metoda by byla stanovení limitních parametrů pomocí výpočtu. Tyto výpočty by byly stanoveny na základě odvození ze zkušeností z praxe, alternativně by mohly být odvozeny z provedených simulací. Simulace by byly výhodné zejména ze začátku, kdy je nedostatek prakticky provedených staveb a naměřených parametrů. Zároveň by tato metoda mohla sloužit pro kontrolu výsledků ze simulací a prvotní předpoklad pro parametry k zadání do simulace.

Obecně řečeno by bylo velice výhodné tyto dvě verze zkombinovat pro lepší praktickou aplikaci.

8.1.3 Laboratorní návrh receptury

Na základě získaných parametrů z bodu čtyři by byla navržena vhodná receptura. Návrh receptury by probíhal pomocí zkoušek. Výsledky prováděných zkoušek by ovšem byly porovnávány vůči tisícům simulacím zkoušky s různými parametry. Díky jednoduché zkoušce jako střešací stolek, by pak teoreticky mohla poskytnout parametry, které jsou normálně skryté, ale díky tomuto porovnání by byly aproximovány.

Alternativně by výsledky z bodu čtyři byly vloženy do simulace prováděných zkoušek a díky tomu by byly známé výsledky, které ve zkoušce mají vyjít. V této verzi by pak bylo ihned v laboratoři vidět jak se jednotlivé receptory chovají a jaké parametry sedí a jaké ne.

Zároveň v budoucnu by mohlo být možné navrhnout i software, který by navrhoval a doporučoval složení receptury na základě surovin, které jsou na místě stavby k dispozici, ale o tom více v kapitole 8.4.

8.1.4 Ověření tradičních vlastností receptury a provedení stavby

Pod bodem šest je myšleno vyzkoušení pevnostní a trvanlivostní receptury jako u tradičních betonů a staveb. Jediný rozdíl je s přidavkem nových zkoušek, které jsou nutné kvůli jinému procesu výroby spojené s 3D tiskem, více v předchozí kapitole 4.

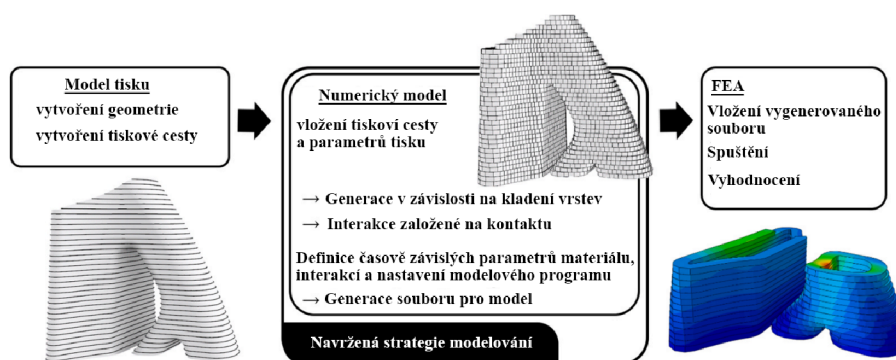
Pod bodem sedm je zahrnut samotný proces tisku, ale i ostatní části stavby. Tato práce se ovšem zajímá pouze o 3D tisk (v kapitole 6) a problematika ostatních částí stavby je mimo zaměření této práce.

8.2 Příklady provedených simulací

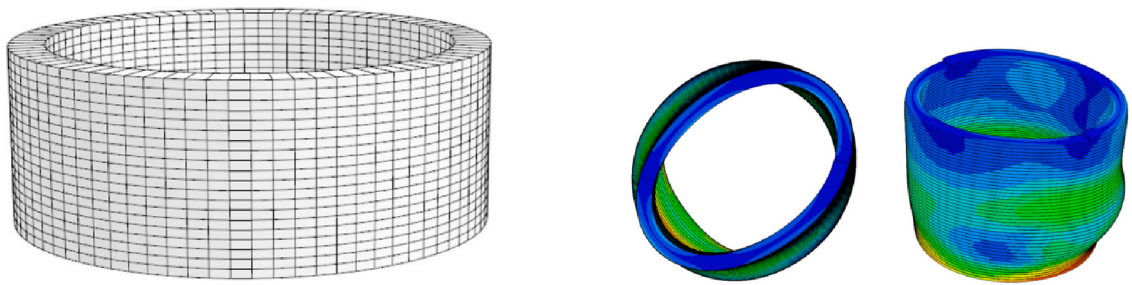
8.2.1 Simulace tištěných prvků

V praxi již existuje několik analýz tištěných prvků. Zajímavou analýzou je metoda navržená Ticho Ooms et al. na univerzitě Ghent. Tato práce se zabývá vytvářením modelu z komplikovaných geometrií tištěných konstrukcí, které tradičně jsou velice náročné na návrh. Respektive pro přípravu pro matematický model. Následně demonstrují, jak tento model dokáže předpovědět počet vrstev, kdy se tisk hroutí pro materiály daných parametrů, a jaká je maximální rychlost tisku, při které lze prvek vytisknout. Zároveň dokáže předpovědět zda tisk se zhroutí z důvodu elastické deformace (mechanické nestability) nebo z důvodu plastické deformace (reologické pružnosti), případně kombinace obou. [1]

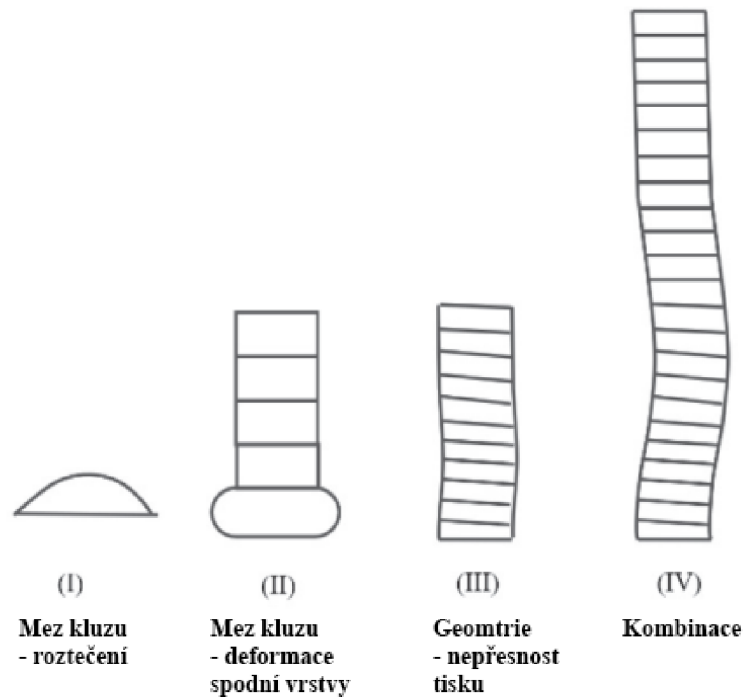
Tento navržený model zároveň dokáže určit jaké materiálové a tiskové parametry jsou nutné pro danou geometrii. Na závěr ovšem autoři uvádí, že je velice důležitý vstup materiálových vlastností, aby bylo možné přesně simulovat tisk. [1]



Obrázek 8.1: Postup při tvorbě simulace. [1]



Obrázek 8.2: Vlevo připravený model, vpravo výsledky simulace. [1]



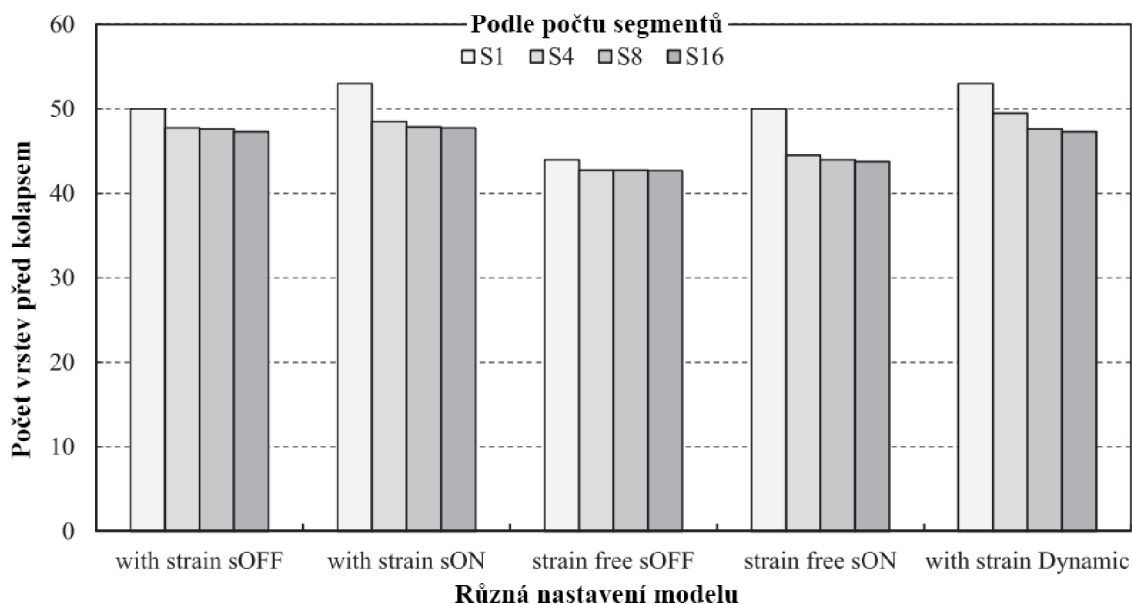
Obrázek 8.3: Ukázky možných deformací při tisku. [3]

8.2.2 Simulace pevnosti vzorku

Vzhledem k anisotropii 3D tisku (více v kapitole 4) je komplikován statický návrh. Pevnostní charakteristiky v různých směrech lze ovšem simulovat pomocí metody konečných prvků. Směry zatěžování jsou na schématech 8.5. Výsledky z této simulace (FE - modře šrafované) porovnané s realitou (TEST/Test Ma et al. - zeleně šrafované) jsou znázorněny na grafech 8.6. [20]

8.3 Návrh metody

Můj návrh pro získání všech parametrů potřebné pro simulaci tisku je takový, že dojde k digitalizaci samotných zkoušek. Dalo by se říci, že místo ručního výpočtu výsledků se využijí komplikované simulace a aproximace naměřených údajů ze zkoušek. Zároveň toto otevírá možnost zjištění parametrů, které jsou třeba pro daný tisk, tak jako u tradičních betonů



Obrázek 8.4: Výsledky simulace stavitelnosti s různými modelovými parametry. [1]

například pevnostní kategorie, požadavky na trvanlivost, konzistence a další. Parametry materiálů potřebné pro tisk by následně byly vloženy do simulací různých zkoušek, díky čemuž by byly známé výsledky zkoušek, pak by návrh receptury byl pouze na zkušenostech pracovníka, jak rychle dokáže navrhnout recepturu, která má dané výsledky. Přirovnal bych to k návrhu tradičních betonů na danou pevnostní kategorii o dané konzistenci. V případě 3D tisku těchto vlastností receptury je ovšem více a zároveň je těžší je odhalit.

Zároveň by se tato metoda s dostatkem informací dala posunout dále. Zkušenosti pracovníka, by se daly klasifikovat jako kolik různých receptur namíchal a jaký cit má pro pozorování vlastností, například pohledem, dotykem materiálu a další. Tyto vlastnosti je náročné klasifikovat v "počítačové řeči", ale v dnešní době díky rozvoji neuronových sítí a dalších počítačových metod. Ve zkratce se vezme použitý materiál a jeho výsledky a počítač si "hledá" své důvody proč se materiál chová jak se chová. Zároveň je třeba zdůraznit, že takovýto systém by nedokázal sám navrhnout vhodnou recepturu, spíše by to byly doporučení pro méně zkušené pracovníky, aby měli počáteční bod ze kterého mohou vyjít. Zároveň je také důležité říct, že pro správné fungování takového programu jsou potřeba tisíce záznamů receptur s výsledky.

8.3.1 Prvotní testování modelování

Provedení simulace jsem vyzkoušel v programu *Blender*. [21] Tento program jsem zvolil, protože s ním mám dřívější zkušenost a dokáže jednoduše simulovat tekutiny. Pro tento účel ovšem není vhodný. Program je určen pro simulace efektů do animací případně her a nedokáže tak přesně a vědecky simulovat. Pro prvotní ověření této metody je byl ovšem dostatečný. Na obrázku 8.7 je vidět provedení simulace pro jeden typ konzistence. Bohužel se mi nepodařilo simulovat kapaliny o vyšší viskozitě, při takových simulacích se projevily nedostatky tohoto prostředí.

Pro simulaci hustších kapalin v *Blenderu* by bylo zapotřebí pořízení plug-inu. Tato varianta ovšem byla zahrnuta vzhledem k potřebným parametrům na simulaci, které Blender bohužel nesplňuje.

8.3.2 Hledání vhodných programů pro simulace

Jako jedna alternativa byl nalezen program *OpenFOAM*. Tento program je zdarma a řeší fyzikální simulace kapalin a díky ceně je kandidátem pro vytvoření simulace. Bohužel nemám během psaní této práce dostatečné znalosti k práci v tomto programu a budu se jím zabývat až v budoucnu. [22]

Mezi další nalezené programy se řadí *SOLIDWORKS Flow Simulation* a *XFlow*, které rovněž řeší fyzikální simulace. Jejich nevýhodou je ovšem vysoká cena.

8.3.3 Laboratorní zkoušky pro simulaci a příklad jejich vyhodnocení

Největší pozornost byla věnována zkoušce na střešacím stolku. Tuto metodu jsem vybral z důvodu jednoduchosti simulace a z potencionálního odhalení všech požadovaných materiálových parametrů.

Simulace střešacího stolku

Simulace této zkoušky byla jako test provedena pomocí *Blenderu* a je znázorněna na obrázku 8.7. Vstupní parametry takové simulace by byly pro materiál:

- Meze kluzu
- Viskozita
- Tixotropie

Dále by to byly v závislosti na zkoušce:

- Rozměry tělesa ve zkoušce
- Výška pohybu stolku
- Velikost gravitace
- Rychlost otřesů
- Tvar a hmotnosti prvku zatěžující zkušební těleso

Nejprve bude simulace provedena pro rozdílné hodnoty parametrů materiálů a klasickou zkoušku, následně bude testována modifikace zkoušky, změnou parametrů zkoušky. To přidáním prvku na vrch zkušební tělesa o různých tvarech a hmotnostech, změnou intenzity rázů (změnou výškou pohybu stolku), změnou rychlostí otřesů, postupným nárůstem intenzity rázů a dalšími, které se budou při generaci simulací zdát vhodné. Následně se data (vývoj plochy zkušební tělesa) z těchto simulací srovnají mezi sebou a vyberou se verze, které nejlépe ukazují změny parametrů materiálů.

V dalším kroku bude tato simulace porovnána se zkouškou o stejných parametrech provedena s lidar kamerou (pro několik různých receptur) a bude se sledovat vývoj plochy zkušebních těles. Tento reálný výsledek následně bude porovnávan s plochou ze simulací a bude se hledat podobnost ploch simulace a reality. Následně se provedou zkoušky, které

reálně dokážou zjistit odhadované parametry. Pokud simulace budou odpovídat realitě, tak dalším postupem bude provedení a otestování i alternativních verzí zkoušky, které byly simulovány a jejich opětovné ověření vůči realitě.

Pokud tyto srovnání budou úspěšné, tak je možné následně simulovat parametry materiálu, které jsou vhodné pro tisk (získané pomocí metod v kapitole 8.2) a získat tak výsledky daných zkoušek. Nebo se může provést simulace tisíců různých variant a následně se reálně naměřené hodnoty budou porovnávat vůči databázi předem vygenerovaných hodnot pro stanovení výsledků zkoušky.

Simulace Vicata

Dále by se dala simulovat zkouška Vicata a vnik jehly do vzorku. Díky takovéto simulaci bude možné navrhnout tvary jehel, které odhalí požadované parametry a jejich závislost na čase.

Zároveň by v laboratoři bylo zajímavé připravit několik vzorků a najednou je testovat různými jehlami pro získání přesnějších hodnot v kombinaci se simulacemi. Alternativně by bylo zajímavé navrhnout jehlu o proměnném průřezu a díky jedné zkoušce Vicata by mohlo dojít k vyhodnocení jaká je závislost parametrů na čase, což je důležité pro simulace tisku. V této alternativní metodě by ovšem bylo třeba přesně měřit i rychlost vpichu jehly společně s hloubkou vpichu do vzorku.

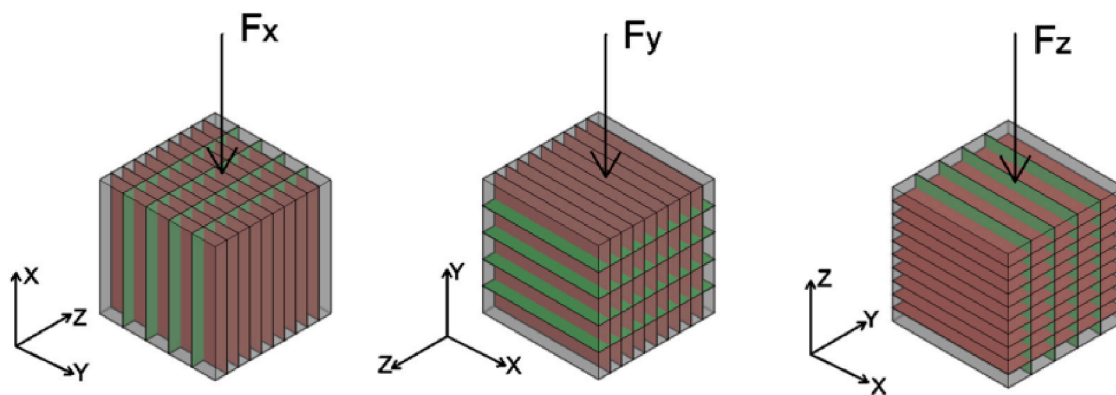
Kombinace těchto simulací

Zároveň by bylo možné kombinovat tyto dvě zkoušky a simulace. Pro získání všech požadovaných materiálových parametrů pro simulaci. Což by mělo za následek zjednodušení návrhu receptur, protože by všechny navržené receptury bylo možné rychle a jednoduše kvantifikovat a porovnávat mezi sebou, což by vedlo k jednoduššímu výzkumu jaké suroviny jak ovlivňují vlastnosti. Což by vedlo k rychlejšímu vývoji receptur i pro různé požadavky.

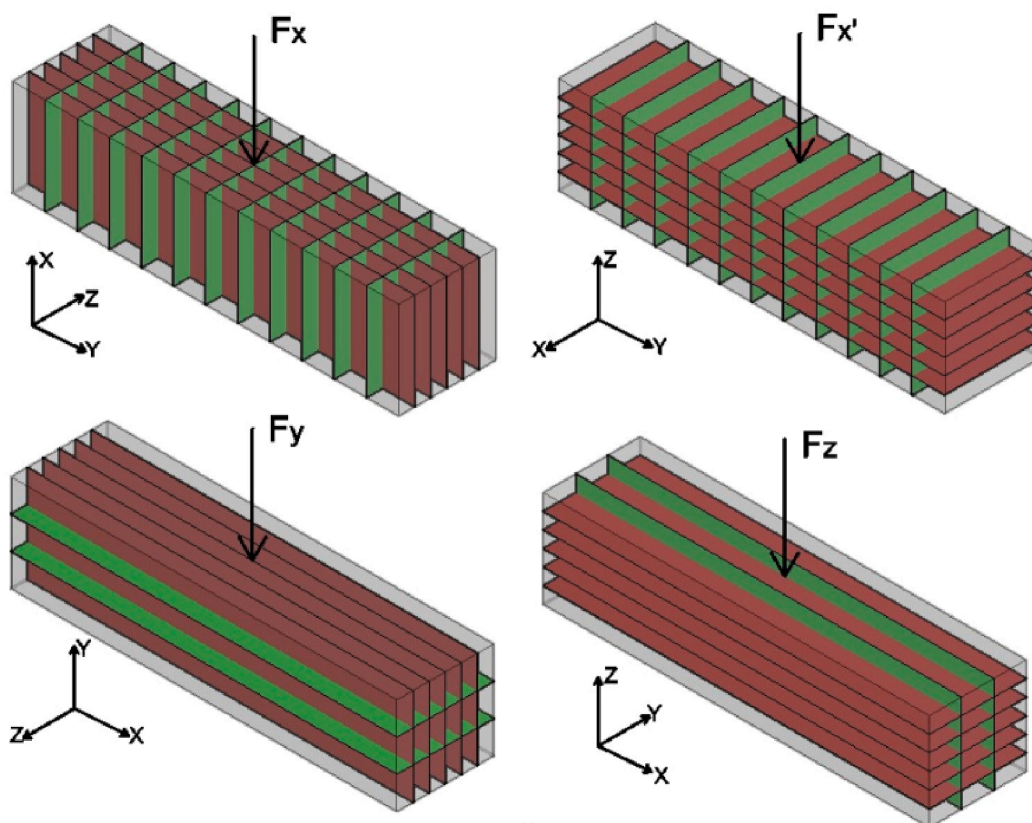
8.4 Budoucnost

V případě dokázání použitelnosti mnou navrhované metodiky, by tento postup mohl výrazně urychlit návrh a vývoj 3D materiálu. Dále získané parametry z těchto simulací by mohly sloužit k simulaci samotné 3D tiskárny jako čerpadla a trysky pro ověření další ověření parametrů. Zároveň by z této simulaci bylo možné získat parametry jako je například odpor na čerpadle při čerpání, což by pak mohlo sloužit ke kontrole vlastností směsi a jejich případné modifikaci v reálném čase při samotném tisku.

Dále by takovéto simulace tiskového procesu mohly sloužit například k vytvoření dostatečně velké databáze pro vytrénování neurální sítě pro ovládání 3D tiskárny v reálném čase.

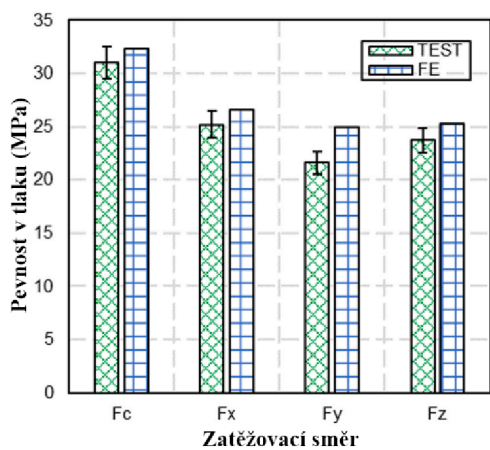


Model pro zkoušky v tlaku

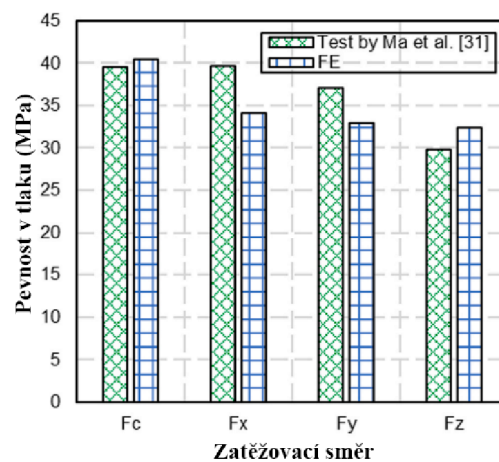


Model pro zkoušky v tahu ohybem

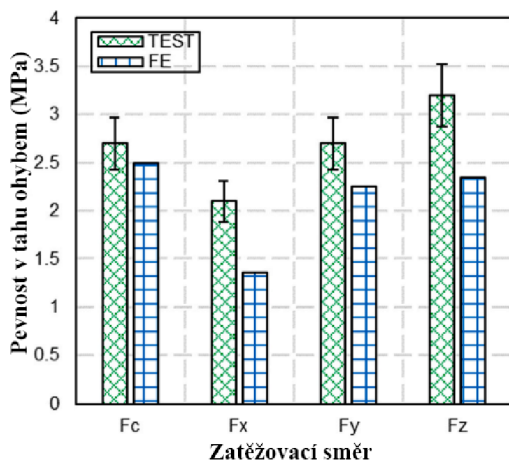
Obrázek 8.5: Směry zatěžování prvků v simulaci. [20]



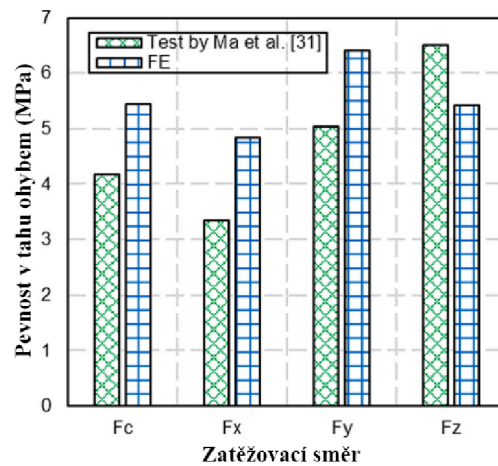
(a) Pevnost v tlaku simulace a reality - porovnání 1



(b) Pevnost v tlaku simulace a reality - porovnání 2

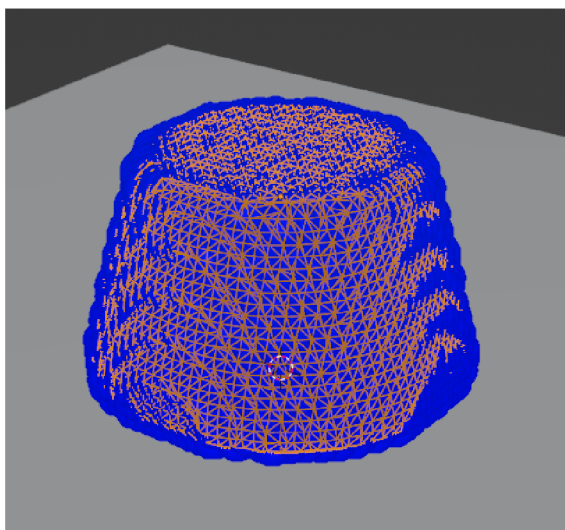


(c) Pevnost v tahu ohybem simulace a reality - porovnání 1

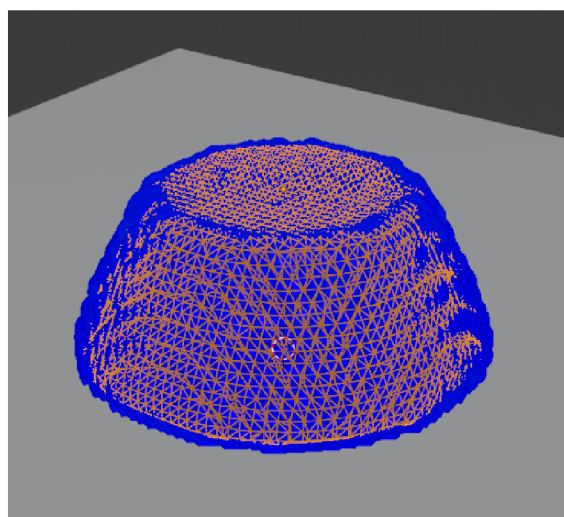


(d) Pevnost v tahu ohybem simulace a reality - porovnání 2

Obrázek 8.6: Porovnání výsledků pevností simulací s reálně naměřenou hodnotou. [20]



(a) Těleso ihned po vytvoření



(b) Těleso po 25 rázech

Obrázek 8.7: Ukázka simulace v Blenderu

Kapitola 9

Závěr

V práci byla největší pozornost věnována zkušebním metodám, které jsou základním kamenem. Zkušební metody a standardizace zkoušení je nutná pro rozvoj 3D tisku a jeho rozšíření do běžné praktické výroby. Bylo navrženo několik zkušebních metod a byly probrány již existující zkušební metody společně. Dále byly probrány způsoby, jakými vytištěné konstrukce ovlivňují tradiční způsoby zkoušení. S velkou podrobností byly rozebrány zkušební metody pro cementové pasty a betony v čerstvém stavu a v zatvrdlém stavu.

Dále byly uvedeny využívané materiály a receptury. K tomu bylo popsáno několik tiskáren a speciálních tiskových hlavic pro zakomponování ocelové výztuže do tištěné konstrukce. Následně byl popsán postup návrhu vlastní receptury pro 3D tisk, který bohužel prozatím skončil neúspěšně. Zároveň dosažené pevnosti byly 100 MPa a je otázkou budoucího výzkumu, zda je možné navrhnout recepturu pro 3D tisk, která bude dosahovat pevností mezi 20-40 MPa. Bylo ověřeno, že vhodné receptury pro tisk se pohybují v rozmezí jemných podílů mezi 650-1000 kg/m^3 , a že vhodným ukazatelem tixotropie je poměr jemných podílů vůči písku, ale toto tvrzení je potřebné dokázat budoucími měřeními.

V závěru práce je navržena radikální nová metoda, která má za cíl přivést digitální výroby i do oblasti zkušebnictví. Tato metoda je založena na využití simulací a modelování zkoušek pro odhalení skrytých vlastností materiálu. Následně je navrženo využití těchto vlastností pro simulaci samotného tiskového procesu. Tato simulace by přispěla optimalizací tiskového procesu a mohla by umožnit i návrh vhodné tiskové hlavice.

Další výzkum bude mít za cíl ověřit zda navržená digitalizace zkušebních metod je realistická. Zároveň další výzkum se bude zaměřovat na rozvoj zkušebních metod pro 3D tisk.

Literatura

- [1] OOMS, T., VANTYGHM, G., VAN COILE, R. a DE CORTE, W. A parametric modelling strategy for the numerical simulation of 3D concrete printing with complex geometries. *Additive Manufacturing*. 2021, sv. 38. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101743. ISSN 22148604. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214860420311155>.
- [2] YE, J., CUI, C., YU, J., YU, K. a XIAO, J. Fresh and anisotropic-mechanical properties of 3D printable ultra-high ductile concrete with crumb rubber. *Composites Part B: Engineering*. 2021, sv. 211. DOI: 10.1016/j.compositesb.2021.108639. ISSN 13598368. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359836821000354>.
- [3] HOU, S., DUAN, Z., XIAO, J. a YE, J. A review of 3D printed concrete: Performance requirements, testing measurements and mix design. *Construction and Building Materials*. 2021, sv. 273. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121745. ISSN 09500618. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061820337491>.
- [4] ROUPEC, J. *Technologie 3D tisku konstrukcí z betonu*. 2020. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební.
- [5] KRUGER, J., PLESSIS, A. du a ZIJL, G. van. An investigation into the porosity of extrusion-based 3D printed concrete. *Additive Manufacturing*. 2021, sv. 37. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101740. ISSN 22148604. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S221486042031112X>.
- [6] MOHAN, M. K., RAHUL, A., DE SCHUTTER, G. a VAN TITTELBOOM, K. Extrusion-based concrete 3D printing from a material perspective: A state-of-the-art review. *Cement and Concrete Composites*. 2021, sv. 115. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103855. ISSN 09589465. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946520303607>.
- [7] CHEN, Y., ZHANG, Y., PANG, B., LIU, Z. a LIU, G. Extrusion-based 3D printing concrete with coarse aggregate: Printability and direction-dependent mechanical performance. *Construction and Building Materials*. 2021, sv. 296. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123624. ISSN 09500618. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061821013842>.
- [8] DUCOULOMBIER, N., MESNIL, R., CARNEAU, P., DEMONT, L., BESSAIES BEY, H. et al. The “Slugs-test” for extrusion-based additive manufacturing: Protocol, analysis and practical limits. *Cement and Concrete Composites*. 2021, sv. 121. DOI:

- 10.1016/j.cemconcomp.2021.104074. ISSN 09589465. Dostupné z:
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946521001438>.
- [9] HERAS MURCIA, D., GENEDY, M. a REDA TAHA, M. Examining the significance of infill printing pattern on the anisotropy of 3D printed concrete. *Construction and Building Materials*. 2020, sv. 262. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120559. ISSN 09500618. Dostupné z:
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061820325642>.
- [10] YE, J., CUI, C., YU, J., YU, K. a DONG, F. Effect of polyethylene fiber content on workability and mechanical-anisotropic properties of 3D printed ultra-high ductile concrete. *Construction and Building Materials*. 2021, sv. 281. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122586. ISSN 09500618. Dostupné z:
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061821003469>.
- [11] DING, T., XIAO, J., ZOU, S. a WANG, Y. Hardened properties of layered 3D printed concrete with recycled sand. *Cement and Concrete Composites*. 2020, sv. 113. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103724. ISSN 09589465. Dostupné z:
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946520302316>.
- [12] ZHANG, C., NERELLA, V. N., KRISHNA, A., WANG, S., ZHANG, Y. et al. Mix design concepts for 3D printable concrete: A review. *Cement and Concrete Composites*. 2021, sv. 122. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2021.104155. ISSN 09589465. Dostupné z:
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946521002237>.
- [13] ARUNOTHAYAN, A. R., NEMATOLLAHI, B., RANADE, R., BONG, S. H., SANJAYAN, J. G. et al. Fiber orientation effects on ultra-high performance concrete formed by 3D printing. *Cement and Concrete Research*. 2021, sv. 143. DOI: 10.1016/j.cemconres.2021.106384. ISSN 00088846. Dostupné z:
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884621000338>.
- [14] DING, T., XIAO, J., ZOU, S. a YU, J. Flexural properties of 3D printed fibre-reinforced concrete with recycled sand. *Construction and Building Materials*. 2021, sv. 288. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123077. ISSN 09500618. Dostupné z:
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061821008370>.
- [15] XIAO, J., HAN, N., ZHANG, L. a ZOU, S. Mechanical and microstructural evolution of 3D printed concrete with polyethylene fiber and recycled sand at elevated temperatures. *Construction and Building Materials*. 2021, sv. 293. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123524. ISSN 09500618. Dostupné z:
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061821012848>.
- [16] MARCHMENT, T. a SANJAYAN, J. Mesh reinforcing method for 3D Concrete Printing. *Automation in Construction*. 2020, sv. 109. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.102992. ISSN 09265805. Dostupné z:
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0926580519306132>.
- [17] XIAO, J., JI, G., ZHANG, Y., MA, G., MECHTCHERINE, V. et al. Large-scale 3D printing concrete technology: Current status and future opportunities. *Cement and Concrete Composites*. 2021, sv. 122. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2021.104115. ISSN 09589465. Dostupné z:
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946521001839>.

- [18] KRISTOMBU BADUGE, S., NAVARATNAM, S., ABU ZIDAN, Y., MCCORMACK, T., NGUYEN, K. et al. Improving performance of additive manufactured (3D printed) concrete: A review on material mix design, processing, interlayer bonding, and reinforcing methods. *Structures*. 2021, sv. 29, s. 1597–1609. DOI: 10.1016/j.istruc.2020.12.061. ISSN 23520124. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352012420307839>.
- [19] DING, T., XIAO, J., ZOU, S. a ZHOU, X. Anisotropic behavior in bending of 3D printed concrete reinforced with fibers. *Composite Structures*. 2020, sv. 254. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.112808. ISSN 02638223. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263822320327343>.
- [20] XIAO, J., LIU, H. a DING, T. Finite element analysis on the anisotropic behavior of 3D printed concrete under compression and flexure. *Additive Manufacturing*. 2021, sv. 39. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101712. ISSN 22148604. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214860420310848>.
- [21] *Blender*. Dostupné z: <https://www.blender.org/>.
- [22] *OpenFOAM*. Dostupné z: <https://www.openfoam.com/>.