



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra betonových a zděných konstrukcí

Mechanické vlastnosti čerstvého cementového
kompozitu pro technologii 3D tisku

Diplomová práce

2019

Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb
Vedoucí práce: Ing. Josef Novák, Ph.D.
Vypracoval: Bc. Tomáš Liška

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Thákurova 7, 166 29 Praha 6



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Liška	Jméno: Tomáš	Osobní číslo: 438078
Zadávající katedra: Katedra betonových a zděných konstrukcí		
Studijní program: Stavební inženýrství		
Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Mechanické vlastnosti čerstvého cementového kompozitu pro technologii 3D tisku	
Název diplomové práce anglicky: Mechanical properties of fresh cement-based composite for 3D printing technology	
Pokyny pro vypracování: Mezi hlavní úkoly studenta patří: - Zpracování rešerše zaměřené na mechanické vlastnosti čerstvého cementového kompozitu. - Provedení experimentálních zkoušek s cílem stanovit mechanické vlastnosti vybraného cementového kompozitu v jeho čerstvém stavu. - Studie a rozbor poznatků a dat z experimentálních zkoušek.	
Seznam doporučené literatury: Odborné články z vědeckých databází (Science Direct apod.) 3D Concrete Printing Technology, Jay Sanjayan Ali Nazari Behzad Nematollahi, ISBN 9780128154816	
Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Josef Novák, Ph.D.	
Datum zadání diplomové práce: _____	Termín odevzdání diplomové práce: 5.1.2020 <small>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</small>
Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

30. 9. 2019 Datum převzetí zadání	Podpis studenta(ky)
--------------------------------------	---------------------

SPECIFIKACE ZADÁNÍ

Jméno diplomanta: Bc. Tomáš Liška

Název diplomové práce: Mechanické vlastnosti čerstvého cementového kompozitu pro technologii 3D tisku

Základní část: K133 podíl: 100 %

Formulace úkolů: Předmětem úvodní části diplomové práce je zpracovat studii zaměřenou na mechanické vlastnosti cementových kompozitů vyvíjených pro technologii 3D tisku. Studie bude obsahovat poznatky z technických publikací a vědeckých článků zaměřených na sledování mechanických vlastností cementových kompozitů v extrémně raném stádiu. Druhá část práce bude zaměřena na experimentální zkoušky vybraného cementového kompozitu s cílem stanovit závislost mezi pevností v tlaku a deformací čerstvé směsi s ohledem na její stáří. V závěru práce bude proveden rozbor získaných výsledků včetně vyhodnocení shody s výsledky experimentů prezentovaných ve vědeckých článcích.

Podpis vedoucího DP:.....

Datum: 30. 9. 2019

Případné další části diplomové práce (části a jejich podíl určí vedoucí DP):

2. Část: _____ podíl: _____ %

Konzultant (jméno, katedra): _____

Formulace úkolů: _____

Podpis konzultanta:.....

Datum:

3. Část: _____ podíl: _____ %

Konzultant (jméno, katedra): _____

Formulace úkolů: _____

Podpis konzultanta:.....

Datum:

4. Část: _____ podíl: _____ %

Konzultant (jméno, katedra): _____

Formulace úkolů: _____

Podpis konzultanta:.....

Datum:

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá mechanickými vlastnostmi čerstvého cementového kompozitu pro technologii 3D tisku betonových konstrukcí. Úvodní část obsahuje stručný popis technologie 3D tisku a podrobnou studii vědeckých článků zaměřených na výzkum mechanických vlastností cementových kompozitů v čerstvém stavu. Dosažené poznatky ukazují, že čerstvé cementové malty vystavené osovému tlaku mají pružno-plastické až plastické chování. Druhá část práce se zabývá experimentálními zkouškami vybraného cementového kompozitu, který oproti běžné betonové směsi pro technologii 3D tisku obsahuje i hrubé kamenivo. Experimentální zkoušky proběhly na unikátním nízkonákladovém přístroji vyvinutém přímo pro měření pevnosti čerstvého betonu v tlaku. Cílem práce bylo získat experimentální data, která by umožnila predikovat chování čerstvé směsi během výroby betonových konstrukcí technologií 3D tisku. Výsledkem práce je pracovní diagram čerstvého betonu v tlaku.

Klíčová slova

beton, 3D tisk, reologie, reologické vlastnosti betonu, čerstvý beton, pracovní diagram

Abstract

The diploma thesis deals with mechanical properties of fresh cement-based composites for 3D concrete printing technology. The opening section contains a brief description of 3D concrete printing technology and a detailed study on scientific papers focused on the research into mechanical properties of fresh cement-based composites. The obtained findings show that fresh cement plasters subjected to uniaxial compression have elastic-plastic or even plastic behavior. The second section of the thesis is focused on the experimental investigation of a selected cement-based composite which, in comparison with a conventional mixture for 3D concrete printing technology, contains also coarse aggregate. The experiments were conducted in a unique cost-efficient apparatus developed particularly for the testing of compressive strength of fresh concrete. The aim of the investigation was to obtain experimental data which would enable to predict the behavior of fresh concrete during the production of concrete structures with 3D printing technology. The output of the investigation was a stress-strain diagram.

Key words

Concrete, 3D Printing, Rheology, Rheological properties, Fresh concrete, Stress-strain diagram

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto závěrečnou práci vypracoval samostatně a pouze s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Praze dne

Tomáš Liška

Poděkování

Rád bych na tomto místě poděkoval především vedoucímu této diplomové práce Ing. Josefu Novákovi, Ph.D. za výborné vedení, řadu cenných rad, trpělivost a pomoc u laboratorních zkoušek.

Dále bych rád poděkoval přítelkyni, rodině a přátelům, kteří mi byli důležitou oporou při vypracování této práce, ale i během celého studia.

Obsah

1	Úvod.....	7
2	Technologie 3D tisku betonových konstrukcí.....	9
	2.1 Specifika v návrhu konstrukce pro 3D tisk.....	12
3	Beton v extrémně rané fázi tuhnutí.....	14
	3.1 Vlastnosti čerstvého betonu.....	14
	3.1.1 Základní reologické vlastnosti.....	14
	3.1.2 Vlastnosti betonu důležité pro 3D tisk konstrukcí.....	15
	3.2 Běžné zkoušky čerstvého betonu, jejich aplikace pro tisk.....	16
	3.3 Predikce chování čerstvého betonu ve výzkumu.....	17
	3.3.1 Výzkum na Eindhoven University of Technology.....	17
	3.3.2 Výzkum na Nanyang Technological University v Singapuru.....	23
	3.3.3 Výzkum na Hebei University of Technology v Číně.....	28
	3.4 Zhodnocení a závěry rešerše.....	32
4	Experimentální část.....	34
	4.1 Experimentální zkoušky.....	35
	4.1.1 Cementový kompozit.....	35
	4.1.2 Zkušební zařízení.....	36
	4.1.3 Zkušební tělesa.....	41
	4.1.4 Metodika zkoušení.....	42
	4.2 Výsledky.....	45
	4.2.1 Metoda A.....	46
	4.2.2 Metoda B.....	47
	4.2.3 Posouzení výsledků.....	49
5	Závěr.....	52
6	Reference.....	54

7	Seznam obrázků	56
8	Seznam tabulek	58
9	Seznam grafů	58
10	Přílohy	59
10.1	Zápis z měření 28.3.2019	59
10.2	Zápis z měření 12.6.2019	62
10.3	Zápis z měření 2.7.2019	65
10.4	Zápis z měření 10.7.2019	68
10.5	Zápis z měření 24.9.2019	71
10.6	Zápis z měření 22.11.2019	73

1 Úvod

3D tisk je technologie, která v poslední době často rezonuje ve společnosti a po 40 letech vývoje pomáhá každý den ve strojírenství, zdravotnictví nebo třeba v astronautice. Dalším z oborů, který se tato technologie snaží dobýt, je stavebnictví. Výzkumy zabývající se technologií 3D tisku betonových konstrukcí přibývají každým rokem, ale málo z nich se věnuje mechanickým vlastnostem čerstvé směsi, které jsou nezbytné pro správný návrh konstrukce.

Cílem diplomové práce bylo získat experimentální data o chování čerstvého cementového kompozitu v tlaku, která by umožnila predikovat chování směsi během výroby. Úvodní část práce obsahuje stručný popis principu technologie 3D tisku a rozbor charakteristických požadavků na směs pro technologii 3D tisku. Nedílnou součástí je i podrobná rešerše, která shrnuje poznatky ze zahraničních výzkumů zaměřených na sledování chování čerstvých cementových malt pro technologii 3D tisku. Na závěr teoretické části byla rešerše zhodnocena a nejdůležitější poznatky byly přeneseny do další části práce.

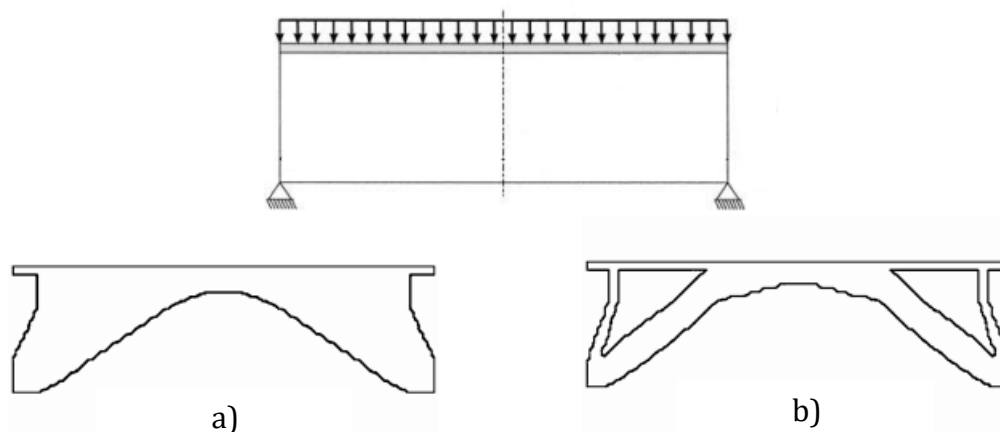
Druhá část práce se věnuje experimentálním zkouškám čerstvého cementového kompozitu v tlaku s cílem získat data, která by umožnila predikovat chování směsi při tisku betonových konstrukcí. Protože se pevnost čerstvého betonu běžně neměří, nejprve bylo nutné vyvinout vhodný zkušební přístroj a metodiku měření. Složitost a časová náročnost zkoušek umožnila získat pouze omezené množství experimentálních dat, které i přes to umožnily vyvinout pracovní diagram sledované směsi.

Výsledkem této diplomové práce je pracovní diagram čerstvého kompozitu pro 3D tisk betonových konstrukcí, podle kterého lze predikovat chování čerstvé směsi během 3D tisku konstrukcí. Práce také může sloužit jako podklad pro další vývoj této technologie. Vzhledem k omezenému množství času na zpracování diplomové práce a získaných výsledků je však nejprve nutné prezentované závěry ověřit dalšími experimentálními zkouškami.

Hlavním motivem pro výběr tohoto tématu byla jeho atraktivita a možnost přispět k dosavadnímu výzkumu technologie 3D tisku betonových konstrukcí, která je stále ještě v rané fázi vývoje. Zvolené téma mi navíc umožnilo rozšířit své znalosti získané při zpracování bakalářské práce na téma *Vývoj betonového kompozitu pro 3D tisk*.

2 Technologie 3D tisku betonových konstrukcí

Podobně jako v dalších odvětvích i ve stavebnictví dochází k rychlému vývoji pokrokových technologií. Nastávající období často nazývané jako čtvrtá průmyslová revoluce přináší do stavebnictví další vlnu digitalizace a automatizace výrobního procesu od návrhu až po provádění stavby. Důsledkem má být například snížení zátěže životního prostředí nebo zvýšení efektivity výstavby. Příkladem může být stále více používaný proces digitální fabrikace neboli návrhu budovy pomocí genetického algoritmu, který navrhuje konstrukci tak, aby docházelo k maximálnímu využití hmoty. Díky tomu vzniká konstrukce s nepřímými a složitějšími tvary.



Obrázek 1 - Ukázka digitální fabrikace na spojitě zatíženém spojitém nosníku [19]; a) efektivní tvar pro přenesení 55% z návrhového zatížení, b) efektivní tvar pro přenesení 27% z návrhového zatížení (obrázek upraven autorem)

Princip digitální fabrikace lze ukázat na běžném nosníku, který je vystaven liniovému zatížení. S ohledem na způsob zatížení a umístění podpor by se tento nosník běžně navrhl jako nosník s plným obdélníkovým průřezem. Procesem digitální fabrikace lze docílit takového řešení, aby hmota nosníku byla maximálně využita. V důsledku toho vzniká zaoblená konstrukce, u které se předpokládá výrazně efektivnější využití materiálu. Díky tomu, že výroba takového prvku standardními technologiemi by byla vcelku náročná, nabízí se u podobných konstrukčních prvků využití 3D tisku.

3D tisk je automatizovaný proces, při kterém dochází k výrobě tělesa na základě počítačového modelu [1]. V počítači se nejprve vytvoří 3D model tisknuté konstrukce, jehož tvar může být snadno přejetý například z BIM modelu. Před tiskem se model rozdělí na vhodný počet vrstev vodorovnými rovinami a zároveň se nastaví důležité parametry pro tisk. Následně tyto informace putují do 3D tiskárny, která vytvoří prvek vrstvením jednotlivých vrstev podle požadavků. Nejpoužívanějším materiálem pro 3D tisk je plast, technologie se ale používá i pro další materiály, například keramiku, kov, sklo nebo beton [2].

Pro 3D tisk existuje mnoho technologií, některé jsou založeny na spékání prášku laserem nebo laserovém spékání fotocitlivé pryskyřice. Nejrozšířenější metodou je ale způsob tisku, při kterém je z extruzivní hlavy tiskárny vytlačována směs řidší konzistence, která po extruzi začíná tuhnout [2]. Pro tuto metodu je nejpoužívanější plastový materiál, na kterém lze také metodu dobře demonstrovat. Plast ve formě struny je navíjen do tiskové hlavy, kde se ohřeje na teplotu tání. Poté je plast vytlačován na tiskovou plochu a pohybem tiskové hlavy do požadovaných souřadnic vznikají jednotlivé vrstvy modelu. Tekutý plast se snadno spojí se spodními vrstvami, ale rychle po vytisknutí dochází k ochlazení a vytvrdnutí.

Metodu lze analogicky přenést i na výrobu betonových modelů. Lze si představit svislý konstrukční prvek, například stěnu. Ta je pomocí software rozdělena na jednotlivé vrstvy vodorovnými rovinami, každá vrstva má tloušťku například 40 mm. Jednotlivé vrstvy jsou pak vytištěny na sebe, až vznikne celý konstrukční prvek. Tisk probíhá tak, že smíchaný cementový kompozit je dopravován trubicí do tiskové hlavy, která již směs nijak neupravuje a pouze ji ukládá do požadovaných souřadnic. Po vytisknutí dochází k vytvrdnutí materiálu.

Kvůli menším průměrům přírodní hadice a extruderu se zpravidla využívá směs s menšími frakcemi kameniva, která vyžaduje obvykle vyšší obsah cementu. Využít lze rovněž i vláknobeton, který díky přítomnosti vláken může zlepšit odolnost konstrukce proti nesilovým účinkům, např. smršťování. Při uplatnění vláknobetonu lze očekávat, že dojde k usměrnění vláken ve směru ukládání směsi. To může příznivě ovlivnit únosnost tisknutého konstrukčního prvku, což prokázal Manuel Hambach a Dirk Volkmer z univerzity v Augsburgu ve své práci *Properties*

of 3D-printed fiber-reinforced Portland cement paste. Zkouškami únosnosti v ohybu prokázali, že vhodným usměrněním vláken lze navýšit únosnost v ohybu i o více než 100 % [3].

Pro betonové konstrukce nebo prvky zhotovené 3D tiskem se využívají další technologie. Pro příklad lze uvést technologii lokálního nanášení pojiva do plniva [4]. I tato technologie využívá toho, že je počítačový model rozdělen na mnoho vodorovných vrstev, které se postupně nanášejí při výrobě konstrukce. Konkrétně se nejdříve nanese vrstva kameniva, do které se vstříkuje například epoxidové pojivo podle souřadnic konstrukce. Nanese se další vrstva, opět je v určitých místech naneseno pojivo. Následně se tento proces opakuje, dokud nejsou vytištěny všechny vrstvy. Poté je zbytek kameniva odstraněn a zůstane tak jen požadovaný model. V porovnání s předchozí technologií má však tato technologie výrazně vyšší požadavky na prostor, rovněž používaný kompozit na bázi polymeru se výrazně liší od běžného cementového kompozitu.

K vývoji technologie 3D tisku betonových konstrukcí přispěla řada výhod vyplývajících z automatizace a zvýšení efektivity procesu. Významný benefit spočívá zejména v minimalizaci vzniku odpadů. Výzkumy uvádějí, že až 50 % materiálu uvažovaného pro rozpočet stavby realizované běžnou technologií je odpadní materiál vzniklý například kvůli bednění [5]. Podobnou informaci uvádí i společnost Contour Crafting Corporation, která odhaduje, že u průměrné stavby vzniká přibližně 3–7 tun odpadu. Při použití 3D tisku takové množství odpadu nevzniká, což se kladně projevuje v ekologické zátěži, ale také v celkových nákladech na stavbu. Dalším přínosem pro životní prostředí může být fakt, že stavba technologií 3D tisku trvá mnohem kratší dobu. Díky tomu se zkrátí období, během kterého bude okolí stavby vystavené hluku a prachu od probíhající výstavby. V článku *Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing* autor uvádí, že jsou dělníci při provádění betonových konstrukcí navíc vystaveni škodlivým vlivům, cement má totiž neblahý vliv na oči, kůži a dýchací ústrojí [6]. Pokud dojde díky 3D tisku k automatizaci provádění staveb, omezí se styk dělníků s betonem a bude tak omezeno ohrožení zdraví dělníků.

Technologie má ale i mnoho nevýhod a omezení. Největší problém je v provádění vodorovných konstrukcí, kvůli absenci prutové výztuže mají prvky velmi malou únosnost v ohybu. Absence prutové výztuže navíc způsobí, že konstrukce při kolapsu nevaruje rozvinutím trhlin, ale ihned dochází k náhlému porušení prvku. Jednou z možností je předepnutí prvků, alternativou může být vkládání výztuže mezi jednotlivé vrstvy. Další specifikum pro konstrukce vyrobené technologií 3D tisku je oslabená smyková únosnost ve spárách mezi jednotlivými vrstvami. Kvůli těmto rozdílům oproti standardním konstrukcím je nutné vytvořit nové návrhové postupy a normy, které v současné době pravděpodobně nikde na světě stanoveny nejsou. Minimálně jednu nevýhodu má technologie i z environmentálního pohledu, a tou je použití cementu. Podle práce *Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing* při výrobě betonových konstrukcí totiž vzniká poměrně významná zátěž v podobě CO₂ [6].

Lze se domnívat, že výhody technologie ale nakonec nevýhody převáží a dojde tak k rozvoji konstrukcí vytvořených touto technologií. Vodítkem k tomu může být i zájem významných států. Podle autorů článku *Technologie 3D tisku v architektuře a stavebnictví* [5] už nyní státy jako Velká Británie nebo Saudská Arábie počítají s tím, že již kolem roku 2030 bude mít 3D tisk velký podíl na výstavbě všech domů.

2.1 Specifika v návrhu konstrukce pro 3D tisk

Při návrhu betonových konstrukcí vyráběných běžnými technologiemi se uvažují mechanické vlastnosti betonu stanovené po 28 dnech od výroby. S ohledem na způsob provádění konstrukcí 3D tiskem lze však předpokládat, že vlastnosti cementového kompozitu a únosnost konstrukce budou ovlivněny řadou aspektů, které bude nutné při navrhování konstrukcí zohlednit. Předmětem současných výzkumů je především vliv trajektorie tisknutí na únosnost konstrukce nebo vliv rozptýlené výztuže na únosnost a chování prvků. Významný rozdíl oproti běžným monolitickým konstrukcím je i ten, že prvky tisknuté technologií 3D tisku jsou oslabeny ve spárách na rozhraní jednotlivých vrstev. U vrstev tisknutých s určitou časovou prodlevou nelze rovněž očekávat, že rozhraní mezi vrstvami bude mít

identické vlastnosti jako samotný cementový kompozit. Z hlediska chování se tak konstrukce zhotovená 3D tiskem bude značně podobat zdivu. Na vlastnostech kompozitu se navíc může projevit, že během tisku nedojde k vibrování a v extruderu se může kompozit nakypřit. Z toho důvodu může být v hmotě nezanedbatelné množství pórů, které mohou ovlivnit její mechanické vlastnosti.

Výhodou technologie 3D tisku je skutečnost, že ve většině případů nevyžaduje použití bednění. Tím se ale proces výroby stává daleko složitější, protože je nutné ověřit únosnost konstrukce i během výrobní fáze. Při návrhu je proto důležité dostatečně přesně predikovat chování a mechanické vlastnosti cementového kompozitu v době tisku. Vytisknutá směs by měla být kontinuální a bez známek poruch v podobě prasklin, vzduchových dutin a podobně. Materiál by měl být rovněž dostatečně tuhý, aby držel tvar, neroztékal se, byl schopný udržet další vrstvy bez velké deformace a nedocházelo ke ztrátě stability tisknutého prvku. Takové vlastnosti jsou ve výzkumu popsány jako extrudovatelnost, schopnost vrstvení směsi a doba vhodná k tuhnutí.

3 Beton v extrémně rané fázi tuhnutí

V této části diplomové práce jsou shrnuty poznatky o chování čerstvého betonu. Práce se okrajově zabývá čerstvým betonem obecně, více se ale zaměřuje na poznatky související s technologií 3D tisku. Pro technologii nejsou dost dobře aplikovatelné standardní metody, proto je v příštích řádcích popsána řada experimentů zabývajících se čerstvou směsí v souvislosti právě s technologií 3D tisku.

3.1 Vlastnosti čerstvého betonu

Chováním čerstvého betonu se zabývá reologie: věda, která zkoumá deformační vlastnosti v závislosti na napětí. Sledované vlastnosti se rozdělují na fyzikální (tečné napětí, normálové napětí, viskozita, mez toku) a technologické. Reologické vlastnosti popisuje prof. Petr Pytlík v publikaci Technologie betonu [7].

3.1.1 Základní reologické vlastnosti

V následujících odstavcích jsou shrnuty základní vlastnosti čerstvého betonu, které lze uplatnit v experimentech. Vlastnosti a jejich popis jsou převzaty z publikace Technologie betonu od Karla Trtíka [8] a Technologie betonu od Petra Pytlíka [7].

Napětí je síla působící na jednotku plochy, může být způsobeno silou působící kolmo na sledovanou plochu nebo rovnoběžně s ní. Podle toho dělíme napětí na normálové a tangenciální. Jednotkou je Newton na metr čtvereční.

Deformace charakterizuje přetvoření způsobené silovými či nesilovými účinky. Deformace může být pružná (reversibilní), nebo plastická (ireversibilní). Ve stavebnictví popisujeme deformaci pomocí poměrného přetvoření ϵ , to charakterizuje poměr rozměru tělesa ku rozměru tělesa před deformací. S deformací souvisí veličina Poissonovo číslo, které charakterizuje poměr příčné deformace k deformaci podélné.

Viskozita je fyzikální veličina, která vyjadřuje poměr tečného napětí a rychlosti deformace. Viskozitu rozlišujeme kinetickou ν a dynamickou η .

Mez toku (nebo také prahové smykové napětí) charakterizuje hodnotu tečného napětí, při kterém dochází k deformaci. Před dosažením meze toku látka odolává vnějším silám, po překročení dojde k tečení.

Třením označujeme vznik tečné síly mezi dvěma tělesy. Rozlišujeme tření v klidu, v pohybu, liší se také tření suché a kapalinné. Velikost tření charakterizuje součinitel tření f , případně f_0 pro tření v klidu.

Pro potřeby této práce byly z uvedených vlastností nakonec využity jen napětí a deformace. Ostatní uvedené vlastnosti jsou zjišťovány zejména reometry, ty jsou ale dimenzovány spíše pro cementové pasty, které jsou mnohem řidší než sledovaný betonový kompozit. [9] Další vlastnosti, které je nutné zohlednit při návrhu směsi pro technologii 3D tisku, se zavádí postupně během vývoje technologie. Řada těchto vlastností je prozatím diskutována na úrovni vědeckých článků.

3.1.2 Vlastnosti betonu důležité pro 3D tisk konstrukcí

Počátek tuhnutí a doba tuhnutí stanoví interval, ve kterém lze tisknout. Podle dříve provedených experimentů v bakalářské práci [10] nelze stanovit dobu tuhnutí pro 3D tisk pomocí Vicatova přístroje, ale musí být použito jiných experimentálních pokusů. Stanovená doba tuhnutí musí zajistit, aby byl z extruderu tisknut kompaktní pruh betonu bez trhlin a zároveň byla směs dost tuhá na to, aby se neroztekla, ale také dost čerstvá, aby došlo ke vzájemnému propojení jednotlivých vrstev.

Extrudovatelnost představuje schopnost vzniku jednolitého kontinuálního vzorku. Může se zkoušet například tak, že se tiskne kontinuální vzorek a měří se vzdálenost mezi poruchami vzorku. Čím delší vzdálenost mezi poruchami je, tím má směs lepší extrudovatelnost.

Schopnost vrstvení souvisí s tuhostí vzorku, směs musí být ve fázi tisku dostatečně únosná, aby nedocházelo během vrstvení ke zborcení souvrství. Tuhost

vzorku při tlakovém namáhání závisí na modulu pružnosti, ploše a výšce vzorku. Stabilita konstrukce by se tak pravděpodobně dala predikovat pomocí pracovního diagramu, který bude popisovat deformaci v závislosti na napětí. Protože během tisku dochází k tuhnutí, do výpočtu tuhosti zasáhne ještě čas jako třetí veličina ovlivňující celkovou deformaci vzorku.

Počátek tuhnutí, extrudovatelnost i schopnost vrstvení jsou vlastnosti, které jsou používány ve výzkumu a slouží pro vzájemné porovnávání jednotlivých směsí. Nelze zcela jednoznačně určit hranice, podle kterých můžeme stanovit, zdali je kompozit vhodný pro technologii. Je možné, že v budoucnosti tyto hodnoty budou stanoveny, stejně tak bude pravděpodobně předepsán způsob měření veličin, v současné době při absenci norem pro tuto technologii mezní hodnoty stanoveny nejsou.

Pevnost čerstvého betonového kompozitu je důležitá zejména pro predikci chování čerstvého betonu. Stejně jako u výše uvedených vlastností i tato velmi závisí na čase. Zpravidla se udává pomocí pracovních diagramů. Tuhost čerstvého betonového kompozitu můžeme využít pro navrhování konstrukce ve výrobní fázi.

3.2 Běžné zkoušky čerstvého betonu, jejich aplikace pro tisk

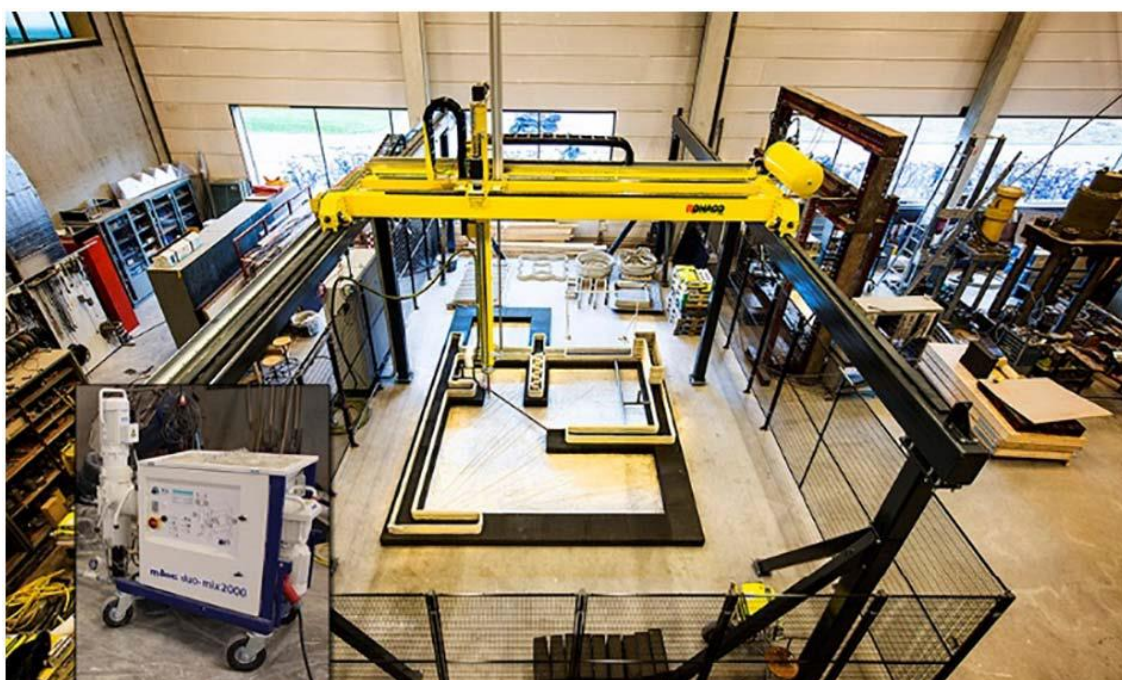
Zkouškami betonu se zabývá norma ČSN EN 206 – Beton, specifikace, výroba. Ve zmíněné normě je uvedeno více sledovaných vlastností čerstvého betonu, jedná se o konzistenci podle zhutnitelnosti, rozlití, sednutí, dále stupeň viskozity, stupeň průtoku nebo odolnost proti segregaci. Konkrétní zkušební postupy jsou rozebrány v normě ČSN EN 12350 – Zkoušení čerstvého betonu, tyto zkoušky ale slouží pouze pro zařazení čerstvé směsi do kategorií, které charakterizují zpracovatelnost a použití betonu. Protože tyto zkoušky nestanovují konkrétní hodnoty mechanických vlastností, nejsou dost dobře aplikovatelné pro potřeby tohoto výzkumu, kdy je nutné kvantifikovat konkrétní vlastnosti pro co nejpřesnější popis chování čerstvého betonu. Lze se domnívat, že některé zkoušky uvedené v těchto normách uplatnění u 3D tisku konstrukcí najdou, ale pomohou spíše při posuzování, zdali je směs dobře extrudovatelná.

3.3 Predikce chování čerstvého betonu ve výzkumu

Zatímco dříve se výzkum zaměřený na 3D tisk betonových konstrukcí zaměřoval více na základní principy tisku, způsob využití 3D tisku a složení směsi, v současné době vznikají práce na téma mechanických vlastností čerstvého betonu. Doposud se čerstvý beton příliš nestudoval, běžné zkoušky pro cementové pasty nebo malty jsou pro beton špatně aplikovatelné, protože beton je složitějším materiálem, u kterého oproti zmíněné cementové pastě dochází například k migraci a segregaci částic. Běžné reometry navíc nejsou na velký odpor betonu dimenzovány [11]. Proto bylo potřeba najít nové cesty nebo upravit používané zkoušky tak, aby měly vypovídající hodnotu pro uplatnění při 3D tisku.

3.3.1 Výzkum na Eindhoven University of Technology

Velmi rozsáhlý výzkum provedl Rob J. M. Wolfs a kolektiv na univerzitě v Eindhovenu, výsledky výzkumu jsou prezentovány v článku *Early age mechanical behaviour of 3D printed concrete: Numerical modelling and experimental testing* [12]. Existují technologie 3D tisku, kde je aplikována analýza metodou konečných prvků. Jednou takovou technologií je *Selective laser sintering*, která je velmi podobná výše uvedené technologii lokálního nanášení pojiva do plniva, místo pojiva princip



Obrázek 2 - 3D tiskárna betonu na univerzitě v Eindhoven [12]

výroby tkví ve spékání materiálu laserem. Kvůli značným teplotním rozdílům dochází k objemovým změnám, jejich dopady jsou vyšetřovány právě pomocí metody konečných prvků. Podobně jako u popsaného příkladu i během 3D tisku betonu má na výsledek vliv mnoho faktorů. Wolfs proto ve své práci uvádí, že by podobný nástroj měl být vyvinut i pro technologii 3D tisku betonových konstrukcí, aby byly maximálně eliminovány nepřesnosti ve výrobě a technologie 3D tisku tak mohla konkurovat dnešním pokročilým technologiím ve výstavbě.

Podle Wolfse měla jeho práce 4 základní pilíře:

1. stanovení správného materiálového deformačního modelu
2. zvolení správné metody zkoušení
3. vývoj nástroje pro analýzu metodou konečných prvků
4. ověření výpočetního modelu reálnými zkouškami

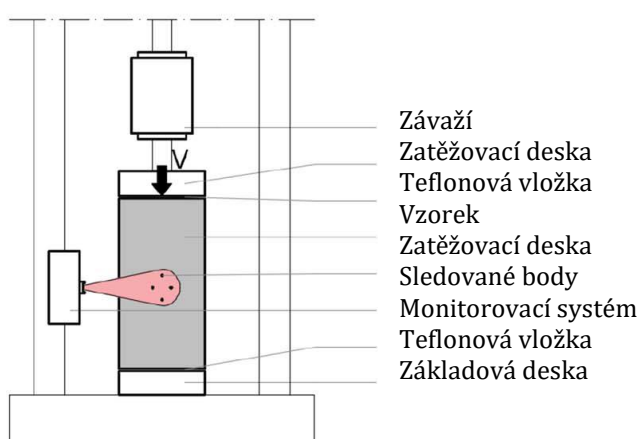
Materiálový deformační model i metody zkoušení byly převzaty z geotechniky. Pro popis chování materiálu byl nakonec využit Mohr-Coulombův materiálový model, protože chování čerstvého betonu je velmi podobné soudržným zeminám. Pro stanovení materiálových charakteristik byla použita zkouška centrickým tlakem a zkouška ve stříhu. Uvedené zkoušky proběhly na cementovém kompozitu, který obsahoval běžné složky betonu (Tab. 1). Výjimkou byla pouze frakce kameniva, která byla omezena velikostí 1 mm. Lze tak konstatovat, že navržená směs spíše odpovídala cementové maltě místo betonu, u kterého se předpokládá použití kameniva s velikostí zrna alespoň 4 mm.

Tabulka 1 – Složení betonového kompozitu [12]

Portlandský cement CEM I 52,5 R
Křemičitý písek s maximální velikostí zrna 1 mm
Mletý vápenec
Modifikační přísady nespecifikovaného typu
Malé množství polypropylenových vláken

Zkouška centrickým tlakem

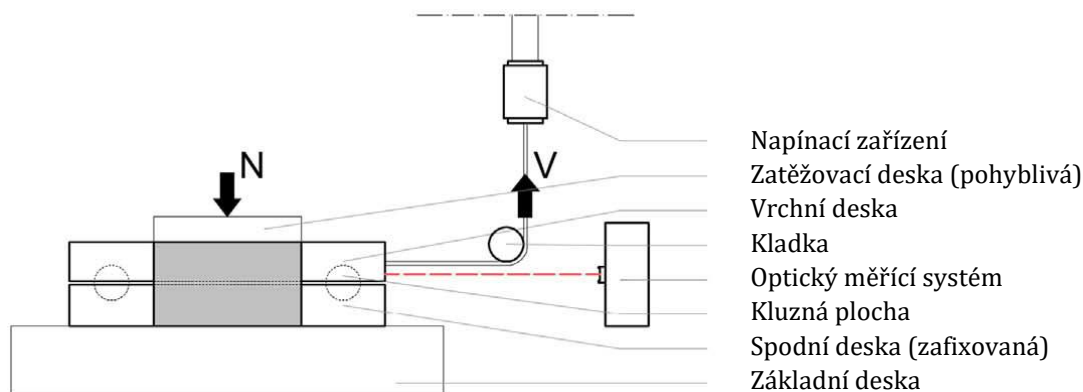
Experimentální zkouška byla provedena v časech 0, 15, 30, 60 a 90 minut od smísení cementu s vodou. Vzorek měl tvar válce o průměru 70 mm a výšce 140 mm. Tento poměr, podle slov autora, umožňuje i ověření diagonálního usmyknutí vzorku. Před zkoušením byl vzorek vibrován na vibračním stole s frekvencí 30 Hz po dobu 10 sekund. Následně se na vzorku provedla zatěžovací zkouška hydraulickým lisem, deformace byla pozorována a vyhodnocena kamerou. Získané poznatky sloužily pro zpracování grafů, které popisují závislost mezi napětím a deformací.



Obrázek 3 - Zatěžování centrickým tlakem [12], upraveno autorem

Zkouška smykové pevnosti

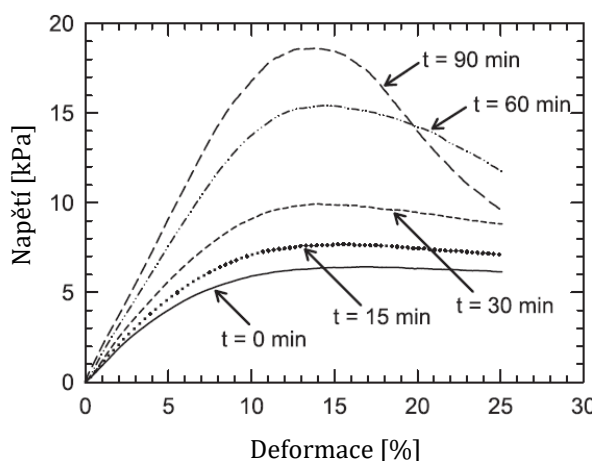
Aby mohlo být pro výpočetní metodu popsáno chování materiálu Mohr-Coulombovým modelem, bylo třeba zjistit úhel vnitřního tření. Ten byl zkoušen také v časech 0, 15, 30, 60 a 90 minut od smísení cementu s vodou. Vzorek měl tvar válce, ale tentokrát s průměrem 40 mm a výškou 40 mm. Před provedením zkoušek byl vzorek vibrován při 30 Hz po dobu 10 sekund a následně umístěn do zkušebního zařízení, kde proběhla zkouška. Cílem zkoušky bylo stanovit sílu, při které dojde k usmyknutí zkušebního vzorku. Každý vzorek byl vystaven třem úrovním zatížení od normálové síly 1,5 N, 11,5 N a 21,5 N.



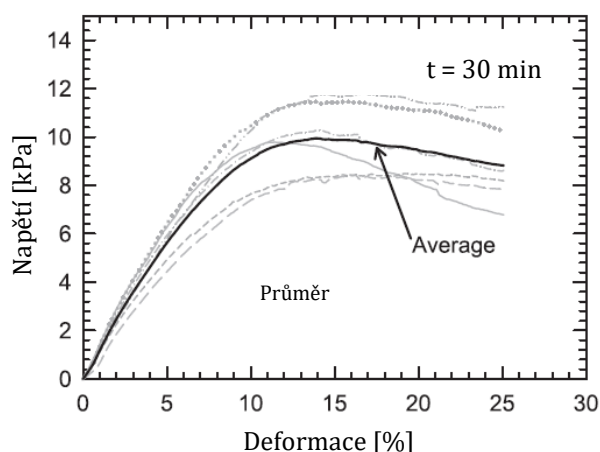
Obrázek 4 - Měření pevnosti ve smyku [12]

Výsledky zkoušek

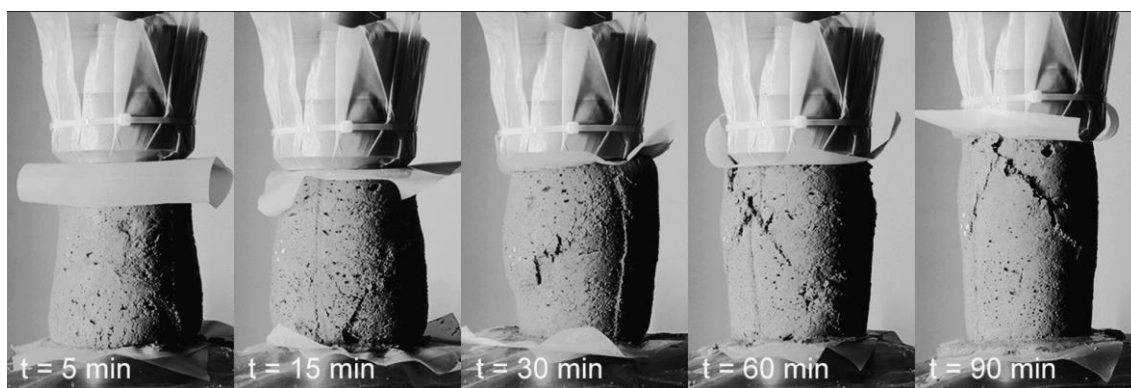
Výsledkem zkoušek byly grafy závislosti deformace na napětí. Vědecký tým přišel na to, že v časovém rozmezí (0-90 min) Youngův model pružnosti a míra soudržnosti lineárně narůstá. Naopak úhel vnitřního tření a Poissonův součinitel je konstantní. Zajímavým poznatkem je i skutečnost, že do 30. minuty u sledované směsi dochází k nárůstu deformace při konstantním napětí. Naopak u směsí starších jak 30 minut nastává po dosažení meze pevnosti výrazný pokles pevnosti s rostoucí deformací a závislost mezi napětím a deformací tak více odpovídá té, kterou známe u pevnosti betonu v tlaku.



Obrázek 5 - Diagram závislosti deformace na napětí [12]

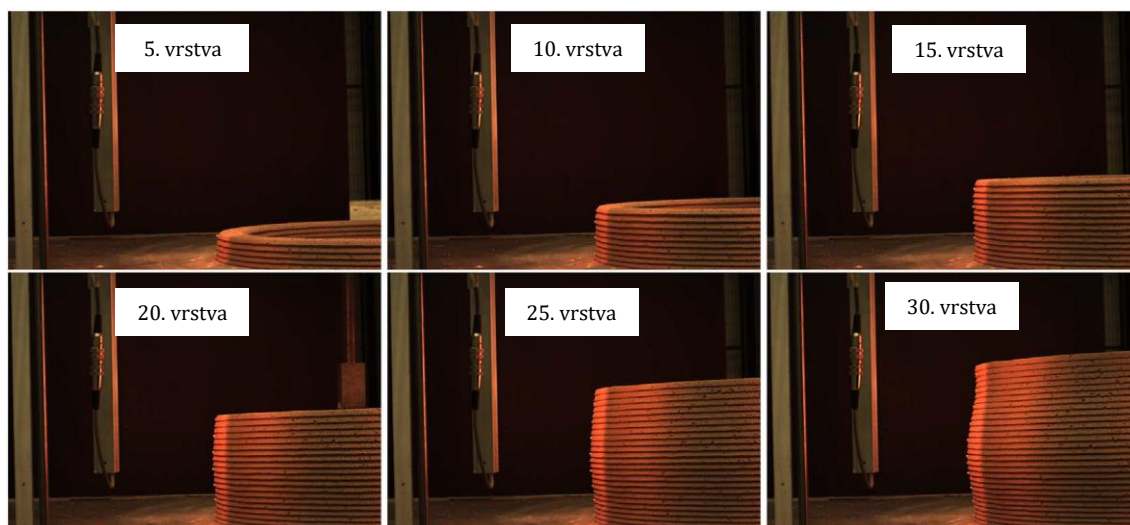


Obrázek 6 - Diagram závislosti napětí na deformaci pro beton stáří 30 minut [12]

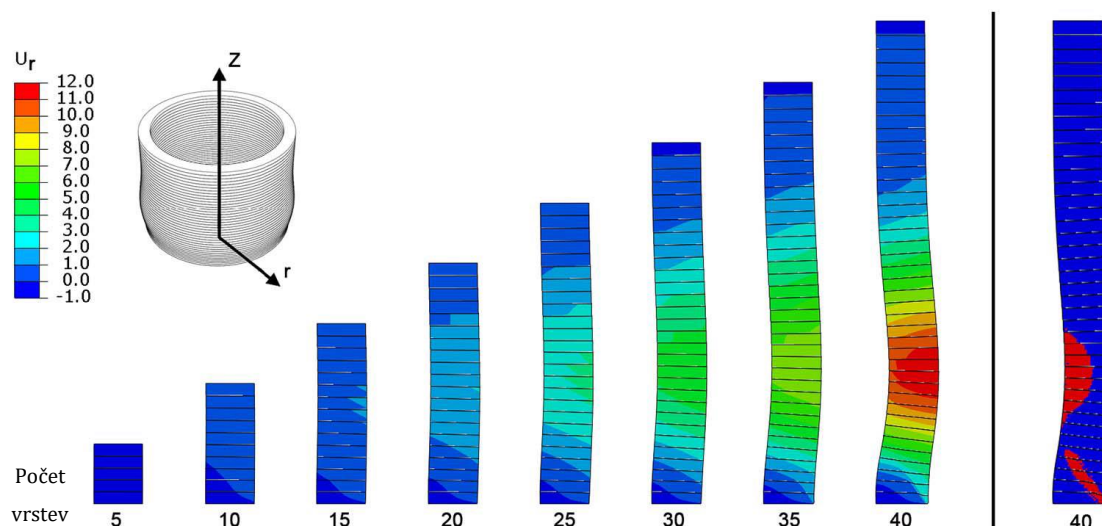


Obrázek 8 - Typické deformace prvků po dosažení únosnosti [12]

Data získaná z experimentálních zkoušek byla použita pro vývoj nástroje schopného simulovat provedené experimenty metodou konečných prvků. Výpočetní přesnost nástroje a materiálového modelu byly ověřeny na zkouškách výroby prvku o výšce 500 mm a poloměru 500 mm technologií 3D tisku. Nejprve bylo chování prvku simulováno pomocí výpočetního nástroje a následně byl prvek vytisknut pomocí 3D tiskárny. Chování vzorku během výroby včetně rozvoje deformace bylo zaznamenáno na kameru a získané výsledky byly porovnány s numerickým modelem. Během tisku vznikla zřetelná deformace v příčném směru prvku, kterou ale spolehlivě předpovídal i numerický model. Z celkových 5 experimentálních vzorků bylo zjištěno, že ke kolapsu vzorku dochází průměrně po vytisknutí 29. vrstvy, před kolapsem je příčná deformace rovna průměrně 15,3 mm. Numerická analýza stanovila maximální deformaci při vytisknutí 29. vrstvy na 11,0 mm, metodu tak lze považovat za poměrně přesnou.



Obrázek 7 - Skutečné chování konstrukce při 3D tisku [12]



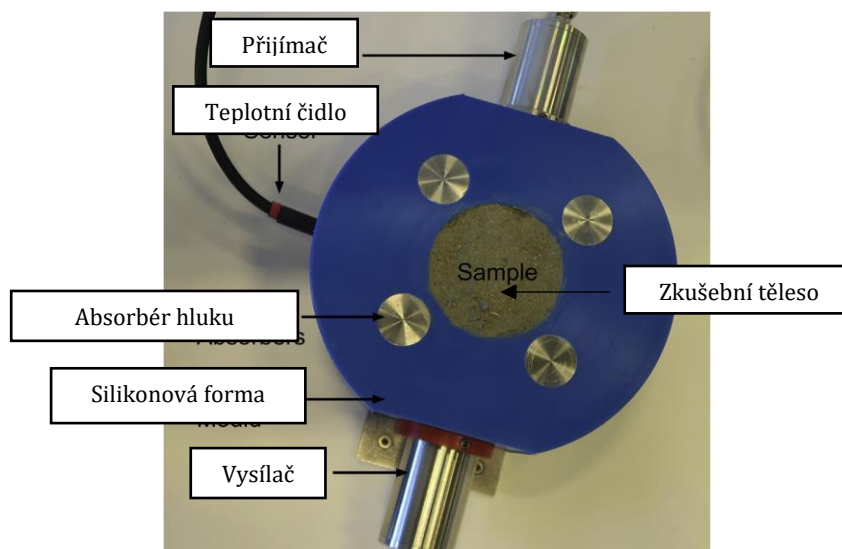
Obrázek 9 - Výstup z analýzy metodou konečných prvků při modelování kruhového vzorku [12]

Nedestruktivní zkoušky pro zjištění vlastností čerstvého betonu

Další práce autora *Correlation between destructive compression tests and non-destructive ultrasonic measurements on early age 3D printed concrete* [13] se zabývá porovnáním mechanických vlastností získaných ze zkoušek materiálu v prostém tlaku a vlastností získaných z nedestruktivních zkoušek. Autor uvádí, že nedestruktivní zkoušky jsou velmi vhodné, aby byla zajištěna nepřetržitá kontrola kvality v reálném čase, díky čemuž může být v případě potřeby rychle zasáhnuto do procesu. Možností nedestruktivních zkoušek je více, uvádí například zkoušku měření odporu penetrem nebo pozorování deformací konstrukce kamerou.

Jako nejvhodnější metodu Wolfs a kolektiv vyhodnotili metodu měření rychlosti prostupu ultrasonické vlny měřeným prvkem. Měřič rychlosti vlny není komplikované zařízení a může jím být opatřena extruzivní hlava, aby kontrolovala proudící beton neustále. Přístroj sestává z vysílače a přijímače signálu, přičemž se měří doba, po kterou trvá přenos vlny od vysílače k přijímači. Rychlost vlny ovlivňuje mnoho faktorů. S probíhající hydratací narůstá rychlost vlny. Rychlost ale také dokáže ovlivnit například typ cementu, různé přísady a příměsi.

Metoda byla používána pro čerstvý beton už dříve, charakteristiky ale byly stanoveny pro betony stáří několika hodin. Pro účely 3D tisku musely proto být vyvinuty nové vztahy. Nakonec vznikly vzorce stanovující velikost Youngova modulu pružnosti v závislosti na rychlosti vlny.



Obrázek 10 - Zařízení pro snímání rychlosti vlny [13]

Rob J.M. Wolfs se svými kolegy dokázal, že geotechnické zkoušky jsou aplikovatelné pro získání mechanických vlastností čerstvé betonové směsi, velice vhodné je také použití měření ultrasonických vln jako nedestruktivní zkoušky pro kontrolu kvality. Připravil nástroj pro analýzu tisknutých konstrukcí metodou konečných prvků.

Experimentálními zkouškami zjistil, že s narůstajícím časem lineárně narůstá i míra soudržnosti a Youngův modul pružnosti, úhel vnitřního tření a Poissonův součinitel se ale s časem nemění.

3.3.2 Výzkum na Nanyang Technological University v Singapuru

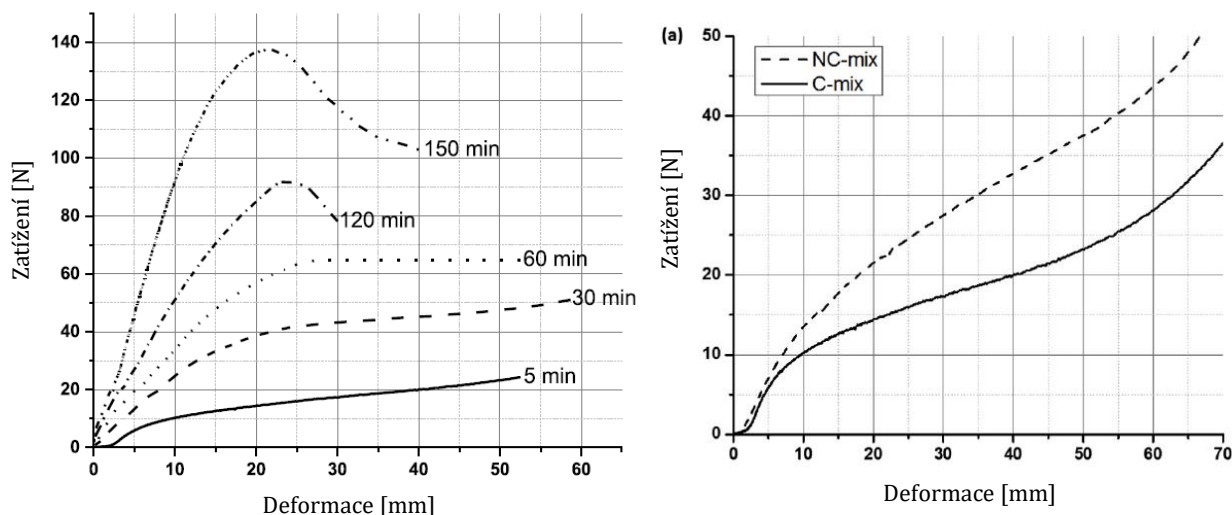
Biranchi Panda a jeho kolegové na univerzitě v Singapuru napsali práci *Mechanical properties and deformation behaviour of early age concrete in the context of digital construction* [9] zabývající se měřením mechanických vlastností čerstvého betonu pro 3D tisk betonových konstrukcí a zvýšení tuhosti pomocí popílků a jílových nanočástic.

Práce vznikala až po vydání první prezentované práce z univerzity v Eindhoven, která je i citována mezi zdroji, tudíž pro tuto práci mohla být inspirací. V určitých částech vědeckého článku vědeckého článku však přináší nové poznatky, které rozšiřují databázi poznatků o chování cementových kompozitů v jejich raném stáří.

V rámci výzkumu se provedla tlaková zkouška směsi v prostém tlaku s cílem stanovit vliv jílovitých částic na mechanické chování směsi v čerstvém stavu. Pro zkoušky byly použity vzorky tvaru válce s poloměrem 70 mm a výškou 140 mm, které byly zatíženy v prostém tlaku v čase 5, 30, 60, 120 a 150 minut od výroby směsi.

Složení cementového kompozitu nebylo dost přesně specifikováno, kromě cementu a kameniva menších frakcí byl ve směsi obsažen také popílek a modifikační přísada. Tato skutečnost poukazuje na to, že vývoj směsí pro 3D tisk betonových konstrukcí je na svém počátku a řada poznatků z výzkumných projektů je přísně utajena.

Směs se lišila také dobou tuhnutí, která byla delší. To se projevilo na efektu, který byl pozorován i u prvního uvedeného výzkumu, a to že u určitých křivek vznikl vrchol, po jehož dosažení křivka klesala. U výzkumu Wolfse byl limitní čas, kdy k tomu nedocházelo, 30 minut od smíchání cementu s vodou, v tomto případě vrchol křivky vznikl až po čase 60 minut. U zkoušených vzorků byl také dobře pozorovatelný rozdíl v porušení při různém stáří betonu. Když byl stlačován beton stáří 30 minut, došlo k deformaci „barelovým efektem“, kdy se vzorek vypoukl na všechny strany. U betonu stáří 150 minut došlo ke kolapsu vzorku usmyknutím diagonály vzorku.



Obrázek 11 - Vlevo pracovní diagram čerstvé směsi; vpravo porovnání únosnosti směsi s obsahem jílovitých nanočástic (NC-mix) a směsi bez nich (C-mix) [9]

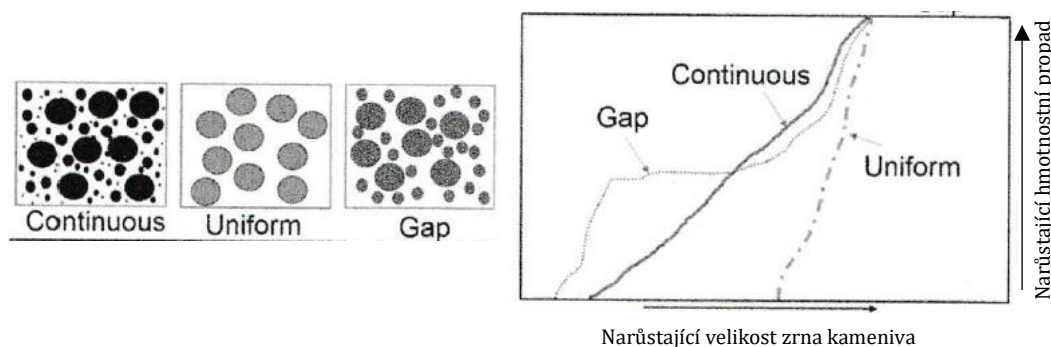
Dalším cílem výzkumu bylo stanovit vliv jílových nanočástic na tuhost vzorku. Výsledky experimentu ukázaly, že přidáním jílovité složky lze zvýšit Youngův modul pružnosti. Tato skutečnost byla prokázána nejenom zkouškou v prostém tlaku, ale také experimentem, který spočíval ve zkoušce vrstvení kruhového prvku technologií 3D tisku. Zatímco při použití referenční směsi bez jílovité příměsi došlo ke kolapsu prvku při pokládání 12. vrstvy, porušení vzorku zhotoveného ze směsi s jílovou příměsí nastalo až při tištění 22. vrstvy.

Výzkum potvrdil závěry výzkumu z Eindhovenu, charakteristiky čerstvého betonu byly velmi podobné. Experimenty prokázaly, že přítomnost jílových nanočástic zvyšuje tuhost prvku a takový materiál je vhodnější pro 3D tisk.

Na univerzitě proběhl i další výzkum, jeho představitelem je Yiwei Wneg. Článek popisující tento výzkum se nazývá *Design 3D Printing Cementitious Materials Via Fuller Thompson Theory and Marson-Percy Model* [14], vyšel v roce 2019. Cílem práce je navržení vhodné směsi pro 3D tisk konstrukcí. Pro chování čerstvého betonu jsou zcela zásadní 2 vlastnosti: „pumpability“ – lze volně přeložit jako tekutost, ta charakterizuje, jak je materiál schopný dopravit se k extruderu; „buildability“ – lze volně přeložit jako schopnost vrstvení. Tyto vlastnosti jsou spojeny s reologickými vlastnostmi betonu. První zásadní reologickou vlastností je statická mez kluzu, ta charakterizuje minimální smykové napětí, při kterém dojde k ztekucení materiálu. Další vlastností je dynamická mez kluzu, ta charakterizuje

kritickou mez napětí, nad kterou lze ztekucený materiál udržovat tekutý. Dalším zásadním parametrem zmíněným v článku je plastická viskozita, ta charakterizuje míru odporu tekutiny k tečení. Nárůst těchto tří veličin znamená zlepšení schopnosti vrstvení čerstvé směsi, ale negativně se projeví na tekutosti. Navrhování směsi pro 3D tisk konstrukcí je tak hledáním vhodného kompromisu mezi těmito vlastnostmi.

Autoři článku uvádějí, že reologické vlastnosti jsou určeny složením směsi. Správné složení směsi zaručuje lepší mechanické vlastnosti při dobrých reologických vlastnostech. K návrhu směsi autoři zvolili několik přístupů, vzájemným porovnáním vzorků je možné zvolené přístupy porovnat. Jedním z přístupů je Fuller Thompsonova teorie, ta byla vyvinuta na počátku 20. století na základě experimentálních zkoušek a používá se hlavně k navrhování vysokopevnostních betonů, udržitelných betonů s minimalizovaným podílem cementu ve složení nebo pro optimalizaci reologických vlastností. Další uvažovanou technologií byl Marson-Percyho model, který uvádí, že maximální stěsnanost a minimum pórů a mezer ve směsi zaručuje nejnižší viskozitu, tudíž dobrou tekutost.



Obrázek 12 - Typy zrnitosti kameniva, na levé straně typické křivky zrnitosti pro jednotlivé typy zrnitosti [14]

Celkem bylo vybráno 6 různých složení kompozitu, které se lišily v zrnitosti kameniva. Vzorek A byl navržen podle Fuller Thompsonovy teorie. Vzorky B a C měly navrženou zrnitost typu uniform – významné zastoupení pouze jedné velikosti zrna. Vzorky D a E obsahovaly kamenivo zrnitosti typu gap – oproti dobře zrněné křivce byly některé složky vynechány. Poslední vzorek byl vytištěn směsí s říčním kamenivem, tedy poměrně dobře zrněným kamenivem.

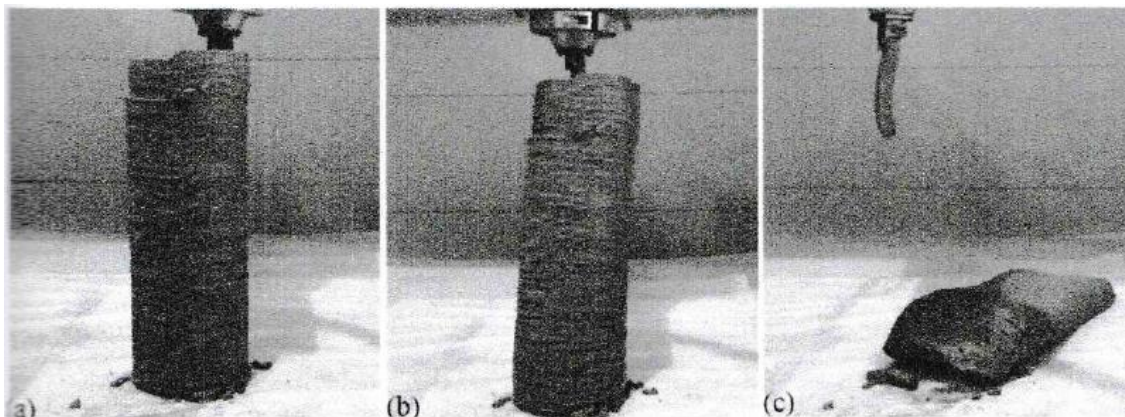
Tabulka 2 - Složení betonového kompozitu [14]

Portlandský cement CEM I 42,5
Přísady na bázi křemíku
Křemičitý písek
Přírodní říční písek
Popílek
Superplastifikátor

Jednotlivé složky betonového kompozitu se příliš nelišily od dalších uvedených výzkumů, konkrétní hodnoty množství složek nebyly uveřejněny. Křemičitý písek byl rozdělen do čtyř frakcí: 0,6 - 1,2 mm; 0,25 - 0,6 mm; 0,15 - 0,25 mm; menší než 0,15 mm. Podíl frakcí se ve směsích lišil.

Nejprve byly prováděny reologické zkoušky pomocí reometru Schleibinger Viskomat XL. Výstupem z reometru je graf, ze kterého se získaly mechanické vlastnosti aplikováním Binghamova plastického modelu, což je uznávaný model pro popisování reologických vlastností materiálů na bázi cementu. Maximální statická mez toku je stanovena z maximálního potřebného točivého momentu, z odporu směsi při zpomalování otáček reometru bylo možné získat plastickou viskozitu a dynamickou mez kluzu. Výsledkem tedy byly hodnoty těchto veličin pro 6 různých směsí. Směs A navržená Fuller Thompsonovou metodou vykazovala nejvyšší hodnoty napětí u statické i dynamické meze toku, tudíž měla nejlepší schopnost vrstvení. Ačkoliv se předpokládalo, že směs s nejvyšší hodnotou meze kluzu bude mít vyšší viskozitu, a tedy horší tekutost, v tomto případě paradoxně směs s nejvyššími mezemi toku měla i nejnižší viskozitu, tudíž se stala zdaleka nejvhodnější směsí pro 3D tisk konstrukcí.

Další částí výzkumu byla zkouška schopnosti vrstvení, která spočívala v tisku kruhového vzorku o vnitřním průměru 110 mm. Extrudér tisknul vrstvu širokou 20 mm a vysokou 10 mm. Cílem bylo vytisknout co nejvíce vrstev, dokud nedojde ke ztrátě stability.



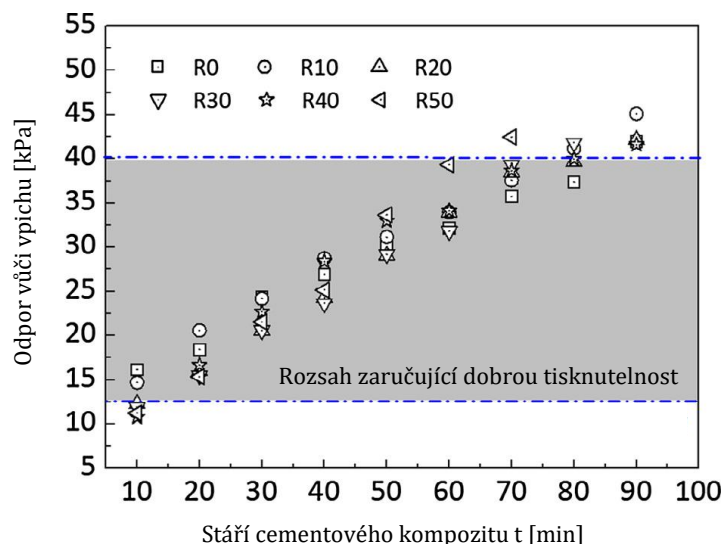
Obrázek 13 - Zkouška tisknutím válcového prvku ze směsi A [14]; a) tvar před nanesením 42. vrstvy; b) viditelná deformace při tisknutí 42. vrstvy; c) ztráta stability při nanášení 43. vrstvy

Zkouškou bylo stanoveno, že nejlepší schopnost vrstvení má betonový kompozit označený jako A navržený pomocí Fuller Thompsonovy teorie, tisknutý prvek se zřítíl během tisku 43. vrstvy, zatímco ostatní prvky se zřítily již při tisknutí 25. až 36. vrstvy. Byly tak potvrzeny výsledky stanovené zkouškou na reometru.

3.3.3 Výzkum na Hebei University of Technology v Číně

Další univerzitou zabývající se mechanickými charakteristikami je Hebei University of Technology v Číně, kde Guowei Ma s kolektivem v roce 2017 vytvořil práci *Printable properties of cementitious material containing copper tailings for extrusion based 3D printing* [15].

Práce se zabývá ověřením vlastností betonové směsi s měděnou příměsí. Pomocí experimentů je v práci ověřována extrudovatelnost, tisknutelnost, schopnost vrstvení. Pro ověření nárůstu pevnosti je zde uveden experiment s použitím penetrometru. Do válcového vzorku o průměru 160 mm a výšce 150 mm je vpichována jehla do hloubky 25 ± 2 mm. Měří se odpor, s jakým je jehla do vzorku zapíchnuta. Výsledkem experimentu je graf zobrazující odpor zapíchnutí jehly v závislosti na čase. V podstatě se dá říci, že se jedná o zkoušku Vicatovým přístrojem upravená pro potřeby 3D tisku.



Obrázek 14 - Zobrazení výsledků experimentu s penetrometrem – odpor vpichu v závislosti na stáří betonu [15]

Oproti předchozím uvedeným výzkumům se liší v tom, že výsledky nelze přímo aplikovat na výpočet deformací nebo jiných charakteristik potřebných k návrhu. Výzkumný tým stanovil rozteč, v jejímž rozmezí má směs dobré vlastnosti k tisku, ale větší výpovědní hodnotu naměřená veličina nemá.

Aby se tato metoda dala využít k predikci chování směsi, bylo by nutné provést experimenty a stanovit vztah mezi odporem vpichu a tuhostí betonu podobně jako tomu bylo u měření ultrasonických vln.

Další článek z roku 2019 s názvem *Method for the Enhancement of Buildability and Bending Resistance of Three-Dimensional-Printable Tailing Mortar* [16] vydaný stejným kolektivem, tentokrát v čele s Zhijian Li, popisuje práci, která má za cíl optimalizaci strukturální celistvosti a mechanických vlastností betonového kompozitu pro 3D tisk konstrukcí. Autoři v práci mimo jiné popisují, že jednou z důležitých vlastností je „buildability“, v překladu jde o schopnost vrstvení. Tato charakteristika popisuje schopnost udržet požadovaný tvar betonového kompozitu během tisku a odpor hmoty při tlaku způsobeném tíhou dalších vrstev. Schopnost vrstvení je zcela zásadní pro použití směsi v technologii 3D tisku, výzkum se proto zabýval mimo jiné vylepšením právě této vlastnosti.

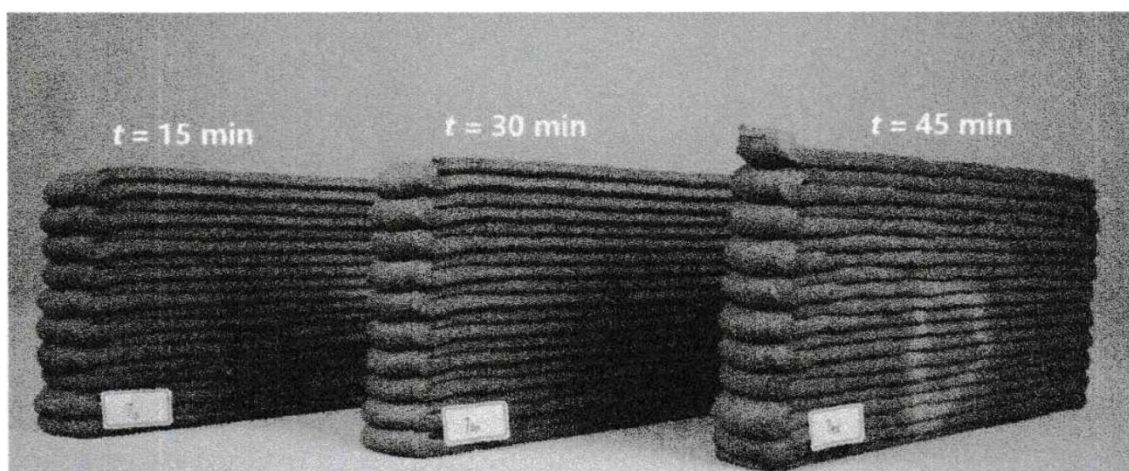
Tuhost čerstvé směsi lze poměrně jednoduše zvýšit tak, aby směs odolávala většímu namáhání, to má ale často za následek zhoršení tekutosti a zhoršení spojitelnosti jednotlivých vrstev mezi sebou. Jednou z cest může být podle autorů článku přidáním VMA (Viscosity Modifying Agents), což jsou ve vodě rozpustné polymery upravující reologické vlastnosti čerstvé směsi. Složení směsi bylo následující:

Tabulka 3 - Složení betonového kompozitu [16]

Portlandský cement 42,5 R
Popílek
Křemičité přísady
Přísada na bázi mědi
Jemnozrnné kamenivo
Plastifikátor na bázi polykarboxylátů
Malé množství polypropylenových vláken

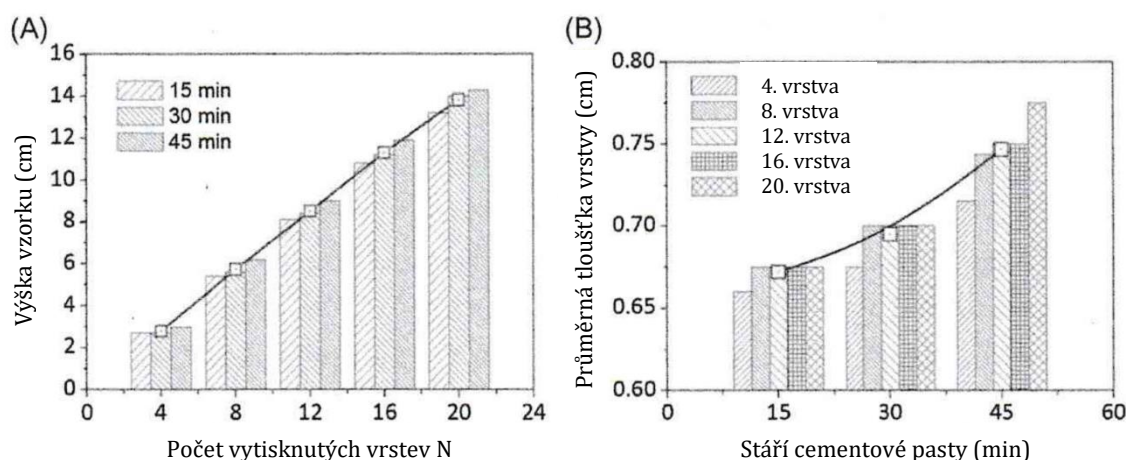
Pro experiment bylo vyrobeno několik vzorků, které byly vzájemně porovnávány. První vzorek byl vyroben standardní metodou odlitím do bedně. Další vzorky byly vyrobeny tiskem z 3D tiskárny, kdy tisk probíhal z různě starého betonu. Jeden vzorek byl tisknut betonem starým 15 minut od smíchání směsi s vodou, další vzorek byl vytisknut 30 minut od smísení. Posledních několik vzorků bylo vytištěno směsí starou 45 minut od smísení, v těchto vzorcích se navíc lišil podíl VMA. Vzorky byly poté testovány v několika zkouškách. Byl zkoušen vliv stáří tisknutého betonu na ohybovou tuhost, dále byl testován vliv přítomnosti VMA na tekutost čerstvého betonu a ohybovou tuhost prvků. Výzkum se ale také věnoval vlivu stáří betonové pasty na schopnost vrstvení a byly prověřovány mechanické vlastnosti čerstvé směsi, které jsou předmětem této diplomové práce.

Autoři výzkumu k popsání chování čerstvé směsi zvolili odlišný přístup oproti předchozím uvedeným výzkumům, kde byl vzorek směsi ve tvaru válce zkoušen v prostém tlaku. V tomto experimentu byly mechanické vlastnosti čerstvé směsi sledovány přímo na vytisknutých vzorcích.



Obrázek 15 - Vzorky pro zjištění schopnosti vrstvení, t charakterizuje stáří směsi, při kterém byl vzorek tisknut [16]

Vzorky byly vytvořeny 3D tiskárnou s koncovkou, která tiskne vrstvu o výšce 8 mm a šířce 30 mm, každý vzorek byl vytištěn z 20 vrstev, délka vzorku byla 250 mm. Vzorky byly vytisknuty bez problémů se stabilitou, jediným pozorovaným nedostatkem se autorům zdálo být nedokonalé spojení jednotlivých vrstev, což může mít za následek narušení celistvosti konstrukce.



Obrázek 16 - Grafy prezentující výsledky výzkumu [16]; (A) graf zobrazuje výšku vzorku při vytisknutí N -té vrstvy; (B) graf zobrazuje průměrnou výšku jedné vrstvy v závislosti na stáří pasty během tisknutí a vertikální umístění vrstvy ve vzorku

Výsledky výzkumu byly prezentovány v grafech, které charakterizují chování čerstvého betonu. V grafu (A) lze vyčíst výšku vzorku během extrudování betonové směsi. Zatímco po vytištění 4 vrstev nejsou rozdíly výšky vzorků příliš rozdílné, po vytisknutí všech 20 vrstev se výška vzorku liší. Kdyby vůbec nedošlo k deformování čerstvého betonu, výška vzorku by byla 160 mm. Dosažená výška vzorku vytisknutého kompozitem v čase 15 min od smísení kompozitu je přibližně 132 mm,

došlo tedy k svislé poměrné deformaci 17,5 %. Výška vzorku naměřená při tisknutí pastou se stářím 30 minut byla přibližně 140 mm, vzorek se zdeformoval o 12,5 %. Poslední sledovaný vzorek tisknutý kompozitem se stářím 45 minut měl výšku 143 mm, zdeformoval se tedy o 10,6 %. Výsledky potvrzují, co bylo očekávatelné, a to že směs má lepší schopnost vrstvení při delší době od smísení kompozitu.

Graf (B) ukazuje průměrnou tloušťku jednotlivých vrstev v závislosti na vertikálním umístění. Z grafu lze vyčíst zajímavý jev vyskytující se u vzorků vytisknutých v čase 15 a 30 minut, a to že průměrná výška prvních 4 vrstev je nižší než průměrná výška u ostatních 16 vrstev, jejichž výška je konstantní. V článku o výzkumu se bohužel autoři na tento jev nezaměřují. Jedním z možných vysvětlení ale může být fakt, že čerstvá směs v takové fázi má mez kluzu, po jejímž překročení dojde k významnější deformaci. Na první vrstvy kvůli tíze dalších vrstev působí větší napětí, je tedy možné, že u těchto vrstev byla mez kluzu již překročena, a proto se jejich deformace tolik liší.

Uvedené grafy si protiřečí, když se v grafu (A) uvádí celková výška vytisknutého vzorku 143 mm, zároveň se v grafu (B) a v textu uvádí průměrná výška jedné vrstvy 7,5 mm. Při uvažování průměrné výšky vrstvy 7,5 mm by totiž při 20 vytištěných vrstvách měl vzorek výšku 150 mm. Tento fakt určitě neznamená ztrátu významnosti popisovaného výzkumu, jen je třeba brát v úvahu možnou chybovost uvedených výsledků.

3.4 Zhodnocení a závěry rešerše

Mechanické vlastnosti čerstvé betonové směsi pro použití v technologii 3D tisku se staly častým tématem výzkumů zejména v posledních několika letech. Přesná predikce chování čerstvé směsi je jedním z předpokladů pro dosažení kvalitního a konkurenceschopného výsledku. V současné době stále není sjednocený a standardizovaný postup sledování charakteristiky směsi. Jedinou zkouškou, která se ve výzkumech objevuje opakovaně, je zkouška schopnosti vrstvení směsi spočívající v tisknutí jednoduchého tvaru a sledování, kdy dojde ke ztrátě stability prvku. Pro získání kvantifikovatelných mechanických vlastností ale bylo ve výzkumech použito více metod, což dokazuje, že výzkum pravděpodobně

stále není u konce a je třeba v budoucnu stanovit metodu, která je pro tyto účely nejvhodnější.

Jednou z použitých metod je získání pracovních diagramů pomocí zkoušky v prostém tlaku. Tato metoda byla použita ve více výzkumech a zdá se být velmi vhodná, protože podle získaného pracovního diagramu lze poměrně přesně stanovit, jak se směs bude chovat během tisku prvku.

Další metodou, díky které lze predikovat chování čerstvé směsi, je sledování deformací na tisknutém vzorku. Určitým omezením může být fakt, že pro predikci chování kompozitu během tisku prvku o N-vrstvách, musí být nejprve vytisknut vzorek se stejným počtem vrstev, navíc musí být tisknutý při různém stáří tisknuté betonové směsi. To se zdá být o mnoho méně praktické než zkouška v prostém tlaku. Výhoda této metody ale může být v tom, že výsledky zahrnují vliv například nedokonalého spojení jednotlivých vrstev.

Do jedné skupiny můžeme zařadit zkoušky reometrem, penetrometrem a zkoušky ultrasonickými vlnami. Tyto zkoušky mají společné to, že se jedná o relativně jednoduché rychlé zkoušky, jejichž výsledky ale nejsou přímo aplikovatelné pro navrhování konstrukcí realizovaných pomocí 3D tisku. Jejich použitím umíme stanovit přesné hodnoty, pro návrh prvků pro technologii 3D tisku je ale nutné tyto hodnoty převést na charakteristiky popisující deformaci v závislosti na působícím napětí. V případě ultrasonických vln již takový postup byl aplikován ve výzkumu na univerzitě v Eindhoven, kdy byl stanoven vztah mezi časem průchodu vlny vzorkem a Youngovým modulem pružnosti. Podobně by mohly být stanoveny vztahy i pro reometr nebo penetrometr.

Výzkumy se shodují na charakteristice čerstvé směsi. Průběh pracovního diagramu směsi se mění s časem. Nejprve se směs chová tak, že po dosažení maximálního napětí je směs téměř ideálně plastická. Po určité době se díky tuhnutí začne objevovat mez toku ve vrcholu křivky pracovního diagramu, po překročení meze toku nastává pokles křivky pracovního diagramu, kdy se směs deformuje při poklesu napětí, dochází ke „změkčení“.

4 Experimentální část

Cílem experimentálních zkoušek bylo stanovit chování čerstvé betonové směsi vystavené statickému zatížení. Důležitým rysem cementových kompozitů pro technologii 3D tisku jsou vlastnosti směsi v čerstvém stavu. Jedná se zejména o extrudovatelnost, tekutost, schopnost vrstvení nebo dobu vhodnou k tisku. Optimálně navržená směs by měla být snadno tisknutelná, tvarově stálá a zároveň dostatečně čerstvá, aby docházelo k dobrému spojení jednotlivých vrstev. Důležitým parametrem čerstvé směsi jsou i mechanické vlastnosti, podle kterých lze predikovat deformaci vytištěné směsi pod tíhou dalších vrstev. Znalost mechanických vlastností tak umožní stanovit svislou deformaci a vodorovnou deformaci způsobenou příčnými tahy u prvků vyrobených technologií 3D tisku.

Diplomová práce se zabývá mechanickými vlastnostmi zkoumané směsi v čerstvém stavu. Primárně byla sledována závislost mezi deformací materiálu a napětím v tlaku. V praxi se pro popis chování materiálů používají pracovní diagramy a z nich vycházející Youngův modul pružnosti. Oproti běžným pracovním diagramům materiálu, které jsou charakterizované závislostí mezi napětím a přetvořením, se při studii směsi v čerstvém stavu musí zohlednit i doba tuhnutí.

Doposud se mechanickým vlastnostem čerstvého betonu příliš studií nevěnovalo, protože při použití betonu standardní technologií, tedy litím do bednění, tyto vlastnosti betonu do procesu nijak nevstupují. V posledních letech značně přibývá vědeckých článků o 3D tisku betonových konstrukcí. Velká část se věnuje technologickému postupu, výhodám této technologie, ale velmi málo z nich se zabývá studiem chování čerstvé směsi, které je přitom pro návrh směsi i samotných konstrukcí velmi zásadní. V současné době existuje několik běžných metod a zkoušek, které se převážně uplatňují při ověření zpracovatelnosti a doby tuhnutí betonu. Závazná metodika a postupy pro zkoušení mechanických vlastností cementových kompozitů však chybí.

Pro vývoj pracovních diagramů běžných materiálů se využívají data získaná z kvazistatických zkoušek prováděných v hydraulických lisech, které monitorují zatížení a deformaci vzorku. Tyto hydraulické lisy jsou však dimenzované

na mnohem větší zatížení než které lze očekávat při zkouškách čerstvé směsi. Navíc příprava zkušebních těles z čerstvé směsi pro zkoušky v lisu včetně samotné zkoušky by mohla být zdlouhavá, získané výsledky by tak mohly být nepřesné a vágní. Zkoušky sledované směsi proto byly provedeny v unikátním zařízení, které bylo vyvinuto primárně pro zkoušky v tlaku cementových směsí v extrémně raném stáří.

4.1 Experimentální zkoušky

4.1.1 Cementový kompozit

Pevnostní zkoušky proběhly na cementovém kompozitu vyvíjeném pro technologii 3D tisku. Složení směsi bylo převzato z bakalářské práce [10], která se zabývala zpracovatelností směsi pro technologii 3D tisku.

Tabulka 4 - Složení zkoušené směsi

Složka	Specifikace	Dávka na 1 m³ betonu
Cement	42,5 R Mokrý	
Voda		
Kamenivo	0/4	
Kamenivo	4/8	
Metakaolin	ČLUZ – Mefisto L05	
Urychlovač tuhnutí	Stachema Betodur A5	

Oproti běžnému betonu se směs vyznačuje vysokým obsahem drobného kameniva. Maximální frakce kameniva je 4/8 mm, převažuje ale frakce 0/4 mm. Extruder 3D tiskárny má obvykle rozměr v řádu desítek milimetrů, proto by obsah kameniva větší velikosti mohl způsobovat častější poruchy během tisku, nebo by mohlo dojít k ucpání tiskové hlavy.

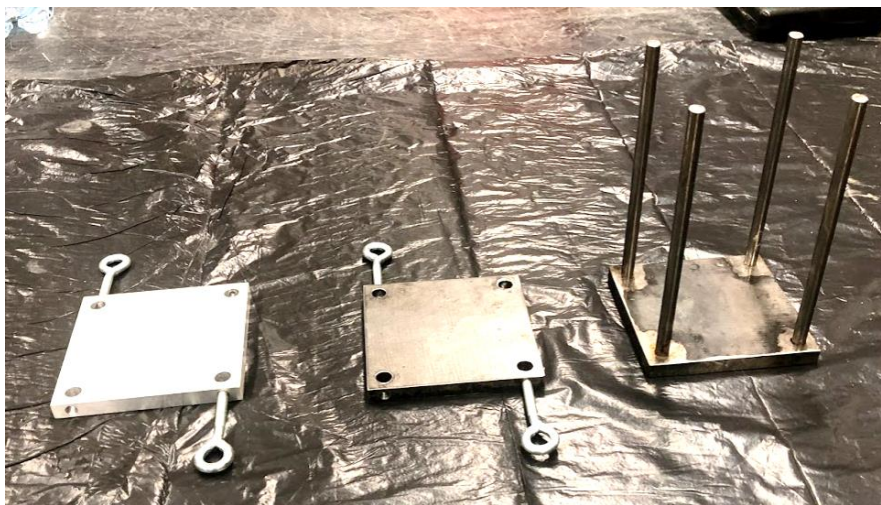
V použité směsi se vyskytují přísady a příměsi zlepšující vlastnosti betonu. Metakaolin se do betonu přidává kvůli vyšší pevnosti, chemické odolnosti, nasákavosti a mrazuvzdornosti [17]. Přítomnost urychlovače Stachema Betodur A5 ve směsi způsobí urychlení tuhnutí a tvrdnutí betonu [18].

Cementový kompozit byl pro účely měření připravován v objemu 7–10 litrů. Směs byla míchána podle následujícího technologického postupu. Nejprve byly suché složky v pořadí hrubé kamenivo, cement, metakaolin, drobné kamenivo vysypány do laboratorní míchačky. Následně byla směs promíchána po dobu 90 sekund, aby došlo k řádné homogenizaci směsi. Poté byla přidána voda s urychlovačem tuhnutí, směs se míchala dalších 90 sekund. Pak se směs důkladně ručně promíchala pomocí zednické lžice a nakonec byla míchačka znovu spuštěna na 90 sekund. Měření času tuhnutí bylo započato ve chvíli, kdy se suché složky smísily s vodou.

4.1.2 Zkušební zařízení

Protože k výzkumu nebyl k dispozici dostatečně citlivý hydraulický lis pro zkoušku v prostém tlaku, bylo nutné pro tyto účely vyvinout přístroj, který by lis nahradil. Jako nejjednodušší a nejefektivnější cesta se od začátku jevilo vytvořit přístroj, který by vzorek stlačoval po přitížení závažím. Zatěžovacích fází by mělo být více, aby při zpracování výsledků mohl být vykreslen co nejpřesnější graf závislosti deformace na napětí, proto bylo nutné zajistit, aby na přístroji bylo snadno měnitelné zatížení.

4.1.2.1 První verze přístroje



Obrázek 17 - První verze přístroje

Experimentálními zkouškami provedenými na první verzi přístroje bylo ověřeno předpokládané chování čerstvého cementového kompozitu, zároveň díky zkušenostem s touto verzí přístroje bylo možné stanovit, jakým směrem by se měl vývoj přístroje ubírat a jak by mohl být optimalizován způsob zkoušení. Přístroj se skládá ze dvou základních komponent. První komponentou je deska s vodícími tyčemi, které jsou přivařeny kolmo k rovině desky. Základní deska má tloušťku 10 mm, délku a šířku 100 mm, vodící trny jsou plné tyče průměru 8 mm a délky 150 mm. Druhou část tvoří zatěžovací deska se stejnými rozměry jako základní deska, která obsahuje otvory v takové pozici, aby se dala nasadit na vodící tyče první části. Průměr otvorů byl v porovnání s průměrem tyčí o 1 mm větší, aby nedocházelo ke tření mezi oběma díly a byl umožněn volný pohyb desky ve svislém směru. U každé vodící tyče byl v desce vytvořen otvor se závitem pro umístění aretačních šroubů, které umožňují fixaci desky v požadované úrovni. Princip zatěžování je jednoduchý, po vodících trnech byla spouštěna zatěžovací deska, která vlastní tíhou stlačovala vzorek betonu. Zatěžovací deska byla nejprve vyrobena z oceli. Kvůli vysoké hmotnosti byla ale vyrobena další deska, která byla vyrobena z hliníku, ten má oproti oceli přibližně třetinovou objemovou hmotnost. Zkoušený vzorek byl ve tvaru válce o průměru 46,85 mm a výšce 47,5 mm, tvar vzorku byl vytvořen pomocí plastové formy.

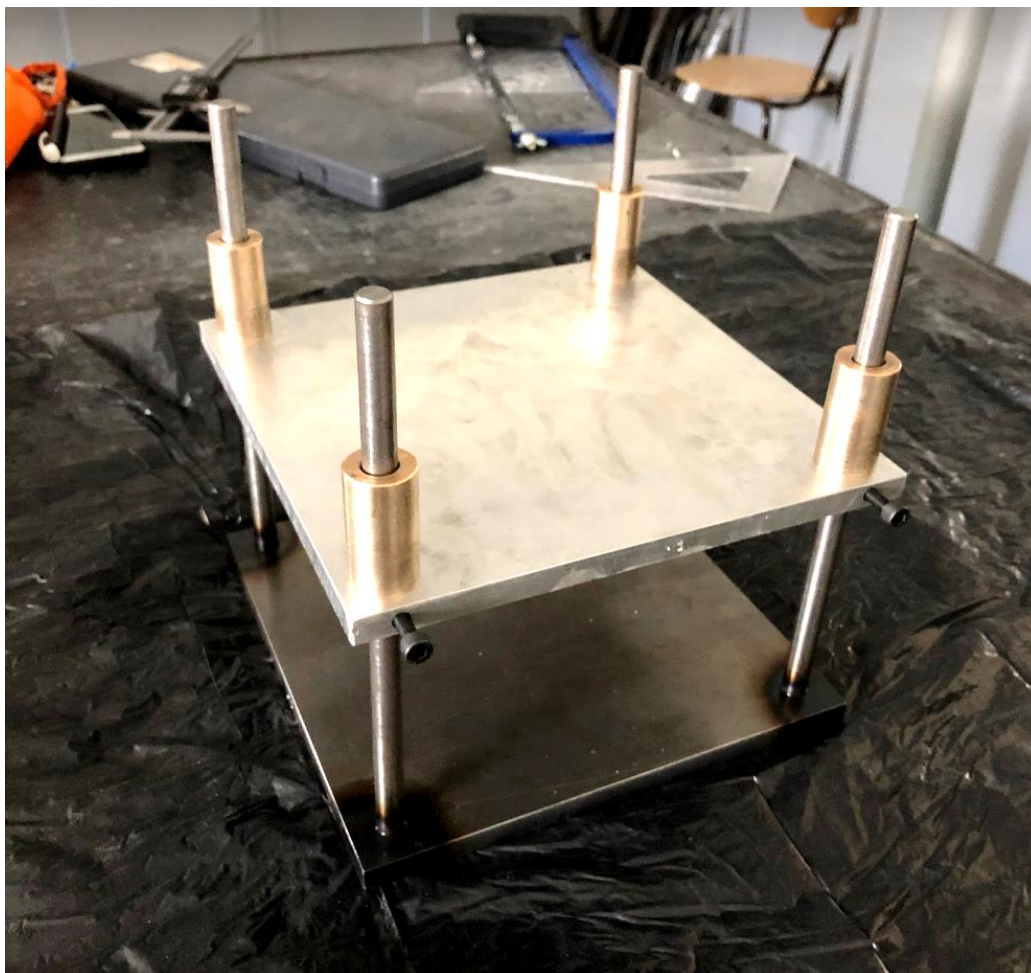
Při prvních experimentálních zkouškách bylo zjištěno, že napětí působící na vzorek při zatěžování je příliš velké už při zatěžování hliníkovou zatěžovací deskou, která měla přibližně třetinovou tíhu desky ocelové, proto ocelová zatěžovací deska nakonec nebyla vůbec použita. Do dalších měření bylo nutné snížit napětí, čehož může být dosaženo dvěma způsoby: snížením hmotnosti desky, zvětšením zatěžovací plochy vzorku. Nabízela se možnost vylehčení desky snížením její tloušťky, pak by ale deska nemohla být osazena aretačními šrouby, navíc s klesající tloušťkou desky klesá její ohybová tuhost.

Další problémy způsoboval pohyb zatěžovací desky po vodících trnech. Aby bylo eliminováno tření zatěžovací desky o vodící trny, byl průměr kruhových otvorů v desce větší než průměr trnů. To ale mělo za následek, že se zatěžovací deska během zatěžovacího procesu značně nakláněla až do míry, kdy docházelo k přičení mezi deskou a vodícími tyčemi. Zatížení od zatěžovací desky tak nebylo do zkušebního tělesa přeneseno v plné míře, protože určitá část zatížení byla nesena vodícími tyčemi z důvodu vzniklého přičení. Řešením mohlo být zvětšení otvorů tak, aby se jejich průměr přibližoval více velikosti průměru trnů, v tu chvíli by ale musel být eliminován vliv většího tření na zatížení vzorku.

4.1.2.2 Druhá verze přístroje

U druhé verze přístroje došlo k celkovému zvětšení základní i zatěžovací desky na půdorysné rozměry 200 x 200 mm. Tím se zvětšil zkušební prostor, který umožnil provádět zkoušky na větším vzorku. Kromě desek byly zvětšeny i vodící tyče na průměr 11 mm, otvory v zatěžovací desce byly opět o 1 mm větší. Vzorek byl opět ve tvaru válce o průměru 71 mm a výšce 71 mm, tvaru vzorku bylo dosaženo použitím plastové formy. S cílem snížit základní hmotnost zatěžovací desky na minimum byla deska vyrobena z hliníku. Větší rozměr zatěžovací desky umožnil vzorek přitěžovat závažím podle požadavků. Pro prezentované zkoušky se použilo závaží o hmotnosti 500 g nebo kádinka s vodou, u které bylo možné regulovat hmotnost množstvím vody v kádince. Oproti předchozí variantě byla deska opatřena kluznými ložisky, která měla eliminovat naklánění zatěžovací desky a tření mezi deskou a vodícími tyčemi. Ačkoliv před použitím přístroje došlo k promazání vodících tyčí olejem a byla použita kluzná ložiska, mezi tyčemi a zatěžovací deskou

docházelo k mírnému tření, které mělo vliv na zatížení zkušebního tělesa. Důvodem byly vodící tyče, které nebylo možné přivařit k základní desce zcela přesně, a proto vždy vykazovaly určitou geometrickou odchylku od kolmice. Část zatížení od zatěžovací desky včetně závaží tak bylo přenášeno vodícími tyčemi.



Obrázek 18 - Druhá verze přístroje

Výhodou tohoto přístroje bylo zachování jednoduchosti, přístroj se snadno zatěžoval přikládáním odměrek s vodou a deformace byly lehce odečitatelné posuvným měřítkem. Při zaměření na vliv třecí síly byly zjištěny velké nedostatky právě v této oblasti. Jednoduchým pokusem pomocí laboratorní váhy bylo zjištěno, kolik ze zatížení je přeneseno vodícími trny. Ukázalo se, že vliv není vůbec zanedbatelný, při opakování ověřovacích zkoušek bylo třením do vodících tyčí přeneseno 5 až 49 % zatížení. Tento vliv bylo pro další zkoušky nutné eliminovat, jinak by tento způsob měření nebylo možné považovat je za relevantní.

Do dalších měření byla upravena geometrie přístroje tak, aby byly sníženy geometrické nepřesnosti, díky tomu se snížil vliv tření a vodícími tyčemi bylo přeneseno průměrně 6 % zatížení. Tuto chybu nebylo dost dobře možné dál snižovat, pro eliminaci by bylo nutné zásadně změnit konstrukci přístroje.

4.1.2.3 Třetí verze přístroje

Poslední verze přístroje se poměrně zásadně liší od předchozích verzí. Měřicí přístroj tvoří sice stejná základní deska s ocelovými trny, na kterých je upevněna deska s ocelovou trubkou o vnějším průměru 89 mm. Ta slouží jako vodící trubka pro zatěžovací břemeno. Výška trubky je 150 mm a zajišťuje, aby nedocházelo k naklánění zatěžovacího břemene a kontaktní plocha mezi zatěžovacím břemenem a zkoušeným vzorkem byla rovnoběžná s rovinou základní desky. Zatěžovací břemeno je vyrobeno z plastu, veškeré zatížení je přenášeno pouze touto plastovou nádobou přímo na vzorek. Na nádobě je natisknutý papír s milimetrovou stupnicí, díky čemuž se z nádoby velmi snadno odečítá míra deformace vzorku. Vlastní tíha plastové nádoby je o mnoho menší než tíha hliníkových zatěžovacích desek, které byly použity u předchozích verzí přístroje. Díky tomu může měření začínat při mnohem nižším napětí. Zatěžovací nádoba je vodotěsná, lze ji plnit vodou a tím jednoduše upravovat tíhu břemene, kterým je vzorek zatěžován. Další možností přitížení je uložení závaží na nádobu. Díky volnému pohybu zatěžovací nádoby ve vodící trubce nedochází ke tření, tudíž je měření mnohem efektivnější než u předchozích měřících přístrojů.

Přístroj lze pro účely tohoto výzkumu považovat za dostačující a nebyl už dále vylepšován. Pro přesnější výsledky by bylo vhodné ještě více snížit hmotnost břemene tak, aby bylo umožněno měření při ještě nižším zatížení pro větší přesnost pracovních diagramů.



Obrázek 19 - Třetí verze přístroje, uprostřed se nachází přístroj složený ze základní desky, ocelových trnů a vodící ocelové trubky, na pravé straně je zatěžovací nádoba, v přístroji se nachází deformovaný vzorek

4.1.3 Zkušební tělesa

Zkoušený vzorek byl válcového tvaru, byl kladen důraz na to, aby poměr mezi průměrem a výškou vzorku odpovídal poměru 1:1, jako je tomu u běžných zkoušek. Obecně lze použít jakoukoliv velikost zkoušeného tělesa, velikost vzorku byla stanovena s ohledem na velikost měřicího přístroje a složení směsi, průměr vzorku by měl být alespoň čtyřnásobek maximální velikosti zrna kameniva. Rozměry

vzorku čerstvého betonu měřeného v první verzi přístroje byly stanoveny na průměr 46,85 mm a výšku 47,5 mm. Rozměry vzorků měřených druhou a třetí verzí přístroje byly o průměru 71 mm a výšce 71 mm. Potřebného tvaru bylo dosaženo pomocí plastové formy, která byla vymazána olejem, aby bylo při vyjmutí vzorku z formy sníženo riziko porušení povrchu tělesa. Před výrobou vzorku byla směs vždy promíchána, tím se simulovalo chování extrudéru, ve kterém se směs částečně promíchává. Vyjmutí předcházelo mírné setřesení a zarovnání vzorku, aby se ve vzorku nevyskytovaly mezery. Vzorek před vyjmutím nebyl vibrován ani zhutňován, aby byly simulovány skutečné vlastnosti čerstvé směsi při 3D tisku. Příprava každého vzorku trvala přibližně 50–60 sekund.

4.1.4 Metodika zkoušení

Vzhledem ke skutečnosti, že metodika zkoušení mechanických vlastností čerstvých směsí pro technologii 3D tisku betonových konstrukcí doposud nebyla zavedena, nejdříve bylo nutné navrhnout postup a způsob takových zkoušek. Navrženou metodiku zkoušení čerstvé směsi lze přirovnat k běžným zkouškám pevnosti betonu v tlaku na vytvrzených vzorcích.

Bakalářská práce *Vývoj betonového kompozitu pro 3D tisk* [10] se zabývala mimo jiné stanovením doby vhodné k tisku. Tato vlastnost charakterizuje, v jakém čase měřeném od smíchání složek s vodou je vhodné tisknout, aby směs byla dobře extrudovatelná a zároveň byla zajištěna dobrá stabilita tisknutých vrstev. Pro sledovanou směs byla tato doba stanovena na interval mezi 20. a 40. minutou od smíchání betonu, proto byly experimenty započaty ve 20. minutě.

Vzorek byl umístěn do středu zkušební přístroje a odstranila se forma. Poté byla změřena počáteční deformace a započalo zatěžování. V rámci experimentálních zkoušek byly aplikovány dvě metodiky měření. První spočívala v jednorázovém zatížení zkušební tělesa. V každém časovém intervalu bylo zhotoveno zkušební těleso, které bylo zatíženo břemenem o určité hmotnosti. U druhé metodiky bylo každé zkušební těleso postupně přitěžováno větším rozsahem zatížení. Oba způsoby měření jsou podrobněji popsány v dalších odstavcích. Po přitížení zkušební tělesa došlo k odečtení deformace pomocí



Obrázek 20 - Prostředí experimentálních zkoušek; vlevo nádoba s čerstvým betonovým kompozitem, uprostřed měřicí přístroj s deformovaným vzorkem, vpravo zatěžovací nádoba s milimetrovou stupnicí, vpravo dole plastová forma pro vzorek posuvného měřítka nebo odečtením hodnoty na stupnici na zatěžovacím válci. Proces zkoušení se opakoval ve stanovených intervalech, obvykle byly intervaly dlouhé 5 nebo 10 minut.

Před započítáním zkoušek bylo nezbytné stanovit hmotnost břemen, kterými bylo zatěžováno zkušební těleso. Rozdíl v hmotnosti jednotlivých břemen byl nastaven tak, aby pomocí získaných měření bylo možné dostatečně přesně vykreslit pracovní diagram zkoušeného materiálu. Při určení hmotnosti břemen bylo zohledněno i zatížení, kterému budou vystaveny vrstvy při 3D tisku betonových konstrukcí. Objemová tíha čerstvého cementového kompozitu vypočtená podle složení směsi je $2221 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, předpokládaná výška jedné vrstvy byla 50 mm.

Tabulka 5 - Výpočet napětí pod tíhou jedné vrstvy

Objemová hmotnost čerstvého betonu:	$\gamma_g = 2221 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Výška jedné vrstvy:	$h = 50 \text{ mm} = 0,05 \text{ m}$
Gravitační zrychlení:	$g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$
Napětí pod tíhou jedné vrstvy:	$\sigma = \gamma_g \cdot g \cdot h = 1,089 \text{ kPa}$

Předpokládané napětí pod tíhou jedné vrstvy bylo stanoveno na 1,089 kPa. Na základě této skutečnosti bylo nutné zvolit takové zatížení, aby výsledné působící napětí bylo v řádu jednotek kPa. V bakalářské práci [10] během zkoušky vrstvení směs ztratila stabilitu při tisku 11. vrstvy, tělesa tisknutá z této směsi by tak měla být vyhotovena maximálně z 10 vrstev, při takové výšce tisknutého prvku je první vrstva zatížena hodnotou $9,801 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$. Rozsah napětí v pracovním diagramu by tak měl být přibližně od 1 kPa do 10 kPa.

4.1.4.1 Metoda A – zatěžování jednorázovým zatížením zkušebního tělesa

První varianta zatěžování spočívá v jednorázovém zatížení. V daných časových intervalech, které byly obvykle 5 minut, byl vytvořen vzorek, výroba vzorku obvykle trvala 50–60 sekund. Po vyjmutí vzorku z formy byl vzorek jednorázově zatížen určitým napětím. Po zdeformování vzorku byly zapsány hodnoty deformace a vzorek byl odstraněn, poté se proces opakoval.

Tato metoda je časově velmi náročná, pro každou hodnotu zatížení je nutné připravit novou várku cementového kompozitu. Vytvoření ideální sady výsledků, která by obsahovala větší množství hodnot zatížení pro přesnější vykreslení diagramu, zároveň aby každá hodnota zatížení byla měřena vícekrát pro zvýšení přesnosti, by bylo časově velmi náročné.

4.1.4.2 Metoda B – zatěžování postupným přitěžováním zkušebního tělesa

Varianta B spočívá v postupném přitěžování zkoušeného tělesa. Vzorek je připraven stejným způsobem jako u metody A, jeho příprava trvá 50–60 sekund. Rozdíl nastává u způsobu zatížení. V tomto případě je prvek v daných časových intervalech postupně zatěžován celou sérií různých hodnot zatížení, pro každou

hodnotu zatížení je změřena hodnota deformace. Po změření poslední hodnoty zatížení je zkušební těleso odstraněno, poté se celý proces opakuje.

Mezi jednotlivými zatěžovacími fázemi docházelo k časovým prodlevám kvůli zaznamenání deformované hodnoty a přípravě dalšího zatěžovacího břemene, celá série zkoušení se tak natáhla přibližně na 5 minut. To mělo za následek, že poslední měřená zatížení byla měřena 5 minut po deklarovaném čase. Pro eliminaci důsledků tak při opakování měření bylo započato zatěžování ještě před deklarovaným časem tak, aby poslední měřené hodnoty nebyly tolik vzdálené od deklarovaného času.

4.2 Výsledky

Během zkoušek byly zaznamenávány výsledky do tabulky, kromě zatížení a času od smíchání směsi byla zaznamenávána výška deformace. Svislé deformace byly přepočteny na poměrnou deformaci vzhledem k výšce vzorku. Tyto hodnoty následně byly porovnány a pomocí tabulkového procesoru zpracovány do pracovních diagramů. V diagramech jsou zaznamenány naměřené body, ty byly proloženy křivkou tak, aby bylo dostatečně přesně popsáno chování čerstvého cementového kompozitu.

Vzhledem k časové náročnosti měření nebyl zaznamenán celý průběh pracovního diagramu, měření probíhalo v intervalu 0–10 kPa. Protože zkoušená směs mě omezenou schopnost vrstvení přibližně do 10 vrstev, což bylo prokázáno v bakalářské práci [10], byla maximální hodnota normálového napětí 10 kPa dostačující.

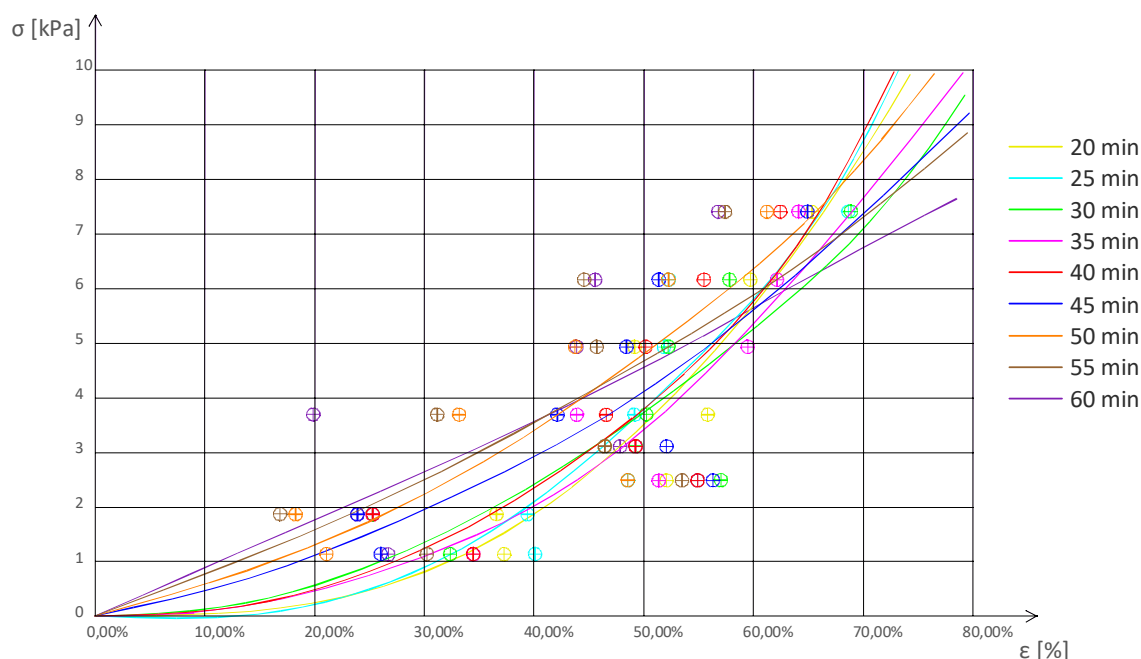
Výsledky provedené na pilotních zařízeních byly zatíženy určitou chybou z důvodu nevhodné konstrukce zařízení. Tyto výsledky byly vyřazeny z výsledkové databáze, která sloužila pro vypracování pracovních diagramů. Relevantní výsledky, které byly použity pro zpracování pracovních diagramů pevnosti, byly získány na druhé verzi přístroje po jeho optimalizaci a na třetí verzi přístroje. Zápisy i s výslednými hodnotami z jednotlivých měření jsou v příloze této diplomové práce.

4.2.1 Metoda A

První metoda spočívala v jednorázovém zatěžování vzorku, vzorek byl zatěžován v intervalu po 5 minutách. Hodnoty pro napětí do 3,5 kPa byly naměřeny na třetí verzi vyvíjeného přístroje, zbytek hodnot byl získán pomocí optimalizované druhé verze přístroje se sníženým vlivem tření.

Výsledky zaznamenané do grafu absolutně neodpovídají předpokládanému průběhu pracovního diagramu. Tvar křivky by pravděpodobně mohl odpovídat hledanému pracovnímu diagramu, problém však nastává při porovnávání jednotlivých hodnot křivek. Křivky popisující chování staršího betonu by měly být strmější, starší beton by měl mít menší deformace oproti čerstvějšímu při působení stejného napětí. Ve vykresleném grafu je vidět, že rozdíly mezi jednotlivými křivkami znatelné nejsou, a tak graf nelze považovat za relevantní.

Graf 1 - Pracovní diagram čerstvého cementového kompozitu, metoda A



Nedostatečné vykreslení chování čerstvého betonu může být způsobeno různými důvody. Jedním z důvodů může být malý vzorek dat. Na získané hodnoty má zásadní vliv více faktorů, mezi ně patří například jak rychle je vzorek zatížen, projevit se může i odlišná vlhkost kameniva. Ačkoliv byla maximální snaha tyto vlivy

eliminovat, úplně zbavit se jich nelze. Díky tomu tak získané hodnoty mohou být značně rozdílné a ustálit by se mohly až zprůměrováním mnohem větší sady dat.

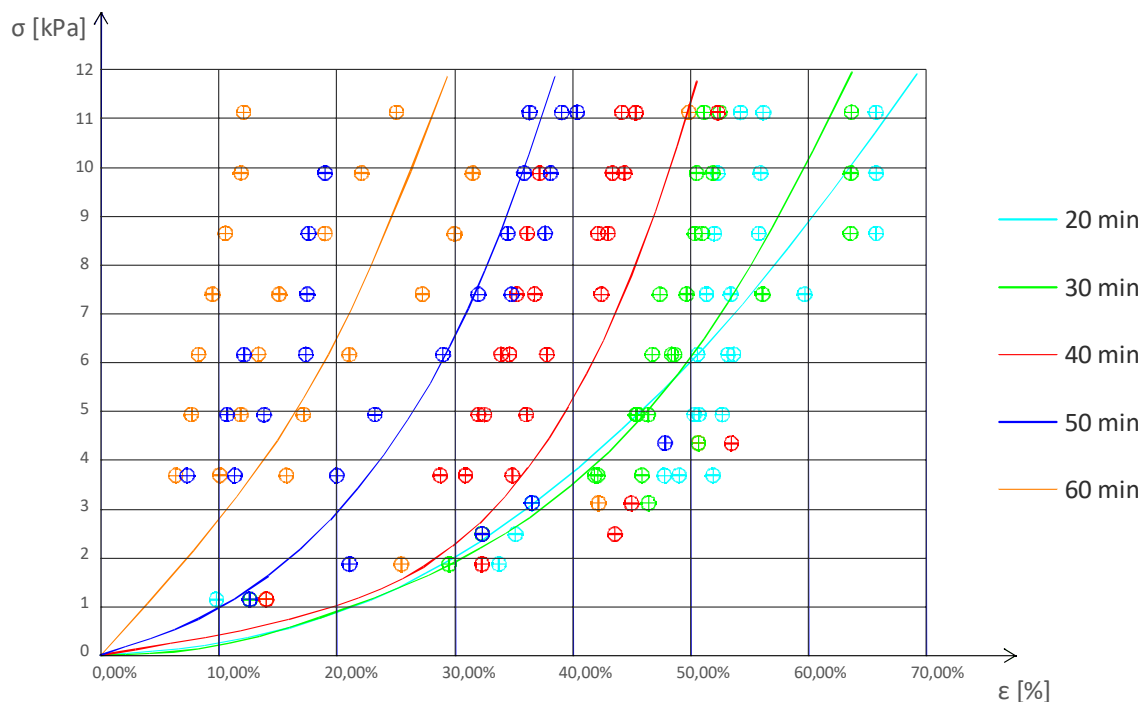
Chyba ale může být způsobena i špatným způsobem zatěžování. Když je na vzorek čerstvého betonu uloženo těžké závaží, díky gravitační síle nabírá zatěžovací břemeno rychlost. Než se prvek zdeformuje tolik, aby byl schopný svou pevností zatížení odporovat, zatěžovací břemeno získá určitou rychlost. V tu chvíli tak na čerstvý beton působí nejen statické, ale i dynamické zatížení. Celkové napětí na kontaktní ploše mezi zkušebním tělesem a zatěžovacím břemenem tak může být mnohem větší, než jaké by způsobilo zatěžovací břemeno v klidu.

Svůj podíl na nepřesném měření může mít i vlastnost čerstvého betonu nazvaná tixotropie. Podle publikace *Technologie betonu* [7] se tixotropním látkám snižuje viskozita, pokud na ně určitou dobu působí tečné napětí, po uvedení materiálu do klidu se zase začne obnovovat původní viskozita. Určitý podíl na velkých deformacích tak může mít zamíchání betonu před výrobou vzorku, během míchání dojde ke snížení viskozity a před zatěžováním se nemusí stihnout plně obnovit. Pak má čerstvý kompozit nižší viskozitu a nedokáže zatížení odolat svou maximální pevností.

4.2.2 Metoda B

Druhá metoda měření spočívala v postupném přitěžování zkušebního tělesa. Hodnoty deformací pro napětí do 3,5 kPa byly získány měřením na třetí verzi přístroje, ostatní hodnoty byly naměřeny na druhé verzi přístroje po jeho optimalizaci.

Graf 2 - Pracovní diagram čerstvého cementového kompozitu, metoda B



Pracovní diagram odpovídá předpokládaným průběhům, největší deformace byly zaznamenány u nejčerstvější směsi, naopak nejmenší deformaci a velmi strmý průběh diagramu má směs měřená 60 minut po smíchání. Všimneme-li si jednotlivých měřených bodů, vyskytují se po skupinách, jen málo z nich vykazuje nějaké nereálné extrémy. Jediná místa, kde se naměřené body výrazně vzdalují průběhu křivky, se nachází pod úrovní 3,5 kPa. To znamená, že tyto body byly naměřeny odlišnou verzí přístroje. Existuje několik možných příčin těchto nepřesností.

Prvním důvodem může být rozdílná vlhkost kameniva. Zkoušky provedené na 3. verzi přístroje probíhaly o několik týdnů později než zkoušky provedené na druhém přístroji. Během této doby se mohly změnit vlastnosti kameniva v laboratoři a díky tomu směs získala jiné vlastnosti.

Další možnou příčinou může být vliv tření vyskytující se u druhého přístroje, tedy u hodnot deformací naměřených při napětí vyšším než 3,5 kPa. Ačkoliv byla snaha tření na tomto přístroji maximálně eliminovat, stále se chybovost přístroje pohybovala v jednotkách procent. Vliv tření by se projevil právě nižší deformací, které u hodnot nad 3,5 kPa můžeme pozorovat. Vzhledem k tomu, že prokázaná

chybovost ale byla jen v jednotkách procent a vyšetřované body vzdálené od křivky se liší o mnohem více, je nepravděpodobné, že by tuto nepřesnost způsobil právě vliv tření.

Nelze vyloučit ani vlivy uvedené u výsledků metody A, tedy vliv tixotropie nebo dynamického zatížení. Pak by se chybovost dala snížit opakováním zkoušek pro získání větší sady výsledků.

4.2.3 Posouzení výsledků

Cílem práce bylo stanovit mechanické vlastnosti betonu popisující chování čerstvého betonového kompozitu během 3D tisku betonových konstrukcí. Výsledkem je pracovní diagram popisující závislost mezi napětím a deformací pro různé stáří betonu. Zkoušky byly provedeny na měřicím přístroji vyvinutém pro účely výzkumu s minimálními náklady. Díky rešerši, která zaznamenala prozkoumané výzkumy chování čerstvého cementového kompozitu, bylo možné určit, jak by měl pracovní diagram čerstvého betonu vypadat. Výsledky dosažené jednou z použitých metod odpovídají očekávaným průběhům, můžeme se domnívat, že výsledky budou aplikovatelné pro 3D tisk konstrukcí. Pro ověření správnosti výsledků by ale pracovní diagramy měly být porovnány se skutečným chováním při 3D tisku konstrukcí.

4.2.3.1 *Vzájemné porovnání jednotlivých metod*

Protože se pro obě metody používal stejný přístroj, nebyly během měření očekávány velké rozdíly. Ukázalo se ale, že způsob zatěžování může mít velký vliv na výsledky.

Metoda A, při které dochází k jednorázovému zatěžování vzorku, nad druhou metodou vyniká především v tom, že měření probíhá v přesně stanovenou chvíli. U metody B, tedy postupném přitěžování, dochází pro každou hodnotu času k celé sérii zatěžování. Zatěžovací série trvá i několik minut, přesto jsou výsledky přisouzeny pouze jednomu okamžiku, čímž vzniká nepřesnost. Během zatěžovací série se totiž mění vlastnosti cementového kompozitu, pevnost materiálu narůstá s rostoucím časem, tento jev je zvláště patrný při raném stáří betonu. Lze tak

konstatovat, že pevnost betonu byla odlišná (nižší) při úvodním zatížení a při finálním zatížení (vyšší).

Metoda postupného přitěžování má velkou výhodu v tom, že během jedné série zatěžování získáváme mnoho hodnot, pro získání reprezentativní sady výsledků tak není nutné tolikrát absolvovat měření. Ukázalo se, že u metody A má velký vliv na výsledky dynamické zatížení. Díky tomu, že u metody zatěžování postupným přitížením nedochází k náhlým velkým rozdílům v zatížení, dynamické zatížení nemá takový vliv na deformace a měření je v tomto ohledu přesnější. U metody A byl také zmíněn vliv tixotropie, který je způsoben snížením viskozity zamícháním směsi. U metody postupného přitěžování je vliv tixotropie snížen o to, že vzorek se sníženou viskozitou je zkoušen jen na úvodní nejnižší napětí, během dalších zatěžovacích fází se hodnota viskozity opět vrací na původní hodnotu, tudíž při nejvyšším zatížení je vliv tixotropie mnohem menší než u stejného zatížení měřeného metodou A.

S ohledem na technologii 3D tisku betonových konstrukcí je metoda postupného přitěžování podobnější reálné výrobě konstrukce 3D tiskem. Během 3D tisku jsou vrstvy přitěžovány postupným tiskem dalších vrstev a zpravidla nedochází k náhlému přitížení větším zatížením.

4.2.3.2 Porovnání výsledků s výzkumy uvedenými v rešeršní části

Stanovením pracovního diagramu pro popis chování čerstvé směsi se zabýval článek *Early age mechanical behaviour of 3D printed concrete: Numerical modelling and experimental testing* [12] popisující výzkum na univerzitě v Eindhovenu. Průběh diagramu byl zjišťován pomocí zkoušky prostým tlakem na hydraulickém lisu. Cementový kompozit se lišil zejména velikostí maximálního zrna kameniva, ta byla pouze 1 mm. První zkouška proběhla přesně po smíchání směsi, další zatěžovací fáze proběhly 15, 30, 60 a 90 minut od smíchání. Výsledný pracovní diagram je k vidění v kapitole 3.3.1.

Při podrobnějším prozkoumání průběhu pracovního diagramu je zřetelně vidět, že směs vyvinutá na univerzitě v Eindhovenu je mnohem pevnější než cementový kompozit, který je předmětem této práce. Směs stárí 30 minut

od smíchání vykazuje při zatížení napětím 5 kPa deformaci pouze 4 %, zatímco stejně stará směs používaná pro tuto práci vykazuje při napětí 5 kPa deformaci 46 %. Další porovnání může být provedeno pro směs starou 60 minut od smíchání, článek uvádí při napětí 5 kPa deformaci 3 %, v tomto výzkumu byla při stejných hodnotách času a zatížení deformace 16 %.

Pracovnímu diagramu čerstvého cementového kompozitu se také věnovali na Nanyang Technological University v Singapuru, o tom pojednává článek *Mechanical properties and deformation behaviour of early age concrete in the context of digital construction* [9]. V tomto článku bohužel nebylo složení směsi přesně specifikováno, podle průběhu diagramu byla ale spíše bližší směsi z Eindhovenu, než směsi zkoumané v této práci (pracovní diagram viz. kapitola 3.3.2). Směs byla opět zkoušena na hydraulickém lisu v prostém tlaku, zkoušena byla v časech 5, 30, 60, 120 a 150 minut od smíchání složek cementového kompozitu.

I tato směs vykazovala mnohem větší pevnost oproti směsi, kterou se zabývá tato diplomová práce. Hodnota deformace při zatížení 5 kPa byla u směsi staré 30 minut 7,5 %, u směsi staré 60 minut už jen 5 %.

Na obou univerzitách byla využita specializovaná technologie pro měření pevnosti v tlaku, zkoušky provedené na tomto přístroji vykazují jednoznačně přesnější výsledky. Tato specializovaná zařízení umožňují kontinuální měření deformace, které zajišťuje přesné vykreslení celého pracovního diagramu. Oproti přístroji vyvinutému v této diplomové práci nehrozí přetížení dynamickým zatížením.

Nevýhodou použití hydraulického lisu může být doba měření, pokud není umožněno nastavení vyšší rychlosti. V prvním z uvedených výzkumů byla tato rychlost deformace lisu nastavena na 30 mm/min, což je poměrně rychlé měření konkurující rychlosti metody A použité v tomto výzkumu. V případě nastavení nižší rychlosti deformace hrozí, že směs během zatěžování výrazně změní vlastnosti a výsledky by nemusely být relevantní.

5 Závěr

Diplomová práce se zabývá mechanickými vlastnostmi čerstvého cementového kompozitu pro 3D tisk betonových konstrukcí. Na úvod byla zpracována podrobná rešerše zaměřená na mechanické vlastnosti čerstvých cementových kompozitů, v další části práce byla experimentálně stanovena pevnost vybrané čerstvé směsi v tlaku.

Většina poznatků uvedených v rešerši byla získána z vědeckých článků zařazených v databázi Science Direct a v knize 3D Concrete Printing Technology od nakladatelství Elsevier. Současné poznatky ukazují, že pro technologii 3D tisku se využívají výhradně cementové malty, které obsahují pouze drobné kamenivo. Doposud také nebyly zavedeny standardizované postupy, které by popisovaly metodiku zkoušení čerstvé betonové směsi. Nicméně z výzkumů je patrné, že existuje několik různých možností, jak mechanické vlastnosti získat. Jednou z možností je využití zkoušky v prostém tlaku, jejímž výstupem je pracovní diagram popisující deformaci v závislosti na zatížení a stáří cementového kompozitu. Jako alternativní způsoby jsou popsány zkouška použitím ultrasonické vlny, zkouška reometrem, zkouška penetrometrem nebo měření tisknutého prvku. Z rešerše rovněž vyplývá, že cementové kompozity v čerstvém stavu mají pružno-plastické až plastické chování.

Protože neexistují závazná pravidla pro zkoušení čerstvého cementového kompozitu v tlaku v normách ani jiných předpisech, bylo nutné navrhnout vlastní metodiku zkoušení. Použití standardního lisu pro uvedené zkoušky bylo vyloučené z důvodu nedostatečné citlivosti. Nejdříve proto bylo nutné vyvinout unikátní přístroj, pomocí kterého by bylo možné rychle a dostatečně přesně provést zkoušky v tlaku na čerstvé směsi. Princip přístroje byl založen na zatěžování vzorku pomocí gravitační tíhy zatěžovacího břemene. Nedostatky a chyby v měření byly postupně eliminovány s optimalizací přístroje, který byl nakonec vyroben ve třech variantách. I tak musela být část získaných dat odstraněna kvůli nepřesnostem vycházejícím ze špatné konstrukce prvních měřících přístrojů. Pro měření hodnot byly použity dvě varianty zatěžování, které se lišily v postupu zatěžování. Zatímco metoda A

spočívala v jednorázovém zatížení vzorku, při uplatnění metody B docházelo k postupnému přitěžování zkušebního tělesa.

Po vyhodnocení hodnot se ukázalo, že způsob zatěžování může významně ovlivnit výsledky měření. Celkem byly vytvořeny dva pracovní diagramy, pro každou zatěžovací metodu jeden. Pracovní diagram získaný měřením metodou A absolutně neodpovídal poznatkům z rešerše, byl tak označen jako nerelevantní. Špatné vykreslení diagramu pravděpodobně způsobila velká četnost chyb, které měření touto metodou provází. Z možných chyb lze uvést například vliv dynamických silových účinků kvůli způsobu zatěžování nebo vliv tixotropie zapříčiněný mícháním vzorku těsně před zatěžováním. Druhý pracovní diagram získaný metodou B odpovídal předpokladům vycházejícím z rešerše, tento pracovní diagram byl označen jako relevantní.

Výsledný pracovní diagram byl porovnán s diagramy z uvedených výzkumů. Směsi používané na univerzitě v Eindhovenu a Singapuru mají zcela odlišné složení, celkové jsou v raném stádiu mnohem pevnější než směs posuzovaná touto diplomovou prací, základní rysy diagramů se ale podobají. Příčina vyšších pevností tkví pravděpodobně v použitém kamenivu, směs sledovaná v této diplomové práci obsahuje více frakcí kameniva. Podle výzkumu v Singapuru právě dobře zrněné kamenivo může být příčinou nižší pevnosti čerstvé směsi.

Ačkoliv se výsledný pracovní diagram zdá být odpovídající, jeho správnost by bylo vhodné ověřit porovnáním se skutečnými deformacemi při 3D tisku tímto cementovým kompozitem. Pro větší relevanci výsledků by však bylo vhodné zvýšit četnost měření.

6 Reference

- [1] [PRŮŠA, Josef. O 3D tisku. Josef Prusa - 3D tisk a tiskárny [online]. [cit. 2019-10-19]. Dostupné z: <https://josefprusa.cz/o-3d-tisku>
- [2] CORE-BAILLAIS, Marine, Hannah BENSOUSSAN, Amandine RICHARDOT a Hilmiyati KUSNADI. The State of 3D Printing. Sculpteo [online]. 2017 [cit. 2019-10-19]. Dostupné z: www.sculpteo.com/media/ebook/State%20of%203DP%202017_1.pdf
- [3] HAMBACH, Manuel a Dirk VOLKMER. Properties of 3D-printed fiber-reinforced Portland cement paste. Cement and Concrete Composites [online]. Elsevier, 2017, 2017, 62-70 [cit. 2019-11-03]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.02.001>
- [4] Our Technology. D-shape [online]. [cit. 2019-10-19]. Dostupné z: <https://d-shape.com/our-technology/>
- [5] KOVÁŘÍK, Michal, Pavel SVOBODA a Petr ŠTEMBERK. Přehled dostupných technologií 3D tisku z cementových malt. Beton TKS [online]. 2018, 3-16. Dostupné z: <http://www.betontks.cz/sites/default/files/2018-2-03.pdf>
- [6] BOS, Freek, Rob WOLFS, Zeeshan AHMED a Theo SALET. Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing. Virtual and Physical Prototyping [online]. Taylor & Francis, 2016, , 209-225 [cit. 2019-11-13]. ISSN 1745-2759. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/17452759.2016.1209867>
- [7] PYTLÍK, Petr. Technologie betonu. 2. vyd. Brno: VUTIUM, 2000. Učebnice (VUTIUM). ISBN 80-214-1647-5.
- [8] TRTÍK, Karel. Technologie betonu. Vyd. 2., přeprac. V Praze: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 978-80-01-04408-7.

- [9] PANDA, Biranchi, Jian Hui Lim a Ming Jen Tan. Mechanical properties and deformation behaviour of early age concrete in the context of digital construction. *Composites Part B: Engineering* [online]. 15.5.2019, , 563-571 [cit. 2019-06-12]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.02.040>
- [10] LIŠKA, Tomáš. Vývoj betonového kompozitu pro 3D tisk. Praha, 2018. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Josef Novák.
- [11] MECHTCHERINE, Viktor, Venkatesh Naidu NERELLA, Frank WILL, Mathias NÄTHER, Jens OTTO a Martin KRAUSE. Large-scale digital concrete construction – CONPrint3D concept for on-site, monolithic 3D-printing. *Automation in Construction* [online]. 2019 [cit. 2019-10-14]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102933>
- [12] WOLFS, R.J.M., F.P. BOS a T.A.M. SALET. Early age mechanical behaviour of 3D printed concrete: Numerical modelling and experimental testing. *Cement and Concrete Research* [online]. 2018, (106), 103-116 [cit. 2019-06-12]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.02.001>
- [13] WOLFS, R.J.M., F.P. BOS a T.A.M. SALET. Correlation between destructive compression tests and non-destructive ultrasonic measurements on early age 3D printed concrete. *Construction and Building Materials* [online]. 13.6.2018, , 447-454 [cit. 2019-06-12]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.060>
- [14] WENG, Yiwei, Mingyang LI, Ming Jen Tan a Shunzhi QIAN. Design 3D Printing Cementitious Materials Via Fuller Thompson Theory and Marson-Pearcy Model. SANJAYAN, Jay G., Ali NAZARI a Behzad NEMATOLLAHI. 3D concrete printing technology. Waltham, MA: Elsevier, 2019, s. 281-306. ISBN 978-0-12-815481-6.

- [15] MA, Guowei, Zhijian LI a Li WANG. Printable properties of cementitious material containing copper tailings for extrusion based 3D printing. *Construction and Building Materials* [online]. 2018(162), 613-627 [cit. 2019-10-14]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.051>
- [16] LI, Zhijian, Li WANG a Guowei MA. Method for the Enhancement of Buildability and Bending Resistance of Three-Dimensional-Printable Tailing Mortar. SANJAYAN, Jay G., Ali NAZARI a Behzad NEMATOLLAHI. *3D concrete printing technology*. Waltham, MA: Elsevier, 2019, s. 161-180. ISBN 978-0-12-815481-6.
- [17] Metakaolin - obecné informace. ČLUZ a.s. [online]. [cit. 2019-11-13]. Dostupné z: <http://www.cluz.cz/cz/metakaoliny-obecne-informace>
- [18] BETODUR A5. Stachema - stavební hmoty a chemie [online]. [cit. 2019-11-13]. Dostupné z: <https://prisadydobetonu.stachema.cz/produkty/urychlovace-tvrdenuti:c5/betodur-a5:p257.htm>
- [19] Improving efficiency of evolutionary structural optimization by implementing fixed grid mesh. *Structural and Multidisciplinary Optimization* [online]. 2002, 24(6), 441-448 [cit. 2019-10-14]. DOI: 10.1007/s00158-002-0257-4. ISSN 1615-147X. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00158-002-0257-4>

7 Seznam obrázků

- Obrázek 1 - Ukázka digitální fabrikace na spojitě zatíženém spojitém nosníku [19]; a) efektivní tvar pro přenesení 55% z návrhového zatížení, b) efektivní tvar pro přenesení 27% z návrhového zatížení (obrázek upraven autorem) 9
- Obrázek 2 - 3D tiskárna betonu na univerzitě v Eindhoven [12]..... 17
- Obrázek 3 - Zatěžování centrickým tlakem [12], upraveno autorem..... 19

Obrázek 4 - Měření pevnosti ve smyku [12].....	20
Obrázek 5 - Diagram závislosti deformace na napětí [12]	20
Obrázek 6 - Diagram závislosti napětí na deformaci pro beton stáří 30 minut [12]	20
Obrázek 7 - Skutečné chování konstrukce při 3D tisku [12].....	21
Obrázek 8 - Typické deformace prvků po dosažení únosnosti [12].....	21
Obrázek 9 - Výstup z analýzy metodou konečných prvků při modelování kruhového vzorku [12]	22
Obrázek 10 - Zařízení pro snímání rychlosti vlny [13].....	23
Obrázek 11 - Vlevo pracovní diagram čerstvé směsi; vpravo porovnání únosnosti směsi s obsahem jílovitých nanočástic (NC-mix) a směsi bez nich (C-mix) [9]	25
Obrázek 12 - Typy zrnitosti kameniva, na levé straně typické křivky zrnitosti pro jednotlivé typy zrnitosti [14].....	26
Obrázek 13 - Zkouška tisknutím válcového prvku ze směsi A [14]; a) tvar před nanesením 42. vrstvy; b) viditelná deformace při tisknutí 42. vrstvy; c) ztráta stability při nanášení 43. vrstvy	28
Obrázek 14 - Zobrazení výsledků experimentu s penetrometrem – odpor vpichu v závislosti na stáří betonu [15]	29
Obrázek 15 - Vzorky pro zjištění schopnosti vrstvení, t charakterizuje stáří směsi, při kterém byl vzorek tisknut [16]	31
Obrázek 16 - Grafy prezentující výsledky výzkumu [16]; (A) graf zobrazuje výšku vzorku při vytisknutí N-té vrstvy; (B) graf zobrazuje průměrnou výšku jedné vrstvy v závislosti na stáří pasty během tisknutí a vertikální umístění vrstvy ve vzorku..	31
Obrázek 17 - První verze přístroje	37
Obrázek 18 - Druhá verze přístroje	39

Obrázek 19 - Třetí verze přístroje, uprostřed se nachází přístroj složený ze základní desky, ocelových trnů a vodící ocelové trubky, na pravé straně je zatěžovací nádoba, v přístroji se nachází deformovaný vzorek..... 41

Obrázek 20 - Prostředí experimentálních zkoušek; vlevo nádoba s čerstvým betonovým kompozitem, uprostřed měřicí přístroj s deformovaným vzorkem, vpravo zatěžovací nádoba s milimetrovou stupnicí, vpravo dole plastová forma pro vzorek..... 43

8 Seznam tabulek

Tabulka 1 – Složení betonového kompozitu [12] 18

Tabulka 2 - Složení betonového kompozitu [14] 27

Tabulka 3 - Složení betonového kompozitu [16] 30

Tabulka 4 - Složení zkoušené směsi..... 35

Tabulka 5 - Výpočet napětí pod tíhou jedné vrstvy 44

9 Seznam grafů

Graf 1 - Pracovní diagram čerstvého cementového kompozitu, metoda A 46

Graf 2 - Pracovní diagram čerstvého cementového kompozitu, metoda B 48

10 Přílohy

10.1 Zápis z měření 28.3.2019

Cíl zkoušky

Dlouhodobým cílem je získat parametry čerstvé betonové směsi tak, aby se dalo predikovat chování čerstvého betonu při 3D tisku betonových konstrukcí. Sledovanými parametry jsou čas a deformace. Cílem první zkoušky bylo ověření chování čerstvého betonu v navrženém měřícím přístroji.

Popis měřícího přístroje

Měřící přístroj se skládá z ocelové destičky o rozměrech 100 x 100 mm se čtyřmi navařenými trny o průměru 8 mm, které slouží jako vodící tyče pro zatěžovací desku. Zatěžovací deska má stejný rozměr jako základní deska, pro zatěžovací desku byly zvoleny 2 materiálové varianty s rozdílnou tíhou. První deska je vyrobena z oceli, druhá deska z hliníku. Desky byly zváženy na přesné digitální váze. Zatěžovací desky jsou opatřeny šrouby, kterými se stabilizuje jejich výšková poloha k vodícím osám.

Popis zkušebního tělesa

Zatěžované vzorky jsou válcového tvaru, toho je dosaženo pomocí plastové formy. Vnitřní průměr formy je 46,85 mm, výška formy je 47,5 mm.

Složení zkoušeného betonu

	Specifikace	Dávka na 1 m ³ betonu
Cement	42,5 R Mokrý	
Voda		
Kamenivo	0/4	
Kamenivo	4/8	
Metakaolin	ČLUZ – Mefisto L05	
Urychlovač tuhnutí	Stachema Betodur A1	

Postup zkoušky

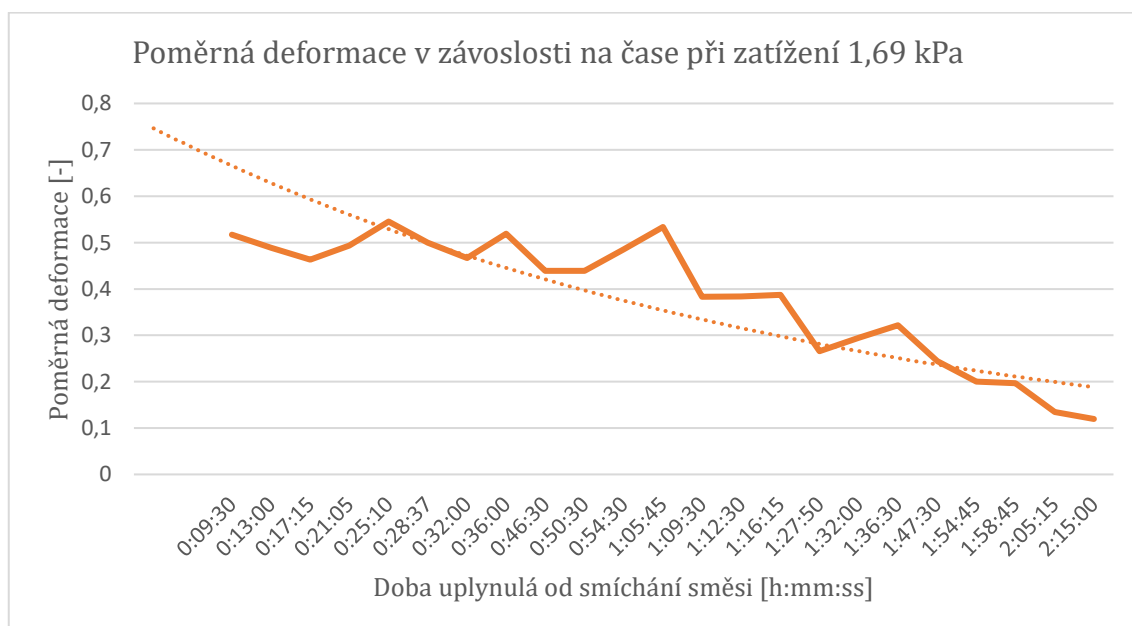
Po navážení všech složek betonu bylo započato míchání nejprve suchých složek. Následně byla přidána voda, v tu chvíli začalo tuhnutí betonu. Po uplynutí určité doby se čerstvým betonem naplnila plastová forma, ta byla vymazána olejem pro lepší vyjmutí vzorku. V tu chvíli byla osazena zatěžovací deska tak, aby se spodní plochou dotýkala vzorku. Posuvným měřítkem se změřila výška po všech 4 stranách. Poté byla zatěžovací deska uvolněna a svou tíhou zdeformovala měřený vzorek. Po dosednutí byla výška desky stabilizována šrouby a změřila se výška vzorku po deformaci a průměr vzorku po deformaci.

Takto se zkouška opakovala v časových intervalech minimálně 10 min (převážně cca 4 min) až do času 2:15:00 měřeného od počátku tuhnutí.

Kvůli velké tíze nebyla použita deska vyrobená z oceli, nakonec byla použita jen zatěžovací deska z hliníku s hmotností 290,65 g, vzhledem k velikosti vzorku takové zatížení vyvozovalo napětí 1,69 kPa.

Výsledky zkoušky

Výsledky lze prezentovat v grafu poměrného přetvoření pro zadané zatížení. Přesné výsledky zkoušky jsou v příložené tabulce. Pro větší přesnost byly naměřené hodnoty proloženy křivkou.



Z grafu lze vyčíst, že ačkoliv poměrná deformace celkově klesá, v první hodině značně kolísá ve velkých mezích. Pro zpřesnění výsledků je třeba provést větší množství zkoušek.

Navržená vylepšení

Aby byla data co nejlépe aplikovatelná pro 3D tisk, bylo by vhodné, aby tíha, kterou je vzorek zatěžován, odpovídala co nejpřesněji tíze jedné vrstvy tisknuté hmoty. Výsledkem práce pak může být graf deformace v čase pod tíhou jedné vrstvy, graf deformace pod dvěma vrstvami atd.

Uvažovaný extruder by měl mít průměr cca 4 cm, z tohoto hlediska je tak rozměr vzorku zcela relevantní. Při zvětšení vzorku bude ale dosaženo snazší manipulace při vytváření vzorku a lze očekávat přesnější výsledky.

Aby bylo možné výsledky lépe aplikovat, bylo by vhodné vytvářet měřeními pracovní diagramy popisující závislost mezi napětím, deformací a dobou od smíchání směsi. Pro získání relevantních výsledků je nutné použít více hodnot zatížení.

Mezi vodícími osami a otvory v zatěžovací destičce byly určité vůle, v důsledku čehož nebyla zatěžovací deska stále ve vodorovné poloze a docházelo k přičení na vodících tyčích a k nerovnoměrným deformacím. Vhodnější by bylo, aby měl otvor v zatěžovací desce rozměr co nejvíce odpovídající rozměru vodící osy, aby nedocházelo k pootočení. Při takovém řešení by se mohl snížit počet vodících os na 2. V tu chvíli by mohl ale nastat problém s pohybem zatěžovací desky po ose při jakémkoli znečištění, navíc by se mohl zvýšit vliv tření. Nabízí se možnost „pohybové“ ústrojí přemístit dále od pracovní plochy přístroje, ale to by vyžadovalo mnohem náročnější konstrukční řešení.

Závěr

Experimentálními zkouškami bylo ověřeno chování čerstvého betonu, princip fungování tohoto přístroje je možné použít do dalších měření, je ale nutné sáhnout po konstrukčních úpravách.

10.2 Zápis z měření 12.6.2019

Cíl zkoušky

Dlouhodobým cílem je získat parametry čerstvé betonové směsi tak, aby se dalo predikovat chování čerstvého betonu při 3D tisku betonových konstrukcí. Sledovanými parametry jsou napětí, čas a deformace. Cílem druhé zkoušky bylo ověření vylepšeného přístroje a zároveň ověření chování směsi při snížení množství vody.

Popis měřícího přístroje

Měřící přístroj se skládá z ocelové desky se čtyřmi navařenými trny, které slouží jako vodící osy pro zatěžovací desku. Oproti minulé verzi přístroje byly půdorysné rozměry přístroje zvětšeny na 200 x 200 mm. Zatěžovací deska je opatřena kluznými ložisky tak, aby bylo minimalizováno tření a nedocházelo k natočení. Pro minimalizaci tření byl přístroj důkladně promazán.

Popis zkušebního tělesa

Zatěžované vzorky jsou válcového tvaru, toho je dosaženo pomocí plastové formy. Vnitřní průměr formy je 71 mm, výška formy je také 71 mm.

Složení zkoušeného betonu

	Specifikace	Dávka na 1 m³ betonu
Cement	42,5 R Mokrý	
Voda		
Kamenivo	0/4	
Kamenivo	4/8	
Metakaolin	ČLUZ – Mefisto L05	
Urychlovač tuhnutí	Stachema Betodur A1	

Postup zkoušky

Po navážení všech složek betonu bylo započato míchání nejprve suchých složek. Následně byla přidána voda, v tu chvíli začalo tuhnutí betonu. Po uplynutí

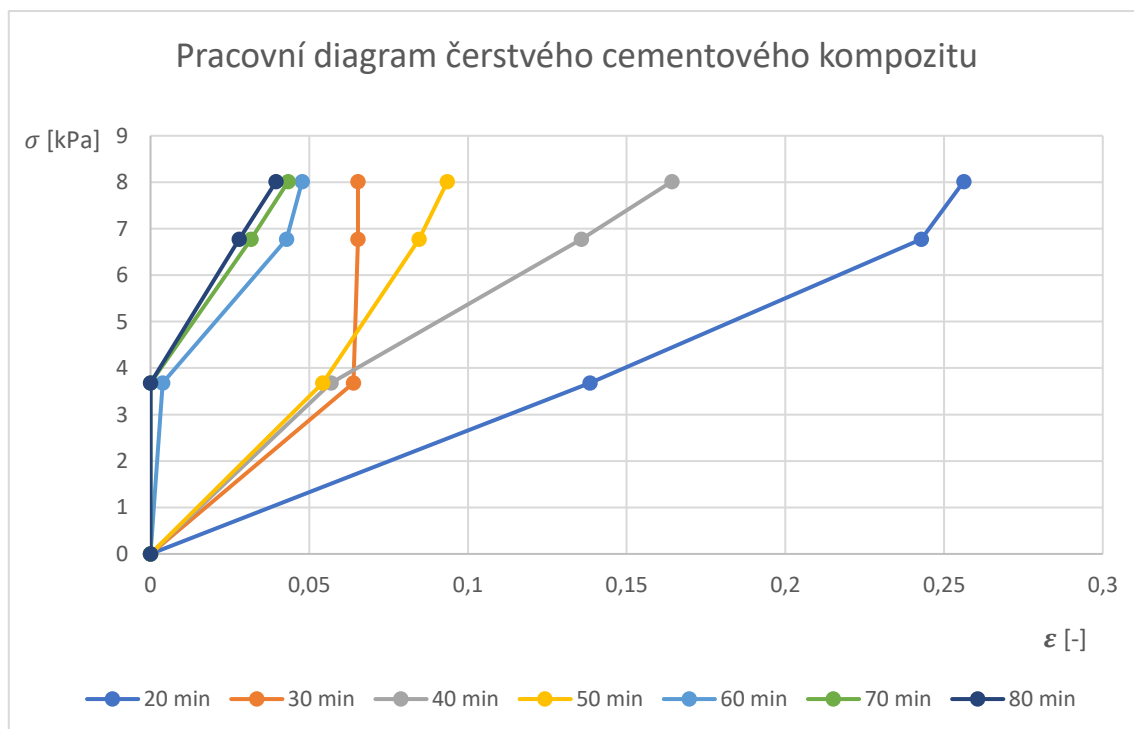
určité doby se čerstvým betonem naplnila plastová forma, ta byla vymazána olejem pro lepší vyjmutí vzorku. V tu chvíli byla osazena zatěžovací deska tak, aby de spodní plochou dotýkala vzorku. Posuvným měřítkem se změřila výška po všech 4 stranách. Následují 3 zatěžovací fáze. V první fázi je prvek zatížen pouze tíhou zatěžovací desky. Ve druhé a třetí fázi dochází k přitížení závaží. Hodnoty zatížení jsou uvedeny v tabulce včetně přepočtu na napětí vzhledem k tvaru zatěžovaného tělesa:

Zatěžování	m [g]	[kPa]
1. fáze	1483,82	3,68
2. fáze	2734,76	6,78
3. fáze	3234,76	8,02

Takto se zkouška opakovala v časových intervalech po 10 minutách až do 80. minuty tuhnutí, po této době už beton nemá zpracovatelnost vhodnou k 3D tisku.

Výsledky zkoušky

Výsledky lze prezentovat v grafu poměrného přetvoření v závislosti na napětí.



Poměrná deformace prvku [mm]							
Napětí [kPa]	Čas [min]						
	20 min	30 min	40 min	50 min	60 min	70 min	80 min
0	0	0	0	0	0	0	0
3,68	13,85%	6,39%	5,69%	5,42%	0,38%	0,00%	0,00%
6,78	24,28%	6,54%	13,58%	8,46%	4,28%	3,17%	2,79%
8,02	25,62%	6,54%	16,42%	9,35%	4,77%	4,34%	3,96%

Ověření zkoušky

V dosavadních zkouškách byl zcela zanedbáván vliv tření. Po této zkoušce byl ověřen vliv tření jednoduchým pokusem, kdy se pod zatěžovací desku položila přesná laboratorní váha. Spuštěním zatěžovací desky na váhu se zjistilo, jak velká část zatížení je přenesena vlivem tření vodícími tyčemi. Pokus byl ověřen 3x, poprvé bylo třením přeneseno 13% zatížení, podruhé 49% zatížení, při 3. pokusu 5 %. Z toho vyplývá, že na prvek pravděpodobně působilo menší napětí, než jaké bylo vypočtené a výsledky tak nejsou zcela relevantní. Pro další pokusy je nutné zařízení upravit tak, aby se minimalizovalo tření.

Závěr

Zhodnocení směsi

Po snížení množství vody se zlepšila zpracovatelnost v prvních 30 minutách, poté ale směs začala velmi brzy tuhnout, pravděpodobně by se doba použitelnosti velmi zkrátila. Pro sjednocení měření bude lepší se vrátit k původnímu složení směsi.

Zhodnocení měření

Vzhledem k výsledku ověření zkoušky nejsou výsledky korektní, v ostatních ohledech se zdá být princip zkoušky vhodný. Bylo by dobré zatěžovat ve více fázích, aby byl graf deformace přesnější.

Je třeba upravit přístroj pro získání relevantnějších výsledků. V ideálním případě by mělo být použito hydraulického lisu, vzhledem k velmi malé pevnosti je ale nutné použít ne zcela běžný lis s vysokou citlivostí.

10.3 Zápis z měření 2.7.2019

Cíl zkoušky

Dlouhodobým cílem je získat parametry čerstvé betonové směsi tak, aby se dalo predikovat chování čerstvého betonu při 3D tisku betonových konstrukcí. Sledovanými parametry jsou napětí, čas a deformace. Cílem třetí zkoušky bylo ověření vylepšeného přístroje.

Popis měřícího přístroje

Měřící přístroj se skládá z ocelové desky se čtyřmi navařenými trny, které slouží jako vodící osy pro zatěžovací desku. Zatěžovací deska je opatřena kluznými ložisky, aby nedocházelo k natočení. Pro minimalizaci tření byl přístroj důkladně promazán. Během druhé zkoušky byl zjištěn významný vliv tření při zatěžování, proto byla u přístroje upravena geometrie, aby byl vliv tření co nejvíce snížen.

Popis zkoumaného vzorku

Zatěžované vzorky jsou válcového tvaru, toho je dosaženo pomocí plastové formy. Vnitřní průměr formy je 71 mm, výška formy je také 71 mm.

Složení zkoušeného betonu

Při minulém experimentu bylo sníženo množství vody, to se ale negativně projevilo v rychlejším tuhnutí a horší zpracovatelnosti po 30 minutách, tudíž byla pro další měření zachována původní receptura.

	Specifikace	Dávka na 1 m ³ betonu
Cement	42,5 R Mokrý	
Voda		
Kamenivo	0/4	
Kamenivo	4/8	
Metakaolin	ČLUZ – Mefisto L05	
Urychlovač tuhnutí	Stachema Betodur A1	

Postup zkoušky

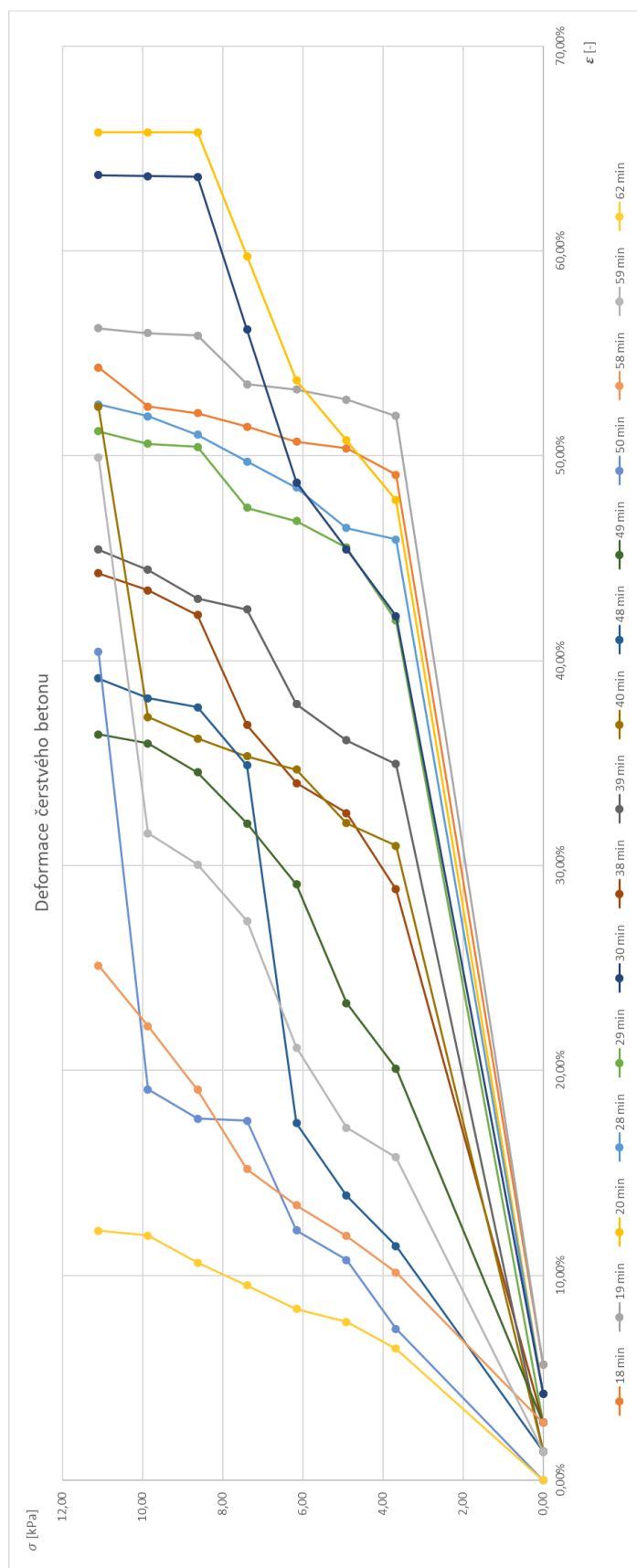
Po navážení všech složek betonu bylo započato míchání nejprve suchých složek. Následně byla přidána voda, v tu chvíli začalo tuhnutí betonu. Po uplynutí určité doby se čerstvým betonem naplnila plastová forma, ta byla vymazána olejem pro lepší vyjmutí vzorku. V tu chvíli byla osazena zatěžovací deska tak, aby se spodní plochou dotýkala vzorku. Posuvným měřítkem se změřila výška po všech 4 stranách. Následuje 7 zatěžovacích fází. V první fázi je prvek zatížen pouze tíhou zatěžovací desky. V dalších fázích dochází k přitížení závažími o hmotnosti 0,5 kg. Hodnoty zatížení jsou uvedeny v tabulce včetně přepočtu na napětí:

Zatěžování	m [g]	[kPa]
1. fáze	1483,82	3,68
2. fáze	1983,82	4,92
3. fáze	2483,82	6,15
4. fáze	2983,82	7,39
5. fáze	3483,82	8,63
6. fáze	3983,82	9,87
7. fáze	4483,82	11,11

Takto se zkouška opakovala v časových intervalech po 10 minutách až do 60. minuty tuhnutí, po této době už beton nemá zpracovatelnost vhodnou k 3D tisku.

Výsledky zkoušky

Výsledky jsou prezentovány v tabulce a formou grafu.



Poměrná deformace prvků [mm]

Napětí [kPa]	Čas [min]															
	18 min	19 min	20 min	28 min	29 min	30 min	38 min	39 min	40 min	48 min	49 min	50 min	58 min	59 min	62 min	
0	5,63%	5,63%	4,23%	4,23%	2,82%	4,23%	4,23%	2,82%	1,41%	1,41%	1,41%	2,82%	0,00%	2,82%	1,41%	0,00%
3,68	49,07%	51,94%	47,83%	45,92%	41,96%	42,17%	28,83%	28,83%	34,96%	30,96%	11,42%	20,08%	7,38%	10,14%	15,76%	6,41%
4,92	50,37%	52,73%	53,68%	46,46%	45,52%	48,70%	32,56%	32,56%	36,11%	32,07%	13,89%	23,28%	10,75%	11,92%	17,20%	7,72%
6,15	50,68%	53,23%	53,68%	48,44%	46,82%	48,70%	34,01%	34,01%	37,87%	34,69%	17,42%	29,07%	12,18%	13,41%	21,11%	8,35%
7,39	51,41%	53,48%	53,68%	49,72%	47,46%	48,70%	36,86%	36,86%	42,49%	35,32%	34,89%	32,06%	17,54%	15,18%	27,30%	9,51%
8,63	52,08%	55,87%	65,79%	51,03%	50,42%	63,61%	42,23%	43,03%	43,03%	36,20%	37,72%	34,55%	17,65%	19,06%	30,04%	10,61%
9,87	52,39%	55,99%	55,58%	51,93%	50,58%	51,93%	43,44%	44,44%	44,44%	37,25%	38,17%	35,96%	19,07%	22,15%	31,58%	11,93%
11,11	54,30%	56,23%	65,79%	52,51%	51,20%	63,69%	44,27%	45,42%	45,42%	52,38%	39,13%	36,39%	40,42%	25,11%	49,92%	12,17%

Závěr

Vylepšený přístroj měl znatelně menší tření, v tomto ohledu byly výsledky přesnější oproti minulému měření. Nepřesnosti ale pravděpodobně do měření přineslo příliš mnoho zatěžovacích fází. Mezi první a poslední fází zatěžování uběhlo přibližně 5 minut, tudíž výsledky měřené při 7. fázi pravděpodobně neodpovídají pevnosti betonu při čase deklarovaném 5 minut před měřením, u takto čerstvé směsi totiž relativně rychle narůstá pevnost s časem.

Ověření zatížení

V dalších zkouškách by bylo vhodné přiblížit se reálnému zatížení působícímu při 3D tisku. Pokud odhadneme tiskovou hlavu o průměru 50 mm, pak při uvažování její objemové hmotnosti 2200 kg/m^3 dosáhne kontaktní napětí pod jednou vrstvou přibližně 1,1 kPa. Do dalších zkoušek proto navrhuji snížit kontaktní napětí tak, aby se přiblížilo tíze jedné vrstvy tisku, tedy přibližně 1 kPa. K tomu je nutné zásadně upravit přístroj, protože stávající konstrukce neumožňuje upravit zatížení 1. fáze vzhledem k tomu, že se jedná o vlastní tíhu zatěžovací desky.

10.4 Zápis z měření 10.7.2019

Cíl zkoušky

Dlouhodobým cílem je získat parametry čerstvé betonové směsi tak, aby se dalo predikovat chování čerstvého betonu při 3D tisku betonových konstrukcí. Sledovanými parametry jsou napětí, čas a deformace.

Popis měřícího přístroje

Měřící přístroj se skládá z ocelové desky se čtyřmi navařenými trny, které slouží jako vodící osy pro zatěžovací desku. Zatěžovací deska je opatřena kluznými ložisky, aby nedocházelo k natočení. Pro minimalizaci tření byl přístroj důkladně promazán. Během druhé zkoušky byl zjištěn významný vliv tření při zatěžování, proto byl přístroj upraven rozšířením otvorů.

Popis zkoumaného vzorku

Zatěžované vzorky jsou válcového tvaru, toho je dosaženo pomocí plastové formy. Vnitřní průměr formy je 71 mm, výška formy je také 71 mm.

Složení zkoušeného betonu

	Specifikace	Dávka na 1 m³ betonu
Cement	42,5 R Mokrý	
Voda		
Kamenivo	0/4	
Kamenivo	4/8	
Metakaolin	ČLUZ – Mefisto L05	
Urychlovač tuhnutí	Stachema Betodur A1	

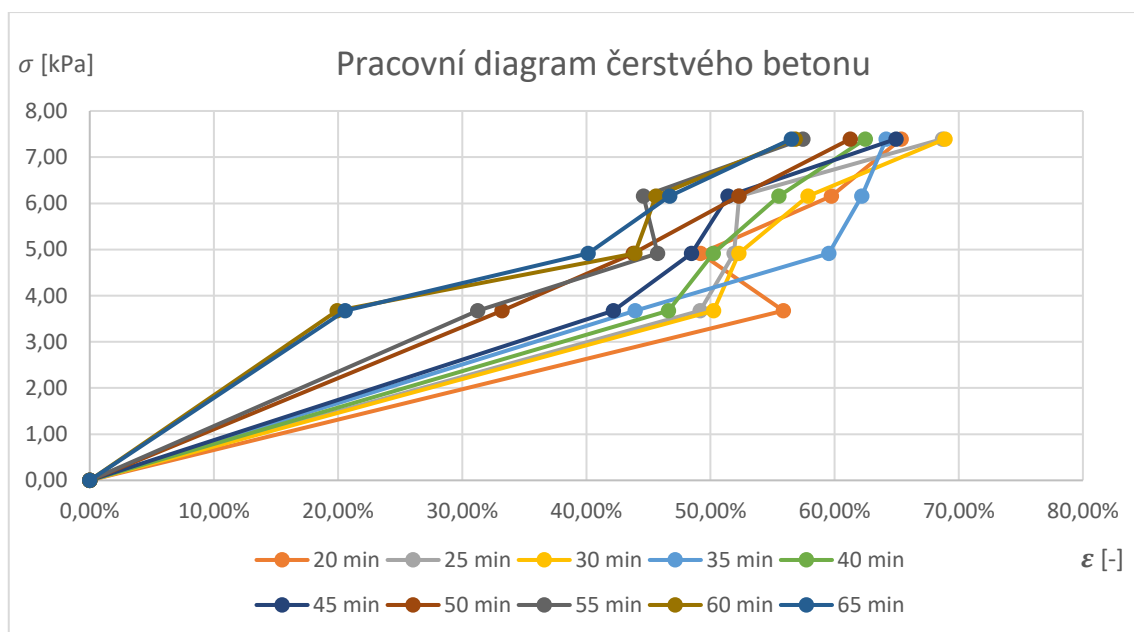
Postup zkoušky

Po navážení všech složek betonu bylo započato míchání nejprve suchých složek. Následně byla přidána voda, v tu chvíli začalo tuhnutí betonu. Po uplynutí určité doby se čerstvým betonem naplnila plastová forma, ta byla vymazána olejem pro lepší vyjmutí vzorku. V tu chvíli byla osazena zatěžovací deska tak, aby se spodní plochou dotýkala vzorku. Posuvným měřítkem se změřila výška po všech 4 stranách. Poté byla spuštěna zatěžovací deska a posuvným měřítkem byla změřena výška deformovaného vzorku. Oproti minulé zkoušce byl při každém zatěžování vzorek zatížen pouze jednofázově, tudíž změřená hodnota deformace přesně odpovídala času, pro který byl měřen. Pro zatížení jinou tíhou byla vždy namíchána nová várka betonu.

Zatěžování	m [g]	[kPa]
1. fáze	1483,82	3,68
2. fáze	1983,82	4,92
3. fáze	2483,82	6,15
4. fáze	2983,82	7,39

Výsledky zkoušky

Poměrná deformace prvku [mm]										
Napětí [kPa]	Čas [min]									
	20 min	25 min	30 min	35 min	40 min	45 min	50 min	55 min	60 min	65 min
0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
3,68	55,86%	49,15%	50,25%	43,94%	46,62%	42,17%	33,21%	31,24%	19,93%	20,56%
4,92	49,20%	51,89%	52,28%	59,52%	50,21%	48,46%	43,79%	45,75%	43,92%	40,14%
6,15	59,75%	52,32%	57,85%	62,18%	55,52%	51,41%	52,30%	44,61%	45,62%	46,70%
7,39	65,37%	68,69%	68,89%	64,15%	62,48%	64,94%	61,27%	57,45%	56,82%	56,52%



Závěr

Výsledky ze zkoušky byly mnohem přesnější, protože během jednoho zatěžování bylo měřeno zatížení jen pro jednu tíhu. Zároveň byl stanoven rozstup měření na pětiminutové intervaly, díky čemuž vznikají podrobnější výsledky.

Podobně jako při měření 12.6.2019 byl ověřen vliv tření, ten způsoboval odchylku průměrně 6 %, snížení tření by se mohlo dosáhnout už jen změnou konstrukce zatěžovacího přístroje.

Oproti minulému měření docházelo k větším deformacím. To mohlo být způsobeno lepším promazáním přístroje. Dalším důvodem mohlo být lehce odlišné kamenivo dodané do laboratoře. Příčinou větších deformací mohl být také jiný postup měření, kdy vzorek při zatěžování byl vždy čerstvý, navíc byla směs před zatěžováním vždy promíchána. Do dalších měření lze odlišnosti v deformacích eliminovat sjednocením a zpřesněním pracovního postupu.

10.5 Zápis z měření 24.9.2019

Cíl zkoušky

Dlouhodobým cílem je získat parametry čerstvé betonové směsi tak, aby se dalo predikovat chování čerstvého betonu při 3D tisku betonových konstrukcí. Sledovanými parametry je čas a deformace. Cílem této zkoušky je mimo získání dalších výsledků ověření nového přístroje.

Popis měřícího přístroje

Měřící přístroj se skládá z ocelové desky se čtyřmi navařenými trny, na těch je upevněná další ocelová deska s navařenou trubkou o vnějším průměru 89 mm a výšce 150 mm. Ocelová trubka slouží jako vodící pro plastovou nádobu, která slouží jako zatěžovací břemeno.

Samotná zatěžovací nádoba váží 457 g, díky čemuž je sníženo kontaktní napětí pro 1. zatěžovací fázi. Do dalších zatěžovacích fází může být zatěžovací nádoba přitížena vodou podle potřeby, protože je vodotěsná. V průměru je trubka o cca 10 mm menší než vodící ocelová trubka, proto nedochází k téměř žádnému tření a výsledky jsou v tomto ohledu relevantní.

Zatěžovací trubka je opatřena milimetrovou stupnicí, díky které lze poměrně přesně odečítat deformace vzorku.

Popis zkoumaného vzorku

Zatěžované vzorky jsou válcového tvaru, toho je dosaženo pomocí plastové formy. Vnitřní průměr formy je 71 mm, výška formy je také 71 mm.

Složení zkoušeného betonu

	Specifikace	Dávka na 1 m ³ betonu
Cement	42,5 R Mokrý	
Voda		
Kamenivo	0/4	
Kamenivo	4/8	
Metakaolin	ČLUZ – Mefisto L05	
Urychlovač tuhnutí	Stachema Betodur A1	

Postup zkoušky

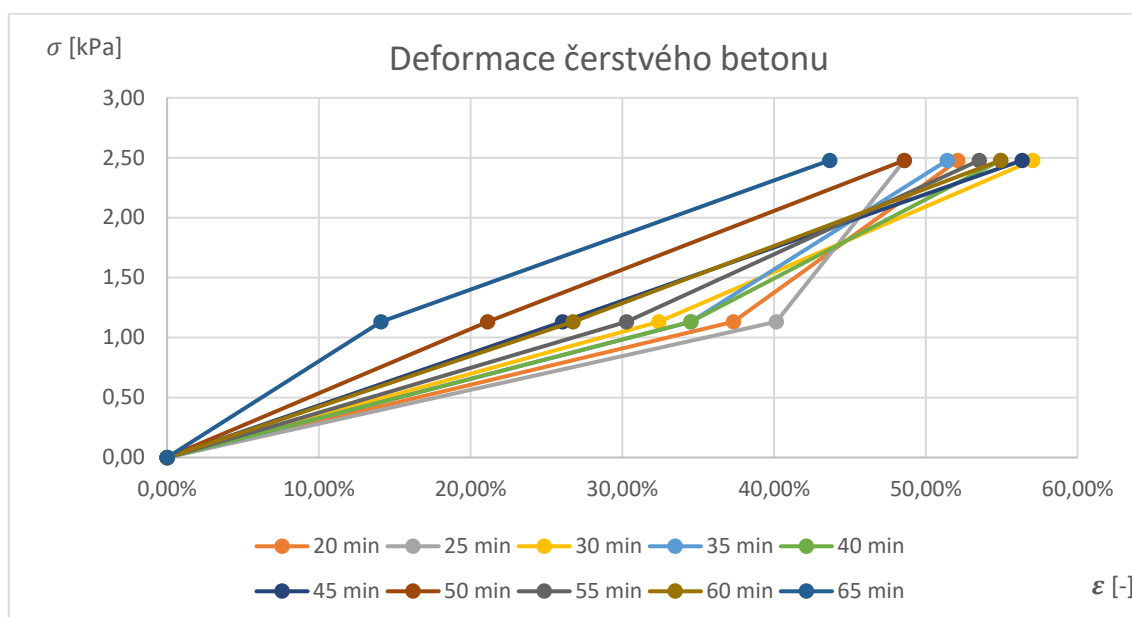
Po navážení všech složek betonu bylo započato míchání nejprve suchých složek. Následně byla přidána voda, v tu chvíli začalo tuhnutí betonu. Po uplynutí určité doby se čerstvým betonem naplnila plastová forma, ta byla vymazána olejem pro lepší vyjmutí vzorku. V tu chvíli byla spuštěna zatěžovací trubka tak, aby se spodní plochou dotýkala vzorku. Na milimetrové stupnici se odečetla počáteční hodnota. Po zatížení trubkou se ze stupnice odečte hodnota při přitížení, vzájemným odečtením dostaneme délku deformace.

Zatěžování	m [g]	[kPa]
1. fáze	457	1,13
2. fáze	1000	2,48

Takto se zkouška opakovala v časových intervalech po 10 minutách až do 65. minuty tuhnutí, po této době už beton nemá zpracovatelnost vhodnou k 3D tisku.

Výsledky zkoušky

Poměrná deformace prvku [mm]										
Napětí [kPa]	Čas [min]									
	20 min	25 min	30 min	35 min	40 min	45 min	50 min	55 min	60 min	65 min
0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
1,13	37,32%	40,14%	32,39%	34,51%	34,51%	26,06%	21,13%	30,28%	26,76%	14,08%
2,48	52,11%	48,59%	57,04%	51,41%	54,93%	56,34%	48,59%	53,52%	54,93%	43,66%



Závěr

Lze se domnívat, že výsledky měření z aktuální verze přístroje jsou nejrelevantnější. 1. fáze zatížení je při mnohem nižším kontaktním napětí než při minulých měřeních, což lépe koresponduje s napětím při 3D tisku konstrukcí. Další výhodou je eliminace tření. Do dalších zkoušek se tak můžeme věnovat sběru dat pro zpřesnění pracovních diagramů.

10.6 Zápis z měření 22.11.2019

Cíl zkoušky

Dlouhodobým cílem je získat parametry čerstvé betonové směsi tak, aby se dalo predikovat chování čerstvého betonu při 3D tisku betonových konstrukcí. Sledovanými parametry jsou napětí, čas a deformace. Cílem této zkoušky je rozšíření sbírky dat.

Popis měřícího přístroje

Měřící přístroj se skládá z ocelové desky se čtyřmi navařenými trny, na těch je upevněná další ocelová deska s navařenou trubkou o vnějším průměru 89 mm a výšce 150 mm. Ocelová trubka slouží jako vodící pro plastovou nádobu, která slouží jako zatěžovací břemeno.

Zatěžovací trubka je opatřena milimetrovou stupnicí, díky které lze poměrně přesně odečítat deformace vzorku.

Popis zkoumaného vzorku

Zatěžované vzorky jsou válcového tvaru, toho je dosaženo pomocí plastové formy. Vnitřní průměr formy je 71 mm, výška formy je také 71 mm.

Složení zkoušeného betonu

	Specifikace	Dávka na 1 m³ betonu
Cement	42,5 R Mokrý	
Voda		
Kamenivo	0/4	
Kamenivo	4/8	
Metakaolin	ČLUZ – Mefisto L05	
Urychlovač tuhnutí	Stachema Betodur A1	

Postup zkoušky

Po navážení všech složek betonu bylo započato míchání nejprve suchých složek. Následně byla přidána voda, v tu chvíli začalo tuhnutí betonu. Po uplynutí určité doby se čerstvým betonem naplnila plastová forma, ta byla vymazána olejem pro lepší vyjmutí vzorku. V tu chvíli byla spuštěna zatěžovací trubka tak, aby se spodní plochou dotýkala vzorku. Na milimetrové stupnici se odečetla počáteční hodnota. Po zatížení trubkou se ze stupnice odečte hodnota při přitížení, vzájemným odečtením dostaneme délku deformace.

Zatěžování probíhalo dvěma způsoby, první způsob je zatěžování jednorázovým zatížením, kdy je vzorek zatížen pouze jednou hodnotou zatížení a pro další zatížení je vyroben nový vzorek. Druhým způsobem je zatěžování postupným přitěžováním, kdy na jednom vzorku proběhne celá série zatížení.

U jednorázového zatěžování probíhalo měření v pětiminutových intervalech od 20. minuty od smíchání směsi až do 65. minuty od smíchání směsi. Zatěžování probíhalo pro 2 hodnoty zatížení:

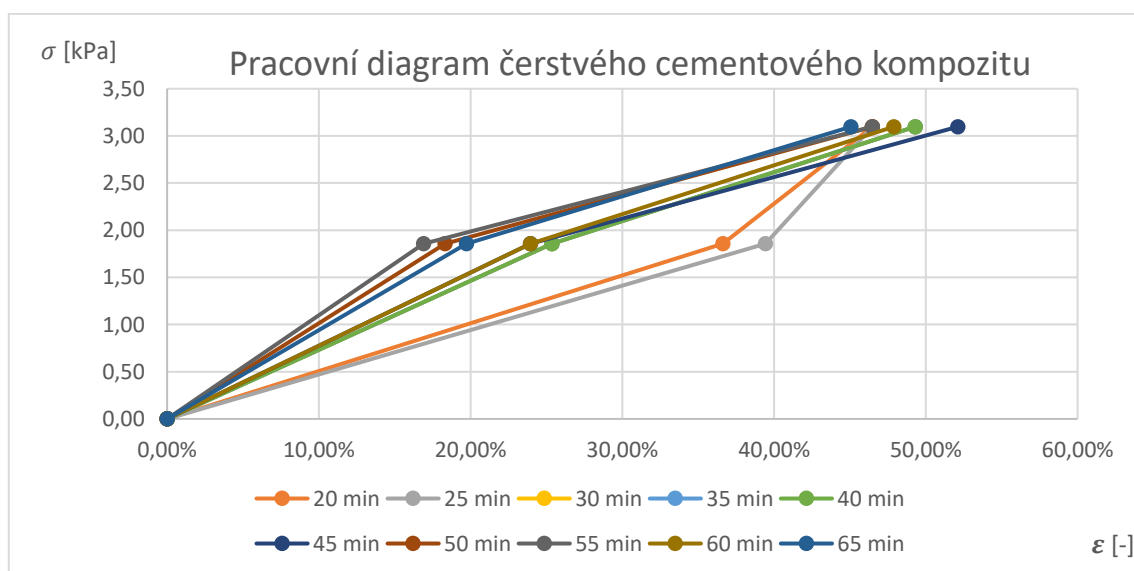
Zatěžování	m [g]	[kPa]
1. fáze	750	1,86
2. fáze	1250	3,10

Poté došlo k zatěžování druhou metodou, tedy postupným přitěžováním. I to probíhalo od 20. do 65. minuty od smíchání cementového kompozitu v intervalech dlouhých 5 minut. Série zatížení obsahovala 5 fází:

Zatěžování	m [g]	[kPa]
1. fáze	460,35	1,14
2. fáze	752,3	1,86
3. fáze	1002,8	2,48
4. fáze	1253,3	3,11
5. fáze	1753,3	4,34

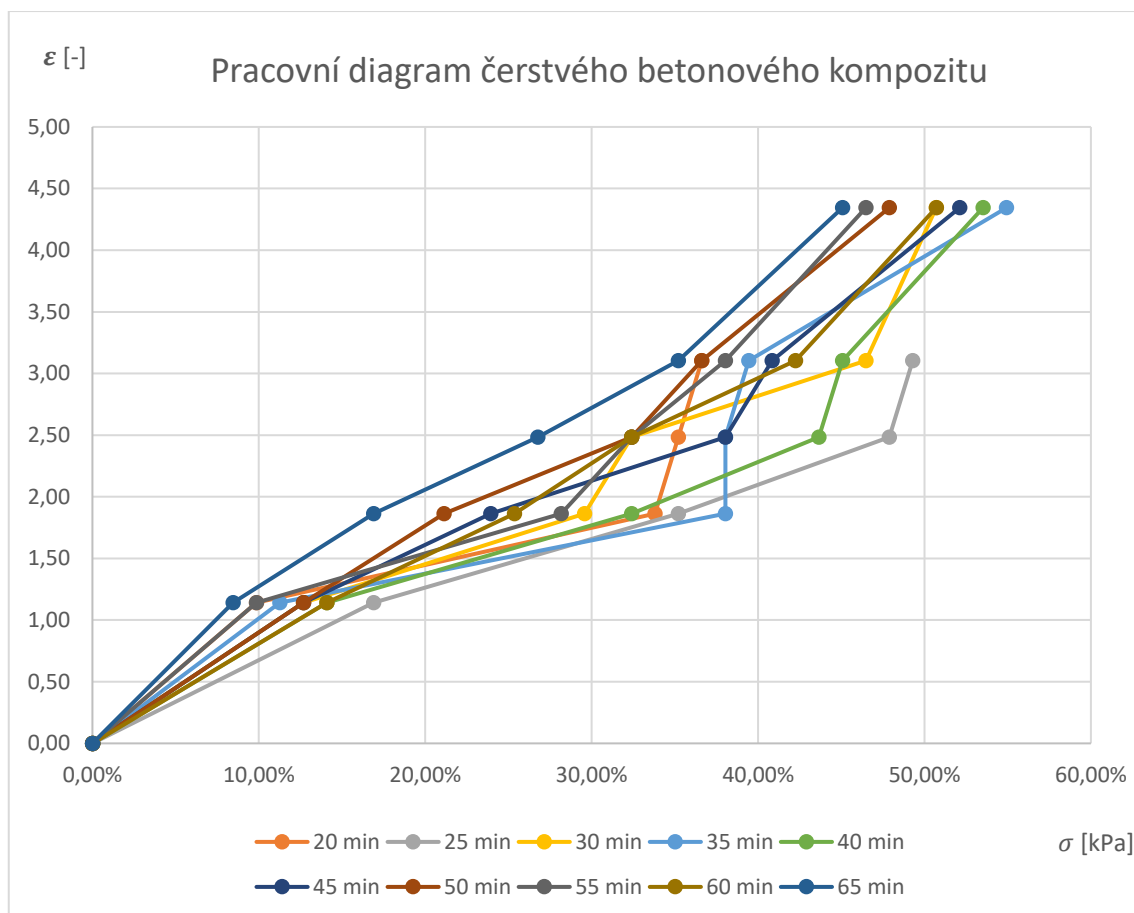
Výsledky zkoušky jednorázovým zatěžováním

Poměrná deformace prvku [mm]											
Napětí [kPa]	Čas [min]										
	20 min	25 min	30 min	35 min	40 min	45 min	50 min	55 min	60 min	65 min	
0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
1,86	36,62%	39,44%	25,35%	25,35%	25,35%	23,94%	18,31%	16,90%	23,94%	19,72%	
3,10	46,48%	46,48%	49,30%	49,30%	49,30%	52,11%	46,48%	46,48%	47,89%	45,07%	



Výsledky zkoušky postupným přitěžováním

Poměrná deformace prvku [mm]											
Napětí [kPa]	Čas [min]	20 min	25 min	30 min	35 min	40 min	45 min	50 min	55 min	60 min	65 min
0		0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
1,14		9,86%	16,90%	12,68%	11,27%	14,08%	12,68%	12,68%	9,86%	14,08%	8,45%
1,86		33,80%	35,21%	29,58%	38,03%	32,39%	23,94%	21,13%	28,17%	25,35%	16,90%
2,48		35,21%	47,89%	32,39%	38,03%	43,66%	38,03%	32,39%	32,39%	32,39%	26,76%
3,11		36,62%	49,30%	46,48%	39,44%	45,07%	40,85%	36,62%	38,03%	42,25%	35,21%
4,34				50,70%	54,93%	53,52%	52,11%	47,89%	46,48%	50,70%	45,07%



Závěr

Vzhledem k velkému množství dat je možné začít data vyhodnocovat a vzájemně porovnávat. Díky obojím metodám měření provedených v jeden den bylo velmi zřetelně pozorovatelné, jak rozdílné jsou metody v časové náročnosti vzhledem k získání dat. Metoda postupného přitěžování umožňuje během krátkého času získat mnohem větší množství dat, ačkoliv jsou zatíženy chybou. Relevance těchto dat bude posouzena v diplomové práci.