

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta stavební
Katedra betonových a zděných konstrukcí



Vyztužené betonové prvky realizované 3D tiskem

Bakalářská práce

Jan Přívětivý

Vedoucí práce: doc. Ing. Jitka Vašková, CSc.

Konzultant: Ing. Josef Novák, Ph.D.

Praha, 2019





ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE


Příjmení: <u>Průvčtívý</u>	Jméno: <u>Jan</u>	Osobní číslo: <u>458909</u>
Zadávací katedra: <u>(K133) Katedra betonových a zděných konstrukcí</u>		
Studijní program: <u>(B3651) Stavební inženýrství</u>		
Studijní obor: <u>(3608R008) Konstrukce pozemních staveb</u>		

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: <u>Vyztužené betonové prvky realizované 3D tiskem</u>	
Název bakalářské práce anglicky: <u>3D Printed Concrete Elements with Reinforcement</u>	
Pokyny pro vypracování: Souhrn poznatků z literatury - typy vyztužení, provádění, statické působení betonových prvků zhotovených 3D tiskem Analýza realizace a statického působení vybraného prvku	
Seznam doporučené literatury: Dle konzultací	
Jméno vedoucího bakalářské práce: <u>doc. Ing. Jitka Vašková, CSc.</u>	
Datum zadání bakalářské práce: <u>21.2.2019</u>	Termín odevzdání bakalářské práce: <u>26.5.2019</u> <i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>
 Podpis vedoucího práce	 Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské 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“.

<u>20/2/19</u> Datum převzetí zadání	 Podpis studenta(ky)
---	--

Prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil pouze uvedené podklady.

Nemám závažný důvod nesouhlasit s použitím této školní práce ve smyslu §60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze, 2019

.....
Jan Přívětivý

Poděkování

Rád bych poděkoval doc. Ing. Jitce Vaškové, CSc. za vedení práce a vstřícný přístup. Za řadu rad, podnětů a připomínek, patří velký dík rovněž Ing. Josefu Novákovi, Ph.D., konzultantovi této práce.

Jan Přívětivý

Název práce: **Vyztužené betonové prvky realizované 3D tiskem**

Autor: Jan Přívětivý

Obor: Konstrukce pozemních staveb

Druh práce: Bakalářská práce

Vedoucí práce: doc. Ing. Jitka Vašková, CSc.

Konzultant: Ing. Josef Novák, Ph.D.

Abstrakt:

Práce je věnována aplikaci 3D tisku cementových kompozitů ve stavebnictví. V rámci tématu se úzce zaměřuje na možnosti vyztužování takto zhotovených prvků. Součástí práce je též návrh vyztuženého ohýbaného prvku - překladu.

Cílem je seznámení s inovativními možnostmi vyztužování betonových prvků realizovaných 3D tiskem a následná diskuze o kvalitě provedení, účinnosti a omezení. 3D tisk betonu má potenciál změnit dosavadní proces návrhu a realizace budov. Směřuje ke kompletní automatizaci výstavby umožňující rychlejší, jednodušší a méně nákladné řešení komplexních tvarů konstrukcí. Se stále stoupajícím zájmem o tuto novodobou technologii rostou i nároky na únosnost a další vlastnosti. Zatím neexistují normy, které by se zabývaly tematikou vyztužování 3D tisknutých prvků. Přesto byly již navrženy praktické metody vyztužení takto zhotovených konstrukcí.

Klíčová slova: 3D tisk, vyztužení, cementový kompozit

Title: **3D Printed Concrete Elements with Reinforcement**

Author: Jan Přívětivý

Field of study: Department of Concrete and Masonry Structures

Thesis type: Bachelor Thesis

Supervisor: doc. Ing. Jitka Vašková, CSc.

Consultant: Ing. Josef Novák, Ph.D.

Abstract:

The thesis is devoted to the application of 3D printing of cementitious composites in construction industry. Under the theme, it closely focuses on the possibilities of reinforcing such elements.

The aim is to become acquainted with innovative possibilities of reinforcing concrete elements created by 3D printing and further discussion about quality of execution, efficiency and limitations. 3D concrete printing has a potential to change the existing process of designing buildings. It is pointing towards a complete automation of construction process, enabling a quicker, simpler and less expensive solution for complex shaped structures. Demands on bearing capacity and other properties are growing with the increasing interest in this modern technology. There are no written standards yet to discuss the issue of reinforcing 3D elements. Nevertheless, practical methods have already been proposed for the reinforcement of such structures.

Keywords: 3D printing, reinforced, cementitious composite

Obsah

1	3D tisk ve stavebnictví	3
1.1	Posouzení použitelnosti 3D tiskáren	5
1.1.1	Výhody	5
1.1.2	Nevýhody	5
1.2	Technika tisku	6
1.2.1	Vytlačování cementového kompozitu	6
1.2.2	Stmelení kameniva tekutým pojivem	7
1.3	Omezení technologie	8
2	Metody vyztužování	9
2.1	Aplikace externí výztuže pro nosníky	9
2.1.1	Příprava tisku a výztuže	9
2.1.2	Popis experimentu	11
2.1.3	Shrnutí a diskuze	19
2.2	Tisknutý vláknobeton	21
2.2.1	Použití vláken u 3D-tisknutých kompozitů	21
2.2.2	Porovnání skleněných, čedičových a karbonových vláken z hlediska mechanických vlastností	22
2.2.3	Shrnutí a diskuze	27
2.3	„Obalování“ výztuže tisknutými kompozity	28

2.3.1	Smart Dynamic Casting	28
2.3.2	Sparse Concrete Reinforcement in Meshworks	31
2.3.3	Shrnutí a diskuze	36
2.4	Výroba bednění pomocí 3D tisku	38
2.4.1	Bednění z cementových kompozitů	38
2.4.2	Mesh Mould	40
2.4.3	Shrnutí a diskuze	42
2.5	Pokládání kabelové výztuže při tisku	44
2.5.1	Odtrhová zkouška	45
2.5.2	Čtyřbodová zkouška ohybem	46
2.5.3	Shrnutí a diskuze	48
3	Metoda „koráلكových“ nosníků a její začlenění do konstrukce	51
3.1	Atypická konstrukce jednopodlažního domu	53
3.1.1	Podnět k dalšímu výzkumu	55

Seznam obrázků

1.1	Příklady 3D tisku vytlačováním cementového kompozitu	7
1.2	Příklady 3D tisku stmelení kameniva tekutým pojivem	8
2.1	Popis os a rozdělení nosníku na segmenty u metody aplikace externí výztuže	10
2.2	Uložení výztuže nosníku	10
2.3	Schéma přímého nosníku	13
2.4	Schéma dílců přímého nosníku.	13
2.5	Vyznačení snímačů napětí a ohybu konstrukce rovného nosníku u metody externího vyztužování	14
2.6	Finální konfigurace přímého nosníku před tříbodovou zkouškou ohybem u metody externího vyztužování	15
2.7	Graf závislosti zatížení na průhybu namáhaného nosníku u me- tody externího vyztužování	16
2.8	Znázornění trhlin na segmentech nosníku vznikajících vlivem rostoucího zatížení u metody externího vyztužování	16
2.9	Graf závislosti tahového napětí na průhybu ve výztuži u metody externího vyztužování	17
2.10	Graf porovnání nosníků z hlediska průhybu a působícího zatížení v lineárně-elastické fázi u metody externího vyztužování	18
2.11	Schéma oblého nosníku u metody externího vyztužování	19

2.12	Dům od firmy WinSun a lávka v Madridu	22
2.13	Přehled prvků a jejich trasování pro experiment s tisknutým vláknobetonem	24
2.14	Graf závislosti napětí/deformace u prvků vytvořených tra- sováním A a B u tisknutého vláknobetonu	25
2.15	Konstrukce pro tisk pomocí SDC	29
2.16	Flexibilní bednění u metody SDC - lokální. Ukázka umístění akčních členů	30
2.17	Flexibilní bednění u metody SDC - globální	31
2.18	Příprava síťoviny na metodu SCRIM pro první experiment . . .	33
2.19	Výsledek prvního experimentu provedeného metodou SCRIM . .	34
2.20	Příprava síťoviny na metodu SCRIM pro druhý experiment. . .	35
2.21	Výsledek druhého experimentu provedeného metodou SCRIM .	36
2.22	Příklady 3D tisku bednění	39
2.23	Systém podepření stěnových prvků	40
2.24	Výztužná síťovina metody Mesh Mould	41
2.25	Postupné vlévání cementového kompozitu a manuální uhla- zování stran prvku u metody Mesh Mould	41
2.26	Sloupcový graf výsledků odtrhové zkoušky u metody pokládání kabelové výztuže při tisku	45
2.27	Schéma čtyřbodové ohybové zkoušky u metody pokládání kabe- lové výztuže při tisku	47
2.28	Graf závislosti zatížení na průhybu u metody pokládání kabe- lové výztuže při tisku	48
3.1	Postup výroby „korálkového“ nosníku	52
3.2	Schéma půdorysu a pohledu navrženého jednopodlažního domu.	53
3.3	Postup výroby stěn metodou bednění z cementových kompozitů	54
3.4	Schéma tisknuté stěny s vnitřní strukturou	54

Seznam tabulek

2.1	Funkce prvků externě vyztuženého nosníku	12
2.2	Charakteristické vlastnosti vláken pro vláknobeton. [11]	23
2.3	Tabulka výsledných průměrných pevností v tlaku [MPa] pěti vzorků (každého typu vláken) tisknutého vláknobetonu. [11] . . .	26

Úvod

Práce je zaměřena na aplikaci 3D tisku ve stavebním průmyslu a úzce se zaměřuje na vyztužování takto zhotovených prvků. Cílem je shrnutí dosavadních poznatků o vyztužování 3D-tisknutých konstrukcí. Práce by mohla v budoucnu přispět u vývoje nových metod vyztužování.

V úvodní části bakalářské práce je krátce vysvětlena současná role 3D tisku ve stavebnictví a jeho současné a možné budoucí aplikace. Jsou zmíněny výhody a nevýhody realizace této metody a postupně vysvětleny základní postupy tisku konstrukcí. V rámci zmiňovaných překážek začlenění 3D tisku cementových kompozitů do stavebního průmyslu je zmíněno vyztužování takto zhotovených prvků. Právě tato problematika je hlavním tématem řešerše v kapitole 2.

Metody vyztužení jsou rozděleny do pěti sekcí v závislosti na principu ukládání výztuže do konstrukce. Kapitola 2.1 pojednává o externím vyztužování nosníků, kde se k aplikaci výztuže používají závitové tyče nebo ohýbané pruty připevněné až po výrobě konstrukce. Kapitola 2.2 se soustředí na vlastnosti a chování tisknutého vláknobetonu. Popisuje možnosti přidávání vláken do cementových kompozitů a vliv trasování na výsledné vlastnosti prvku. V kapitole 2.3 je zmíněna metoda „obalování výztuže“ tisknutými kompozity. Její součástí je popis a zhodnocení metod SDC a SCRIM. Kapitola 2.4 popisuje jednu z metod s největším potenciálem pro brzké užití ve stavebnictví - výroba bednění pomocí 3D tisku. Poslední část druhé kapitoly se

zabývá souběžným tiskem cementového kompozitu a výztuže. K běžné konstrukci 3D tiskárny je v tomto případě připevněna cívka s výztuží, která se odvíjí současně s pohybem hlavice tiskárny.

V poslední kapitole je představena nová metoda vyztužování - „koráلكové“ nosníky. Jejich princip spočívá v jednoduchosti, rychlosti výstavby a možné tvarové rozmanitosti. Metoda je pro demonstraci návrhu aplikována současně se stěnami z tisknutého bednění u jednopodlažní budovy. Na půdorysu je demonstrována uskutečnitelnost komplexních tvarů. Stěny nejsou v této práci přímo navrženy, ale je k nim poskytnut případný postup. Nosník byl po zjednodušení navržen podle ČSN EN 1992 a [1].

Kapitola 1

3D tisk ve stavebnictví

Stavebnictví je jeden z nejstarších a nejrozsáhlejších průmyslů, které v dnešní době aktivně ovlivňují životní styl. Jako jiná odvětví se i stavební průmysl stále pokouší nalézt nové inovativní metody, které by zlepšily celkový stav výstavby a výroby materiálů. Je těžké přijmout nové technologie, protože tradiční konstrukční principy jsou stále velice. Jednou z nich je i 3D tisk. Jeho představení přilákalo pozornost mnoha korporací a studijních institucí, které vynaložili velké úsilí ve zdokonalování samotné technologie a její aplikace při výstavbě. 3D tisk cementových kompozitů je metoda vrstvení materiálu pomocí roboticky ovládaného systému za účelem výroby stavebních prvků nebo celých konstrukcí. Umožňuje velkou volnost ve tvarové rozmanitosti a nabízí rychlejší, přesnější a šetrnější řešení. To jsou jedny z hlavních faktorů, které činí ve stavebnictví problémy. Například neefektivita využití materiálů, časová koordinace, zanedbání kvality v důsledku těžké manuální práce, zvyšující se požadavky na stavby a tlak na cenu jsou překážky, pro které by mohl být 3D tisk odpovědí.

„Od počátku 80. let 20. století začalo vlivem rozvoje informačních technologií a přejímáním progresivních řešení z jiných oborů, zvláště ze strojírenství, docházet ve stavebnictví k postupnému přechodu ze stávajících ručních

způsobů zpracování projektů na systémy využívající počítače. Tato změna nastala nejprve v oblasti návrhu a přípravy staveb, která byla postupně digitalizována masivním rozšířením technologií počítačového navrhování v čele s CAD programy a po roce 2002 i nástupem technologie BIM (Building Information Modelling) neboli informačního modelování staveb, což je proces vytváření, užití a správy dat o stavbě během jejího životního cyklu. Jeho výsledkem je komplexní virtuální databáze informací o budově (informační model budovy) obsahující kromě tří-dimenzionálních geometrických charakteristik také negeometrické informace o fyzikálních, statických, tepelně-technických, ekonomických i technologických vlastnostech objektů, tj. materiálů, prvků, konstrukcí i celých staveb, v databázi obsažených.“[2] Postupným přechodem k digitalizaci ve stavebnictví se začaly začleňovat nejen metody navrhování, ale i výroby. Nejprve začal pronikat 3D tisk do oblasti architektury, kde sloužil k rychlé výrobě plastových modelů pro demonstrace zakázek klientům. Dále je možné vidět aplikaci u kompletačních konstrukcí. Příkladem je tisk styčnicků fasád nebo obkladových a pohledových panelů, dále výroba interiérových doplňků nebo součástí systémů technického zařízení budov. U komerční výroby prvků a konstrukcí z cementového kompozitu je 3D tisk pouze ve fázi experimentální. Výjimkou jsou firmy jako Contour Crafting, Behrokhem Khoshnevisem, Winsun, CyBen nebo Apis-Cor, které v technologii vidí velký potenciál a v důsledku toho vynakládají velké úsilí v začleňování 3D tisku do stavebního průmyslu.

1.1 Posouzení použitelnosti 3D tiskáren

3D tisk ve stavebnictví má mnoho potenciálních výhod, které přejímá hlavně z původních technologií tisku polymerních materiálů. Bohužel při aplikaci ve výstavbě se potýká s mnoha překážkami. S těmi se zatím není možné zcela vypořádat, ale nadále se pracuje na nových možnostech zdokonalování této technologie ve stavebnictví.

1.1.1 Výhody

- Tvarová rozmanitost - existuje větší svoboda ve tvarové definici prvku omezená pouze nároky materiálu a tiskárny.
- Rychlost - automatizací se rapidně snižuje interval výroby konstrukcí.
- Spotřeba materiálu - při výrobě se spotřebuje menší množství materiálu při stejné účinnosti. Nevzniká téměř žádný zbytkový materiál.
- Eliminace bednění - bednění je jedna z velkých cenových položek při stavbě a její eliminací se snižuje cena výstavby.
- Méně lidské pracovní síly - při automatizaci se snižuje i množství potřebné lidské pracovní síly, což může vést k menšímu počtu chyb a dokonalejší výstavbě.
- Jednoduchost - v dnešní době je 3D digitální modelování relativně běžné a navrhování 3D prvků je čím dál tím jednodušší.

1.1.2 Nevýhody

- Cena - pro získání stejných mechanických vlastností jako u klasických konstrukcí je nutné použít dražší materiály.

- Vyztužení - vyztužení je běžnou formou zlepšování nosnosti a dalších vlastností prvků a jeho aplikace u 3D tisku je zatím nedořešená (podrobně v kapitole 2).
- Použitelnost - úzce souvisí s vyztužením. Zatím se 3D tisk nedá využít u prvků, které jsou vystaveny velkému zatížení.
- Manipulace - bude složité se se strojem dostat do některých míst na stavbě.
- Sklon - pomocí 3D tiskáren není téměř možné vytvořit nosnou konstrukci se sklonem.
- Stabilita při tisku - borcení konstrukcí při vrstvení materiálu je běžný problém (blíže popsáno v kapitole 2.4.1)

1.2 Technika tisku

V současné době je nejvíce používána metoda plynulého vytlačování cementového kompozitu. Ale není to jediný dostupný princip výroby. Například existuje metoda stmelení jemnozrnného kameniva pomocí tekutého pojiva a nebo kombinace obou zmíněných metod popsaná v projektu fakulty architektury UCL v Londýně [3].

1.2.1 Vytlačování cementového kompozitu

Tato nejběžnější metoda 3D tisku ve stavebnictví je obdobou tavného nanášení, tedy metody 3D tisku polymerů. Spočívá v postupném vrstvení materiálu až po dosažení požadované výšky. Cementový filament je vytlačován v místě hlavice tiskárny pomocí řízené tlakové pumpy. Samotný materiál je předem namíchán v nádrži a skládá se zejména z cementu, jemného kameniva a dalších aditiv



(a) Stěnový prvek vytvořený pomocí vytlačování cementového kompozitu [4]



(b) Jednopatrový dům vytisknutý metodou vytlačování cementového kompozitu [5]

Obr. 1.1: Příklady 3D tisku vytlačováním cementového kompozitu

pro zlepšení jeho mechanických vlastností. Klade se velký důraz na únosnost a soudržnost vrstev. Cementový kompozit musí být dostatečně čerstvý, aby plynule navázal na předchozí vrstvu a zároveň dostatečně pevný, aby nedocházelo k deformaci vrstev pod vlastní tíhou a tíhou vrstev horních. Tyto faktory se dají ovlivnit řízeným urychlováním tuhnutí a nastavením trasování a rychlosti tisku. Příklad takto vyrobených prvků je k dispozici na Obr. 1.1.

1.2.2 Stmelení kameniva tekutým pojivem

Technologie, známá také jako Binder Jet 3D Printing, spočívá v tmelení menší vrstvy jemného kameniva za pomoci tekutého pojiva (cement, pryskyřice) nanášeného tryskovou hlavicí tiskárny. Celý proces se odehrává v uzavřené tisknouce komoře a začíná nanášením vrstvy jemného agregátu do výšky několika milimetrů. V dalším kroku dojde k vyplnění půdorysné plochy první vrstvy pojivem nanášeným tryskovou hlavicí. Tento proces se opakuje až do úplného dokončení prvku. Kamenivo, které není zaneseno pojivem, slouží jako podpora pro vrstvený materiál při tuhnutí. Po zatvrdnutí pojiva je přebytečný agregát mechanicky odstraněn. Nakonec v komoře zůstane pouze výsledný prvek.

Výhodou metody je preciznost a tvarová neomezenost. Vytváření vrstev tloušťky několika milimetrů vede k detailnímu provedení výsledné konstrukce.



(a) Příklad možných sklonů konstrukce u metody stmelení kameniva [6]



(b) Ukázka detailní konstrukce u metody stmelení kameniva [7]

Obr. 1.2: Příklady 3D tisku stmelení kameniva tekutým pojivem

S tím ale přichází snížení rychlosti tisku a soudržnosti vrstev. Také je možný tisk velkých sklonů (oproti metodě vytlačování), jelikož během procesu výroby je prvek uměle podepřen nepoužitým kamenivem. Tiskovou komorou je omezena velikost prvku a neumožňuje aplikaci metody in situ. Příklad takto vytvořených prvků je k dispozici na Obr. 1.2.

1.3 Omezení technologie

V posledních 20ti letech procházela technologie tisku cementových kompozitů velkým rozvojem. Přesto zatím není schopná konkurovat tradičním metodám výroby. Důvodem jsou všechny výše zmíněné nevýhody. Stále probíhají nové výzkumy a experimenty pokoušející se překážky překročit. Jako jeden z hlavních problémů bude představeno vyztužování prvků zhotovených 3D tiskem. Kapitola 2 obsahuje souhrn dostupným metod vyztužování, jejich popis a možnosti aplikace.

Kapitola 2

Metody vyztužování

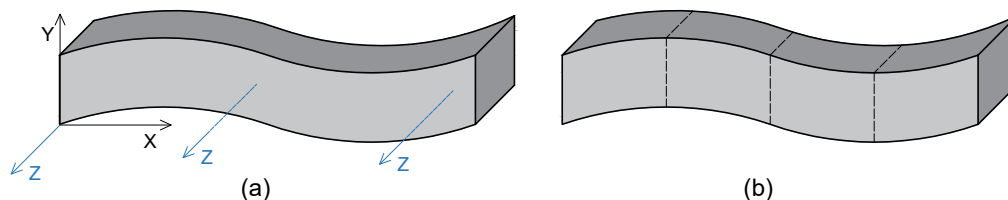
2.1 Aplikace externí výztuže pro nosníky

Samotná práce s výztuží značně omezuje možnosti výroby vyztužených prvků s komplexním tvarem realizovaných 3D tiskem. Aplikace externí výztuže může v budoucnu s řešením těchto omezení pomoci. S touto metodou výztuž nějak neovlivňuje chování ani neomezuje možnosti tvarování betonu během výroby. Metoda umožňuje produkci složitějších tvarů s menší hmotností a stejnou funkčností.

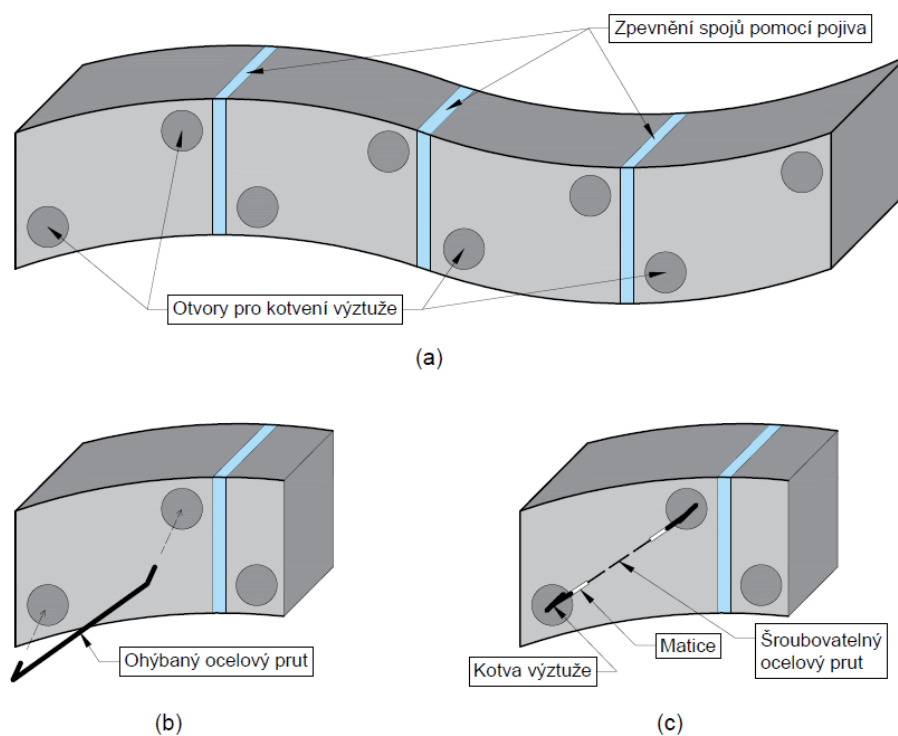
2.1.1 Příprava tisku a výztuže

Metoda externího vyztužování nosníků spočívá v rozložení prvku na dílčí segmenty (Obr. 2.1 b). Každý dílec se tiskne ve směru šířky nosníku, tedy ve směru kolmém k 2D (x-y) rovině nosníku (Obr. 2.1 a). Tímto způsobem je možné vyvářet průřezy neobvyklých tvarů (symetrických ve směru vrstvení materiálu) bez větších nároků na vlastnosti samotného materiálu a tiskárny. Klade se mnohem menší důraz na viskozitu kompozitu, tloušťku vrstev, tlak při vytlačování materiálu a rychlost tisku. Jakmile je definován požadovaný

počet segmentů, který většinou závisí spíše na možnostech tiskárny, je nutné vymodelovat samotný tvar průřezu. Ten závisí na vnitřních silách působících na nosník a na požadavcích na kotvení externí výztuže.



Obr. 2.1: a - pohled na nosník s popisem os a naznačením směru tisku (osa z); b - simulace rozdělení nosníku na jednotlivé segmenty. Upraveno ze zdroje [8].



Obr. 2.2: a - znázornění spojů jednotlivých dílců a umístění otvorů pro výztuž; b - usazení ohýbaného prutu; c - uložení kotev výztuže a umístění závitových tyčí. Upraveno ze zdroje [8].

Druhou fází je instalace ocelové výztuže. Dílce jsou spojeny externí výztuží a v místech spojů jsou zpevněny pomocí malty nebo jiného pojiva (Obr. 2.2

a). Výztuž spojuje jednotlivé dílce a zároveň zajišťuje dostatečnou únosnost v tahu. Nabízejí se dvě možnosti. První je použití jednoho prutu, který se ohne na obou koncích a zakotví v předem určených otvorech průřezu (Obr. 2.2 b). Druhou možností je umístění kotev se šroubovatelným zakončením (nebo závitové tyče) do zvolených otvorů (Obr. 2.2 c). Samotné kotvy se poté spojí pomocí rovného ocelového prutu a matic. Výsledek obou postupů by se měl co nejvíce přibližovat působení typického železobetonového nosníku.

Pro popis praktického využití byl vybrán experiment z univerzity v Neapoli a Pavii [8]. Toto téma není předmětem příliš mnoha výzkumů. Následující experiment byl nejobsáhlejší a zahrnuje poznatky vhodné k demonstraci popisované metody.

2.1.2 Popis experimentu

Na univerzitě v Neapoli ve spolupráci s univerzitou v Pavii se pokusili o realizaci metody popsané v kapitole 2.1.1. Byly zvoleny 2 tvary nosníků - přímý a obloukový. Hlavním cílem bylo otestovat soudržnost externě působící výztuže a tisknutých prvků.

K výrobě cementových kompozitů využila univerzita tiskárnu BigDelta WASP, jejíž prostor pro tisk je definován hranolem o výšce 1.5 m se základnou z rovnostranného trojúhelníku o straně 4 m. Připojená nádrž dokáže pojmout až 20 l čerstvého materiálu. K dosažení ideálního prostředí pro tisk je nutné tiskárnu správně zkalibrovat. Důležité je trasování vrstev, výška vrstev a rychlost pojezdu hlavice. Pokud se tyto parametry nastaví správně, bude se při tisku materiál vrstvit rovnoměrně a zachová se předpokládaný tvar prvku. Při experimentu byla po několika zkouškách zvolena rychlost 20 mm/s, což znamenalo přibližně 50 - 90 s pro tvorbu jedné vrstvy o výšce 30 mm.

Z materiálového hlediska je nutné zajistit optimální viskozitu, vysokou pevnost a správnou velikost plniva. Vyšší pevnost kompenzuje oslabení vzni-

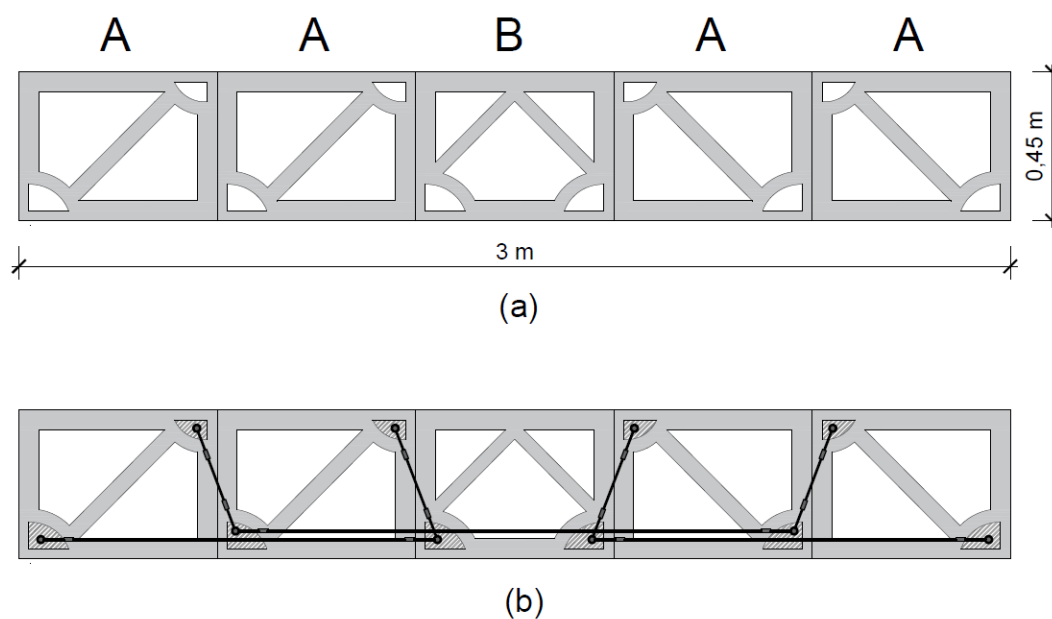
kající na rozhraní dvou vrstev při procesu výroby. Velikost plniva je závislá na průměru trysky. Příliš velký průměr kameniva by mohl zacpat hlavici. Podle těchto parametrů byla zvolena cementová malta s vodním součinitelem $w = 0.39$ a maximálním průměrem kameniva 4 mm. Dále byla do směsi přidána polypropylenová vlákna (0.5 % hmotnosti), která zabraňují raným trhlinám od smršťování. Výsledná válcová pevnost materiálu (po 28 dnech) vycházela na 44,4 MPa (krychelná 53,5 MPa).

Přímý nosník

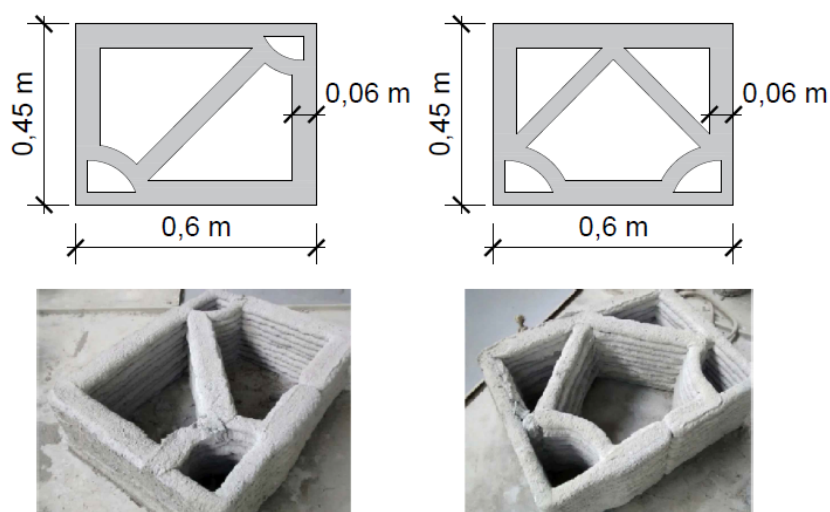
Jako první byl navržen přímý nosník délky 3 m a šířky 0,20 m s konstantní výškou 0,45 m (Obr. 2.4 (a)). Jednoduchý tvar byl zvolen hlavně z důvodu porovnatelnosti s běžně vyráběnými nosníky. Prvek byl rozdělen na 5 segmentů o 2 typech. Typ A (4 dílce) je umístěn z obou stran a je doplněn tlačnými diagonálami. Typ B (1 dílec) je umístěn do středu. Průřezy jsou navrženy tak, aby ušetřily co nejvíce materiálu a zároveň splnily požadavky na předpokládané využití nosníku a na kotvení výztuže. Jeden dílec má délku 0,6 m, šířku stěny 0,06 m a výšku 0,45 m (Obr. 2.3). Výztuž je navržena po celé délce nosníku. Kotevní prvky - nerezové závitové tyče (průměr 16 mm) - jsou upevněny pomocí vysokopevnostní cementové malty do otvorů v průřezu. K nim jsou připevněny ocelové pruty pomocí šestihranných matic ($M 16 \times 60 \text{ mm}^2$) (Obr. 2.3 b). Možnost jednoduché montáže umožňuje opětné použití dílů. Funkce částí nosníku a výztuže je popsána v Tab. 2.1.

působící prvek	funkce
horní pásnice z kompozitu	přenos tlakových sil
ocelová výztuž na spodní pásnici	přenos tahových sil
diagonály z kompozitu	přenos tlakových sil
diagonální ocelová výztuž	přenos tahových sil

Tab. 2.1: Funkce jednotlivých prvků vyztuženého nosníku



Obr. 2.3: a - schéma přímého nosníku a jeho rozdělení na segmenty typu A a B; b - vyztužení nosníku. Upraveno ze zdroje [8]

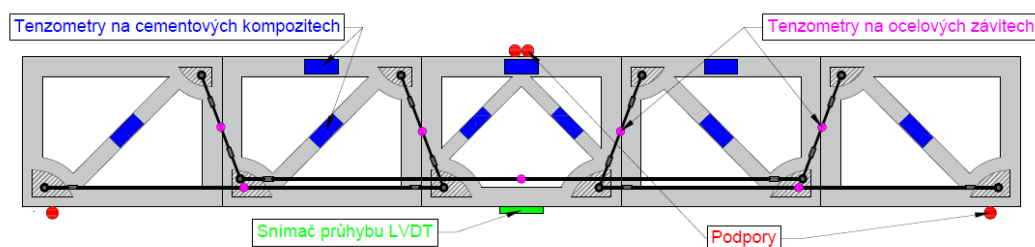


Obr. 2.4: Schéma dílců přímého nosníku. Upraveno ze zdroje [8].

Výsledná tíha nosníku byla 36 kN, což je přibližně 12 kN/m liniového zatížení. Pokud je výsledek srovnán s nosníkem s plným průřezem o stejných rozměrech ($0,2 \times 0,45 \text{ m}^2$), je výsledná tíha redukována o 54 %.

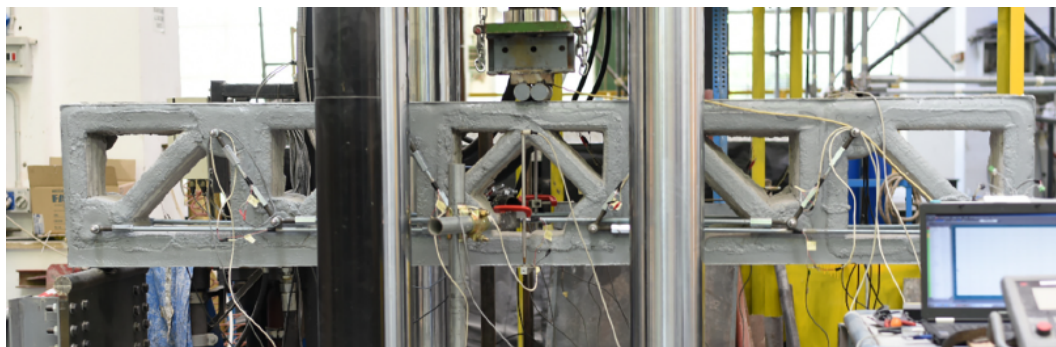
Třibodová zkouška ohybem

Experiment se týkal pouze přímého nosníku se zaměřením na porušení od tahového a tlakového namáhání. Toho je docíleno minimalizováním vlivu smykového namáhání uspořádáním na třibodovou zkoušku ohybem. Zatížení bylo vyvozeno hydraulickým lisem s možností vyvinout sílu až 500 kN. Ke změření potřebných údajů jsou použity snímače umístěné na jednotlivých prvcích nosníku. Hodnoty napětí na nerezových závitových tyčích byly získány pomocí 14 tenzometrů (7 na každé straně) umístěných v polovinách délek prutů (Obr. 2.5 růžově). Ke změření napětí na dílcích z cementového kompozitu slouží 9 tenzometrů umístěných pouze na jedné straně nosníku (Obr. 2.5 modře). Z důvodu správného přilnutí senzorů je tato strana nosníku vyhlazena. Na spodní stranu středového segmentu byl nakonec umístěn snímač průhybu konstrukce LVDT - linear variable differential transformer (Obr. 2.5 zeleně). Finální uspořádání je patrné z Obr. 2.6.



Obr. 2.5: Vyznačení snímačů napětí a ohybu konstrukce rovného nosníku. Upraveno ze zdroje [8].

Pro porovnání byl vytvořen digitální 2D model nosníku v softwaru SAP2000. Takto zjednodušený model (podobající se strut-and-tie modelu nosníku) lze považovat za dostatečně přesný hlavně z důvodu symetrie dílců a výztuže. Pomocí metody konečných prvků byly následně spočteny požadované hodnoty (obdobné jako v reálném případě).



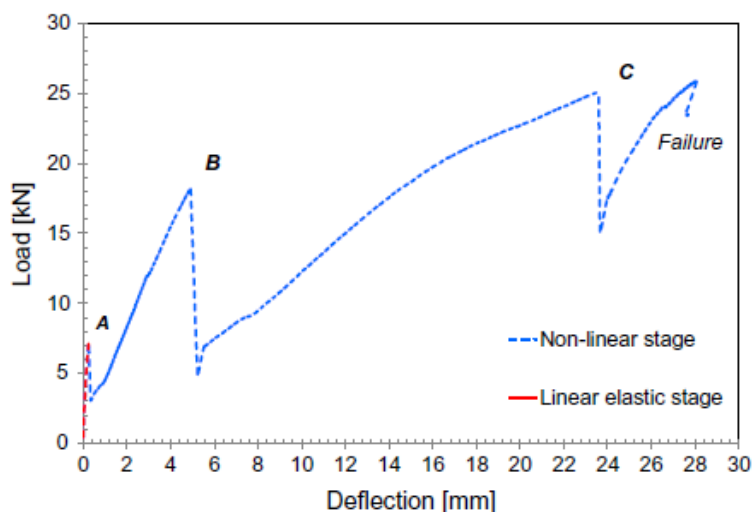
Obr. 2.6: Finální konfigurace přímého nosníku před tříbodovou zkouškou ohybem. Upraveno ze zdroje [8].

Výsledky experimentu

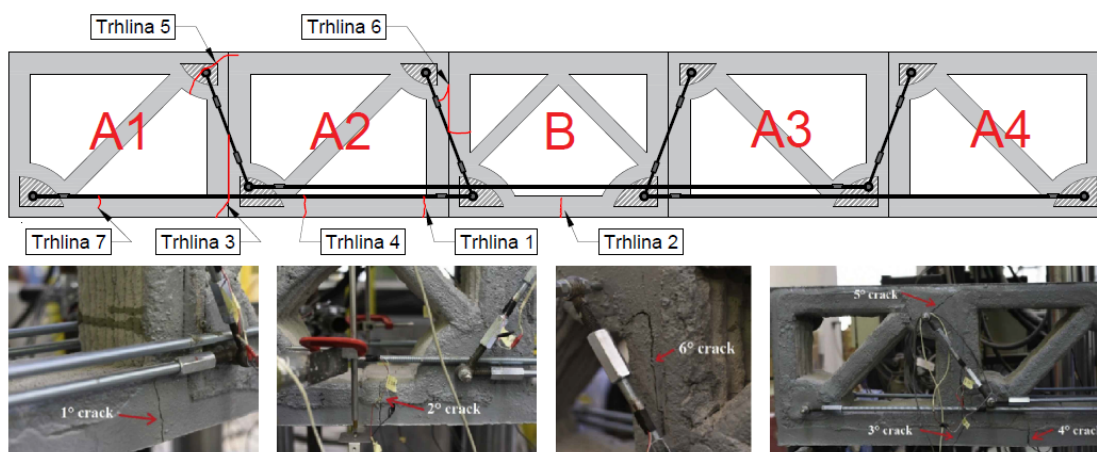
V tomto odstavci jsou uvedeny výsledky tříbodové zkoušky ohybem přímého nosníku porovnané s výstupy z programu SAP2000.

Pro bližší pohled na výsledky zkoušky byl v publikaci [8] použit graf závislosti zatížení na průhybu (Obr. 2.7). Během experimentu přechází prvek z lineárně-elastické fáze (prvek je neporušený) do fáze nelineární (od vzniku trhlin po kolaps). První tahová trhlina (Obr. 2.8 (Trhlina 1 - 1°crack)) vznikne při přechodu z elasticky pružného stavu do nelineárního stavu (Obr. 2.7 bod A). Tato první trhlina vznikla v dolní pásnici segmentu A2 při zatížení přibližně hodnoty 7 kN. Po přechodu do nelineárního stavu roste zatížení až do vzniku druhé trhliny (Trhliny 2 - 2°crack) v oblasti dalšího vrcholu křivky (Obr. 2.7 bod B) při zatížení 18 kN. Po prvních dvou trhlínách je pozorovatelné snížení tuhosti nosníku. Přesto se nosník stále chová jako spojitý prvek díky kvalitně provedeným spojům výztuže a dílců. Mezi body B a C se kromě rozšiřování už existujících trhlin začaly mezi segmenty A1 a A2 formovat trhliny 3, 4 a 5 - 3°, 4°, 5°cracks. Z průběhu jejich vzniku je těžké identifikovat, které z těchto porušení zapříčinilo pokles křivky zatížení/průhyb v bodě C. U dílců docházelo ke komplexnímu porušení zahrnující oblasti spojů, porušení spodních pásnic (tahové trhliny) a porušení v oblasti kotvení výztuže (smykové porušení ma-

teriálu v oblasti kotvení). Od bodu C dále postupně dochází ke kolapsu. Po dosažení hodnoty 25 kN došlo k úplnému porušení v oblasti kotvení výztuže do dílců (Trhlina 5 - 5° crack) a nosník nebyl nadále schopen přenosu zatížení.



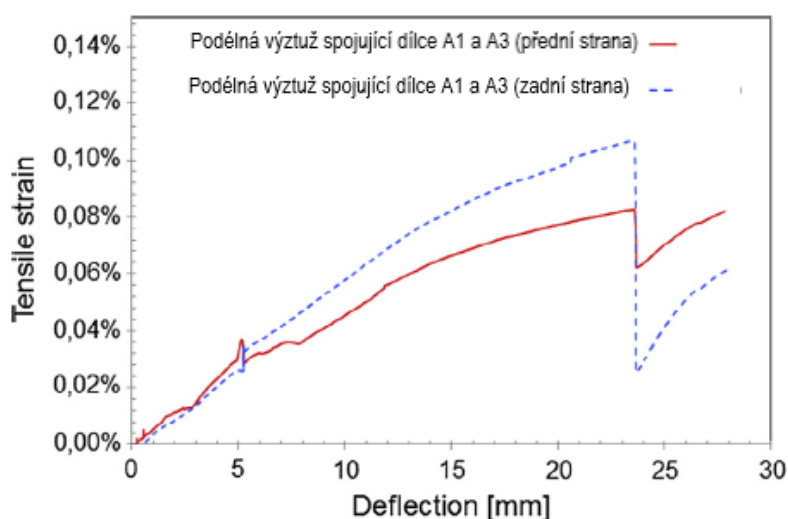
Obr. 2.7: Graf závislosti zatížení (Load) na průhybu (Deflection) namáhaného nosníku. Vyznačení lineárně elastická fáze (Linear elastic stage) (červeně) a nelineární fáze (Non-linear stage) (modře). [8]



Obr. 2.8: Znázornění trhlin na segmentech nosníku (A1, A2, B, A3, A4) vznikajících vlivem rostoucího zatížení. Trhliny jsou očíslovány chronologicky od nejmladší (Trhlina 1 - 1° crack) po nejstarší (Trhlina 7). [8]

Z hlediska průhybu dosáhl nosník hodnot až 28 mm. V porovnání s nosníkem plného průřezu o stejných rozměrech je hodnota poměrně vysoká. Hlavně pokud zohledníme fakt, že externí výztuž nedosáhla meze kluzu. V lineárně-elastické oblasti se chování 3D-tisknutého nosníku podobá nosníku plného průřezu, i když došlo k významnému snížení hmotnosti. V nelineární oblasti dochází u testovaného prvku ke ztrátě tuhosti (zapříčiňující velké průhyby).

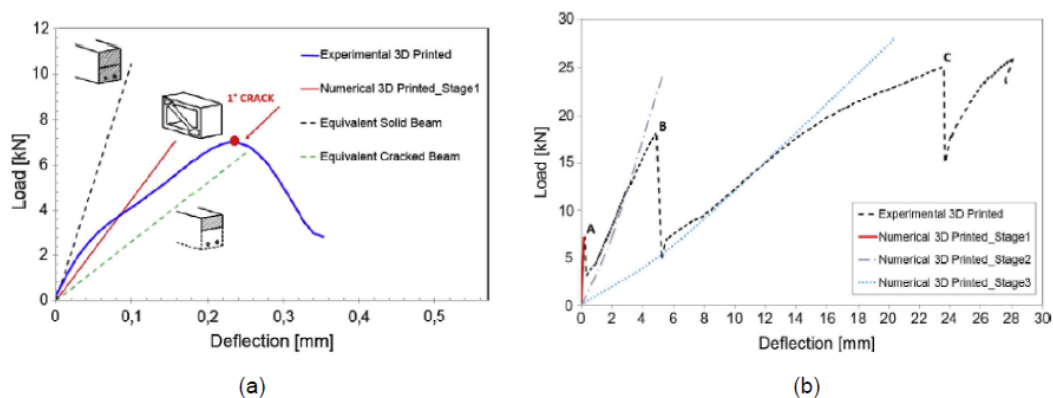
Při měření napětí bylo zjištěno, že nejvíce namáhané ocelové pruty nedosáhly meze kluzu (Obr. 2.9).



Obr. 2.9: Graf závislosti tahového napětí/průhyb (Tensile strain/Deflection) ve výztuži spojující dílce A1 a B (přední strana - červeně, zadní strana - modře čárkovaně). [8]

Pomocí výsledků ohybové zkoušky došlo k úpravám, aby výsledky analýzy byly co nejněvhodnější. K tomu docházelo hlavně na pomezí jednotlivých fází, kterými nosník při testu prochází. Prvním graf zatížení/průhyb (Obr. 2.10 a) je věnován porovnání digitálního modelu (červená křivka), 3D-tisknutého nosníku (modrá křivka), ekvivalentního nosníku s plným průřezem (černá čárkovaná křivka) a ekvivalentního nosníku s plným průřezem a trhlinami (zelená čárkovaná křivka). Z hlediska celkové ohybové tuhosti roste křivka nume-

rického modelu lineárně a podobá se reálnému modelu. Je patrné, že obě křivky se nacházejí mezi křivkami nosníků s plným průřezem. Druhý graf (Obr. 2.10 b) znázorňuje závislost zatížení na průhybu digitálního a reálného modelu po vzniku trhlin. Větší odchylka modelových křivek nastane mezi body B a C, kde byl digitální model upraven v závislosti na vzniku trhlin 3 - 5 (Obr. 2.8 (Trhlina 3 - 5 - 3° - 5°crack)). V hodnotě zatížení 15 kN se začnou křivky oddalovat. To lze odůvodnit samotným procesem vzniku trhlin. Lokální trhliny, které během této fáze vznikaly, by bylo složité v numerickém modelu zadefinovat.

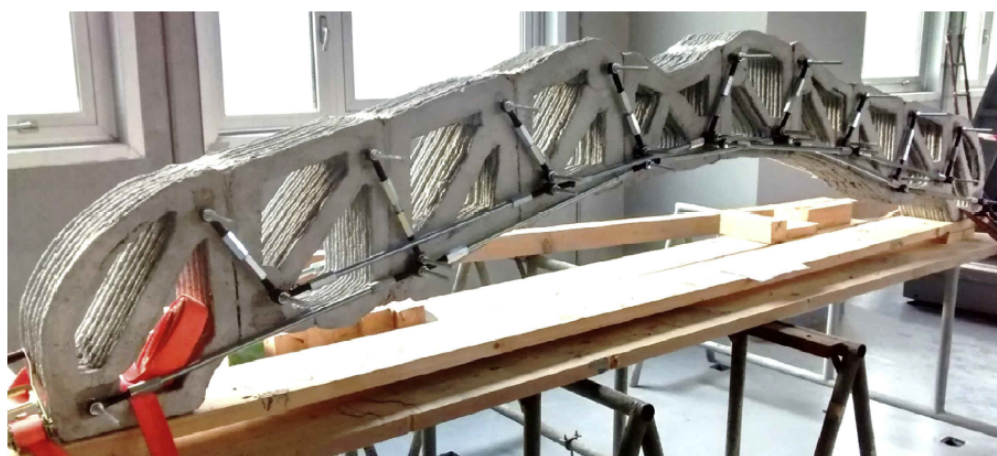
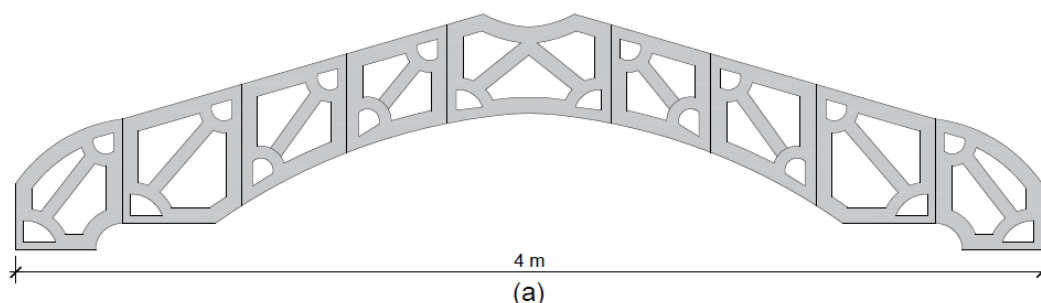


Obr. 2.10: a - graf závislosti zatížení/průhyb (Load/Deflection) v lineárně elastické fázi digitálního modelu (červená křivka), 3D-tisknutého nosníku (modrá křivka), ekvivalentního nosníku s plným průřezem (černá čárkovaná křivka) a ekvivalentního nosníku s plným průřezem a trhlinami (zelená čárkovaná křivka); b - graf závislosti zatížení/průhyb (Load/Deflection) porovnávající 3D tištěný nosník (černá čárkovaná křivka) a jeho upravovaný numerický model (ostatní křivky).

Obloukový nosník

Jako druhý byl navržen nosník obloukového tvaru složený ze segmentů nepravidelného průřezu inspirovaný sopkou Vesuv. Jeho délka byla přibližně 4 m a šířka 0,25 m (Obr. 2.11 a). Systém výztuže byl adoptován od rovného nosníku. Finální konfiguraci ukazuje Obr. 2.11 b. Tento tvar byl zvolen hlavně pro de-

monstraci případného potenciálu 3D tisku konstrukcí do budoucna a výsledky samotného testu na únosnost nejsou volně přístupné.



Obr. 2.11: a - Ilustrační schéma rozdělení oblého nosíku na segmenty; b - finální konfigurace vyztuženého oblého nosíku

2.1.3 Shrnutí a diskuze

Kapitola 2.1 se zabývá výrobou a zkouškami 3D-tisknutého nosníku s externí výztuží. Z výsledků lze vypořadovat, že ohybová tuhost nosníku je porovnatelná s nosníkem plného průřezu stejných rozměrů. Největší rozdíl nastane po vzniku trhlin v oblasti kotvení výztuže. To vede k oslabení jednotlivých segmentů a finálnímu kolapsu nosníku. Porucha tohoto rázu by nemohla u nosníku plného průřezu nastat. I přes skutečnost, že výztuž nedosáhla meze kluzu, dosahovaly hodnoty průhybu poměrně vysokých hodnot.

Největším kladem provedení prvků 3D tiskem je tvarová rozmanitost. Tiskárna má schopnost vyhovět nárokům architektů a zároveň zachovat nosnou funkci. Jednoduchost montáže takto vytvořených prvků by mohla v budoucnu usnadnit manipulační práce na stavbě. Jsou lehčí, jednodušší na přepravu a vykazují podobné vlastnosti jako nosníky vyhotovené běžným způsobem. Externí výztuž by však pravděpodobně představovala mnoho nepříjemných komplikací. Bylo by možné řešit otázku koroze, požární odolnosti, odolnosti vůči vnějšímu prostředí a estetiky. Metoda je zatím nedokonalá a je potřeba se do budoucna vypořádat s nepříznivými faktory před možnou aplikací ve stavebním průmyslu.

2.2 Tisknutý vláknobeton

Z pohledu tahové pevnosti a soudržnosti se stále hledají nové metody zdokonalování 3D-tisknutých cementových kompozitů. Zlepšení těchto mechanických vlastností by znamenalo další krok vpřed při začleňování 3D tisku do stavebního průmyslu. Jedno ze zřejmých řešení je použití vláken v materiálech prvků vyrobených 3D tiskem. Při klasické produkci betonu se již mnoho let používají skleněná, polymerní, ocelová nebo jiná vlákna na zlepšení materiálových vlastností. Slouží k redukci vzniku trhlin při smršťování (a následné působení vláken v tahové oblasti i po vzniku trhlin) a zmenšení objemových změn. Používají se například pro podlahy průmyslových hal a deskové prvky základů nebo mostovek.

2.2.1 Použití vláken u 3D-tisknutých kompozitů

V současné době existují dvě metody přidávání vláken do tisknutého kompozitu. První možností je jejich mísení s kompozitní směsí přímo v nádrži. Při 3D tisku je jedním z hlavních faktorů velikost agregátu. Hlavním důvodem je průměr hlavičky tiskárny (sloužící k extrudování materiálu) a požadovaná šířka jednotlivých vrstev. Při tisku nesmí dojít k zacpání hlavičky a přerušení vrstvení. Podobný problém nastává u tisknutého vláknobetonu. Mělo by se zabránit zacpání hlavičky nebo ohýbání vláken během extruze. Jelikož má každý výrobce stanovené jiné parametry na prvky tiskáren (zejména průměr hlavičky), není možné vhodné rozměry vláken obecně zadefinovat. Je nutné tiskárnu podrobit krátkým testům a z nich vyvodit výslednou délku vláken. U druhé metody je tento faktor eliminován. Je založená na přidávání samotných vláken až po extruzi kompozitní směsi z hlavičky. Na konec tiskárny je připevněn dávkovač, který postupně uvolňuje požadované množství vláken těsně před vznikající vrstvou.

Tisknutý vláknobeton byl již po nějakou dobu předmětem výzkumu a je používán jako efektivní materiál při stavbě jak běžných staveb, tak i konstrukčně složitějších objektů. Jako příklad se dají uvést jednopodlažní domy v Šanghaji (Obr. 2.12 a) od firmy WinSun [9], které byly vyrobeny pomocí 3D-tisknutého cementového kompozitu vyztuženého skleněnými vlákny. Celý proces výroby deseti domů o rozloze jednoho domu přibližně 25m^2 zabral pouze 24 hodin. Za zmínku také stojí světově první tisknutá mostní konstrukce v Madridu (Obr. 2.12 b) s přidávanými termoplastickými polypropylenovými vlákny. [10]. Ještě před uvedením této metody do praxe proběhlo mnoho experimentů k analýze chování vláken různých materiálů v cementovém kompozitu. Pro bližší pohled budou některé v této kapitole probrány podrobněji.



Obr. 2.12: a - dům od firmy WinSun [9]; b - lávka v Madridu [10]

2.2.2 Porovnání skleněných, čedičových a karbonových vláken z hlediska mechanických vlastností

Dále popisovaný experiment realizovaný na univerzitě v Augsburgu [11] se zaměřil nejen na chování vláken z různých materiálů, ale také na vliv trasování tisku na orientaci vláken a vliv trasování na pevnost v tlaku. Přínosným zdrojem k obdobné problematice je také výzkum ze Singapurského centra 3D tisku [12]. Dále je možné čerpat z experimentu university ve Würzburgu [13],

Typ vláken	Průměr [μm]	Pevnost v tahu [MPa]	Modul pružnosti [GPa]	Délka [mm]
Karbonová (HT C261)	7	3950	230	3
Skleněná (AR Force D-6)	20	3500	72	6
Čedičová (BS 13 0064 12)	13	4200	93	6

Tab. 2.2: Charakteristické vlastnosti vláken pro vláknobeton. [11]

kde porovnávali ohybovou pevnost prvků vyztužených polyakrylonitrilovými, polyamidovými a skleněnými vlákny.

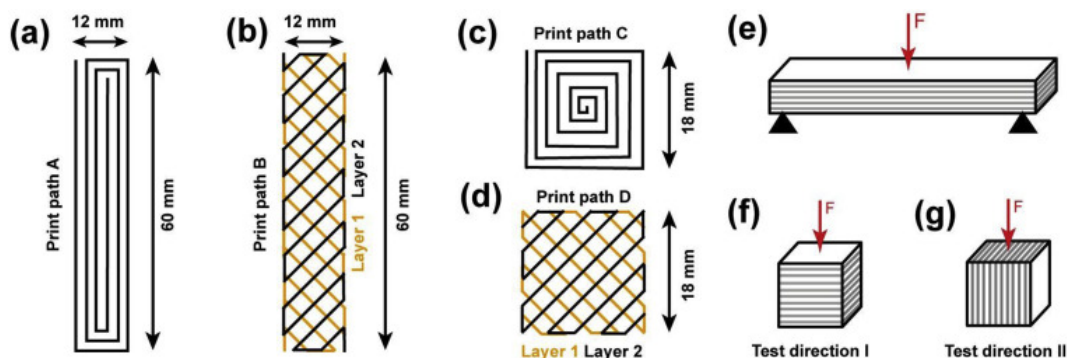
Příprava experimentu

Cementový kompozit měl následující složení: 61,5 % typ I 52 R Portlandský cement; 21 % oxid křemičitý, 15 % voda; 0,3 % hydratační inhibitor. Směs se promíchává za studena a poté jsou do ní přidána zvolená vlákna (2,2 % objemu). Nejprve se musí vlákna předeřhát, aby bylo umožněno jejich rovnoměrné rozptýlení v kompozitu a aby získala hydrofilní povrch (karbon - 400 °C; čedič a sklo - 500 °C). Charakteristické vlastnosti vláken jsou k dispozici v Tab. 2.2. K vytvoření vzorků byla využita tiskárna DeltaWASP 20 × 40. Stanovila se také výška jedné vrstvy (1,5 mm) a rychlost tisku (30 mm/s).

K dosažení potřebných výsledků byly navrženy dva typy prvků - kvádr o rozměrech 60 × 12 × 6 mm³ a krychle o hraně 18 mm. Dále se ke zkoumání rozdílů určilo různé trasování (Obr. 2.14 a, b, c, d).

Pevnost v tahu za ohybu

tříbodovou zkouškou ohybu (Obr. 2.12 e) byly prověřeny vzorky kvádrů (bez vláken a s užitím vláken - karbonová, skleněná a čedičová). Pevnost v tahu za ohybu všech testovaných prvků se pohybuje mezi 10 a 30 MPa. Hodnoty se liší jak materiálovým složením, tak i podle trasování tisku. Z experimentu může být jasně vyzorováno, že volba vláken a trasování má významný vliv na pevnost v tahu za ohybu.



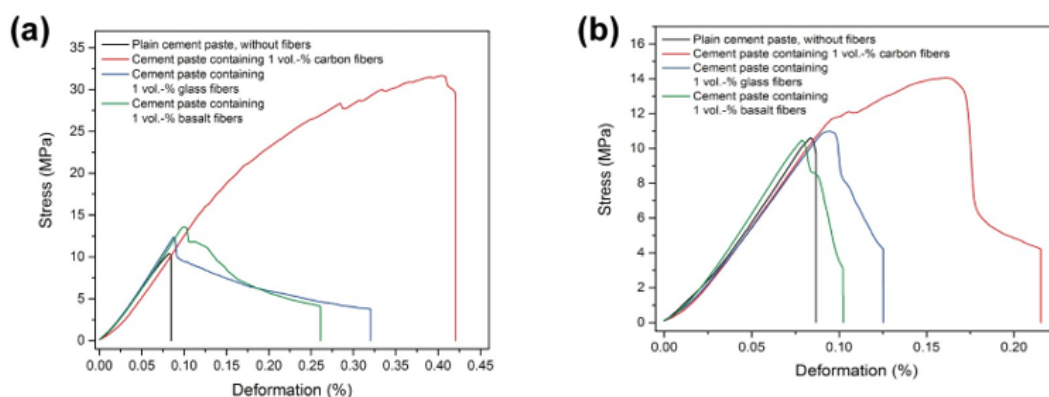
Obr. 2.13: a - Trasování A (Print path A) - kvádr; b - Trasování B (print path B) - kvádr; c - Trasování C (Print path C) - krychle; d - Trasování D (Print path D) - krychle; e - Zkouška na ohyb - kvádr; f - Zkouška pevnosti v tlaku ve směru kolmo na vrstvení (Test direction I) - krychle; g - Zkouška pevnosti v tlaku ve směru rovnoběžně s vrstvami (Test direction II) - krychle. [11]

Trasování A (Obr. 2.13 a): Vzorky nevyztuženého cementového kompozitu vykazují pevnost v tahu za ohybu okolo 10 MPa. Při vyztužení skleněnými a čedičovými vlákny bylo dosaženo pevnosti okolo 13 MPa a nelepší výsledky byly zjištěny u karbonových vláken, kde pevnost dosahovala až 30 MPa. Při pohledu na graf napětí/deformace (Obr. 2.14) je patrné, že vzorek bez vláken a vzorek s karbonovými vlákny nevykazují výrazné změny chování po vzniku trhlin. Oproti tomu vzorky se skleněnými a čedičovými vlákny vykazují po vzniku trhlin zbytkové napětí. Poměrně velká zóna plastického chování vyztužených prvků poukazuje na zvýšenou pevnost v tahu za ohybu.

Trasování B (Obr. 2.13 b): Při použití trasování B se projevuje u prvků z vláknobetonu výraznější změna chování po vzniku trhlin. U všech vzorků se zároveň se snižuje celková deformace (pohybující se od 0,08 % do 0,23 %). V porovnání s prvkem bez vláken nevykazují čedičová a skleněná vlákna změnu pevností v tahu za ohybu (10 - 11 MPa). Největší hodnoty opět zaznamenávají prvky s karbonovými vlákny. Hodnoty se pohybují okolo 14 MPa.

Při porovnání obou typů trasování A a B je patrné, že na prvky bez vláken neměla změna trasování z hlediska pevnosti v tahu za ohybu a deformace pod-

statný vliv. U trasování A se u vzorků s vlákny vyskytuje větší deformace, a tudíž lze usoudit, že vlákna mají větší vliv na výsledné chování po vzniku trhlin než u trasování B. Jelikož všechny materiály vláken mají podobnou pevnost v tahu (Tab. 2.2), lze uvažovat, že nižší výsledná pevnost v tahu za ohybu prvků s čedičovými a skleněnými vlákny je zapříčiněna menším modulem pružnosti. Zbytkové napětí v těchto prvcích poukazuje na fakt, že se cementový kompozit poruší před tím, než vlákna stačí přenést maximální napětí. Tudíž vlákna nepřispívají ke zvýšení pevnosti v tahu za ohybu tolik jako vlákna karbonová. Ale i přesto zabraňují náhlému kolapsu po vzniku prvních trhlin.



Obr. 2.14: Grafy závislosti napětí na deformaci (Stress/Deformation) zkoušených kvádrů; a - prvky vytvořené trasováním A; b - prvky vytvořené trasováním B. [11]

Pevnost v tlaku

K určení pevnosti v tlaku byly použity vzorky krychliček o hraně 18 mm a způsob trasování C a D (Obr. 2.13 c, d). Zatížení bylo vyvozováno hydraulickým lisem jak ve směru kolmém na vrstvy materiálu (Obr. 2.13 f), tak ve směru s nimi rovnoběžným (Obr. 2.13 g). Všechny výsledky pevností v tlaku jsou zkompletovány v Tab. 2.3. Pro každý typ vyztužení bylo testováno 5 vzorků a výsledné hodnoty zprůměrovány.

Typ vyztužení prvku	Trasování C -kolmo[MPa]	Trasování C -rovnoběžně[MPa]	Trasování D -kolmo[MPa]	Trasování D -rovnoběžně[MPa]
Nevyztužený kompozit	81.1	29.6	77.9	30.0
Karbonová vlákna	60.6	27.5	82.3	30.8
Skleněná vlákna	61.0	20.6	84.5	28.1
Čedičová vlákna	63.0	33.7	85	38.6

Tab. 2.3: Tabulka výsledných průměrných pevností v tlaku [MPa] pěti vzorků (každého typu vláken) tisknutého vláknobetonu. [11]

Trasování C (Obr. 2.13 c): Ve směru kolmo na vrstvení materiálu byly zjištěny hodnoty 80 MPa pro prvky bez vláken a okolo 60 MPa pro kompozity s vlákny (bez velkého vlivu typu vláken). Při změně směru trasování na rovnoběžný s vrstvením dochází k rapidnímu snížení pevnosti. Pevnost tlaku všech vzorků, bez ohledu na vyztužení, se pohybuje okolo 30 MPa. Je to způsobeno zejména nepravidelností plochy testovaných vzorků. První trhliny začnou vznikat v oslabených částech (vznikajících vrstvením) a způsobí dřívější kolaps, a tudíž nižší výslednou pevnost v tlaku.

Trasování D (Obr. 2.13 d): Ve směru kolmo na vrstvení vykazují vzorky podobnou pevnost jako u trasování C. Hodnoty se pohybují od 80 MPa do 85 MPa, přičemž v tomto případě má prvek bez vláken hodnotu pevnosti menší než prvky vyztužené. Směr rovnoběžně s vrstvením se opět prokázal jako slabší s hodnotami 30 - 40MPa, a to ze stejných důvodů jako pro trasování C.

Při shrnutí výsledků lze konstatovat, že použití vláken příliš neovlivňuje pevnost v tlaku. Na druhou stranu, velký vliv má u 3D-tisknutých kompozitů směr, ve kterém je prvek zatěžován. Jak již bylo řečeno, ve směru kolmo na vrstvení dosahují kompozity až o 50 MPa větší pevnosti v tlaku než ve směru s vrstvením rovnoběžným.

2.2.3 Shrnutí a diskuze

Použití vláken u 3D-tisknutého betonu zajistí zlepšení mechanických vlastností, a tudíž umožní použití této metody výstavby ve více oblastech. Vlákna v kompozitu navyšují pevnost v tahu za ohybu, ale nemají přílišný vliv na pevnost v tlaku. Tedy při návrhu ohýbaných prvků pomáhají s řešením problému velkých deformací, které zapříčiňují nevyžádané průhyby. Samotné zakomponování vláken do kompozitu při tisku je zatím problém. Jak pro metodu přidávání vláken už do nádrže na kompozit (omezení velikosti vláken v závislosti na průměru hlavice), tak v případě přidávání vláken přímo za hlavici při tisku (nedostatečné smísení vláken s kompozitem). 3D tisk kompozitů má mnohem závažnější nedostatky v jiných oblastech, se kterými vyztužení vlákny nepomůže.

2.3 „Obalování“ výztuže tisknutými kompozity

„Obalování“ výztuže cementovou směsí pomocí 3D tiskáren je revoluční metoda umožňující výrobu prvků s měnícím se tvarem průřezu po výšce prvku. V běžných případech tisku není možné dosáhnout velkého sklonu tisknutých konstrukcí. Používané materiály toho nejsou schopné z důvodu nedostatečné rané pevnosti materiálu a nesoudržnosti vrstev. Pokus o vytvoření sklonu by vedl k postupné deformaci a následnému borcení.

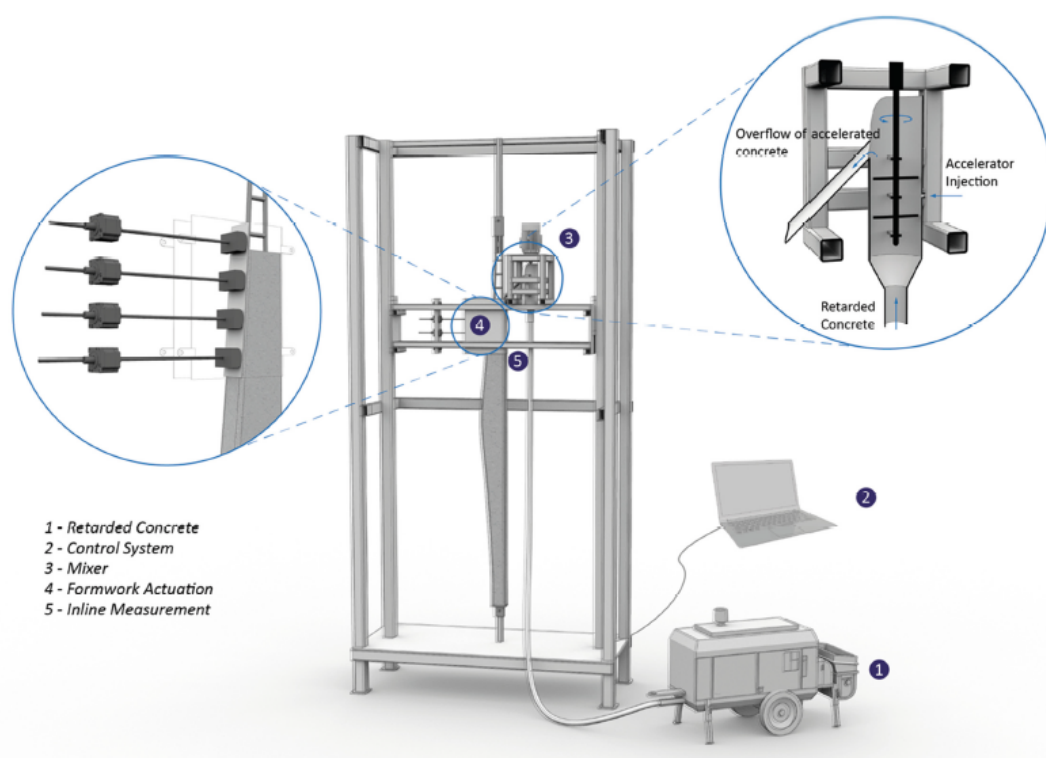
V současnosti jsou známé dvě metody uplatnění této technologie - Smart Dynamic Casting (SDC) [14] a Sparse Concrete Reinforcement in Meshworks (SCRIM) [15]. Oba způsoby jsou stále zkoumány, ale metoda SDC je již hojně používána při tvorbě sloupů s nepravidelnými tvary průřezu.

2.3.1 Smart Dynamic Casting

Smart Dynamic Casting (volně přeloženo - chytré dynamické odlévání) je robotická prefabrikační metoda užívaná pro výrobu nestandardních konstrukcí s různorodou geometrií a proměnlivým tvarem průřezu. Je považována za jeden z dílčích kroků k plné automatizaci výstavby budov. Princip spočívá ve tvarování materiálu pomocí flexibilního bednění mnohem menší délky než výsledný prvek. Bednění se pomalu pohybuje okolo předem postavené výztuže od země směrem do požadované výšky, zatímco je postupně plněno kompozitem. Materiál je tvarován pomocí mechanického stlačovacího systému formujícího bednění, který zaručí požadovaný tvar průřezu v dané sekci. Při celém procesu je nutné sledovat chování materiálu. Musí mít dostatečnou pevnost, aby unesl vlastní tíhu a tíhu materiálu nad ním.

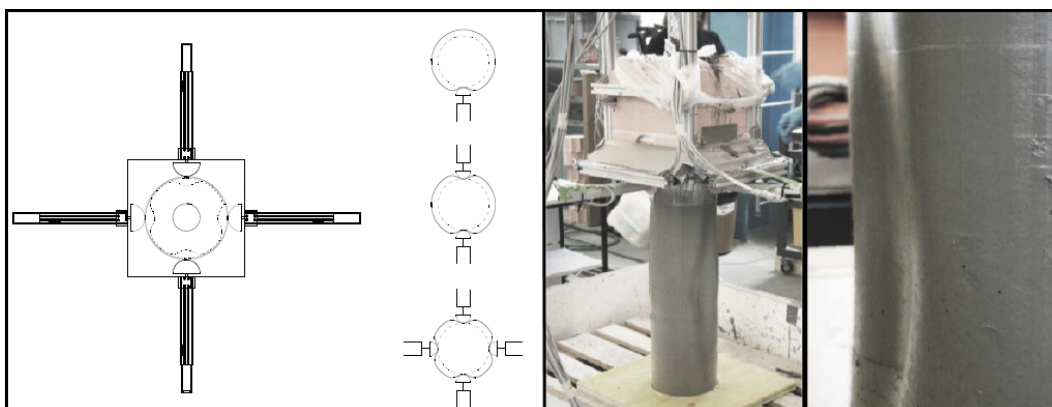
Systém výroby

Obr. 2.15 představuje pohled na systém užívaný k tisku prvků pomocí SDC. Nejdříve se musí namíchat velká dávka materiálu s příslušným množstvím příměsí, která je následně přelita do pumpy (Obr. 2.15 1). Řídicí systém (Obr. 2.15 2) zajišťuje pumpování malých dávek směsi do mixéru (Obr. 2.15 3) umístěného přímo nad bedněním (Obr. 2.15 4) a následné přidávání akcelérátorů. Z mixéru se do bednicí formy postupně uvolňují malé dávky materiálu. V bednění se zachovává konstantní hladina směsi. Řídicí systém dále vertikálně posouvá bednění, aby zajistil kontinuální průběh tisku. Senzory u spodní hrany bednění (Obr. 2.15 5) posílají zpětnou vazbu na pevnost materiálu. Řídicímu systému, který následně odpovídajícím způsobem adaptuje rychlost procesu tisku.



Obr. 2.15: Konstrukce pro tisk pomocí SDC. 1 - nádrž a pumpa s cementovou směsí; 2 - řídicí systém; 3 - mixér; 4 - flexibilní bednění; 5 - senzory. [16]

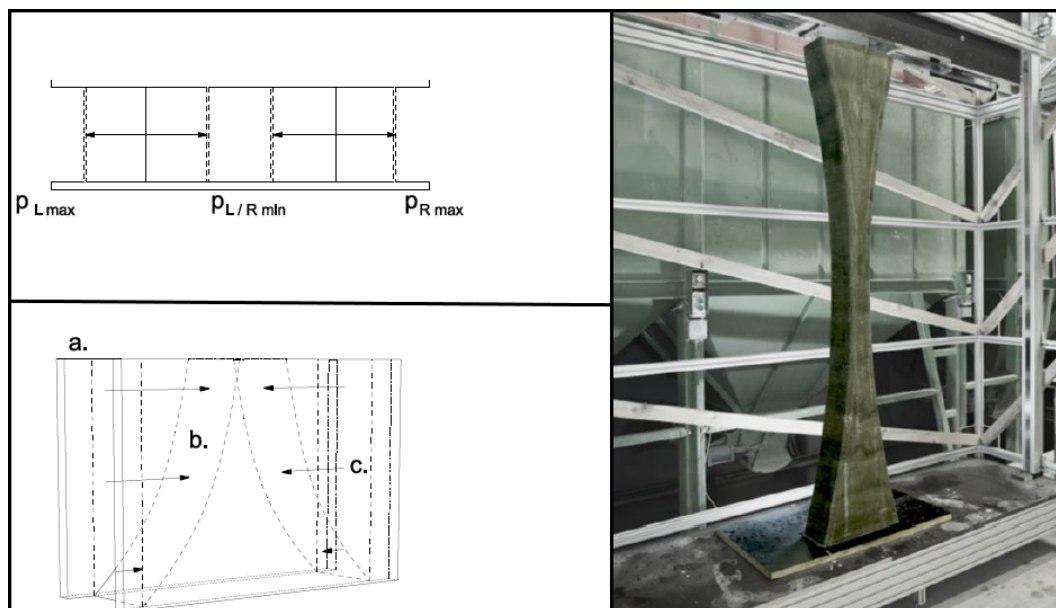
Z hlediska tvarování prvku pomocí bednění lze podle [17] identifikovat 2 metody - lokální a globální tvarování. U lokální metody se kompozit tvaruje u výstupu z bednění, tedy u nejspodnější části. K té je v jedné rovině připevněna flexibilní membrána obklopená požadovaným počtem akčních členů (Obr. 2.16). „Akční členy, z angličtiny též aktuátory, jsou prvky určené k využití zpracované informace. Nastavují velikost akční veličiny, jejich prostřednictvím zasahuje řídicí obvod do regulované soustavy nebo řízeného stroje. Skládají se z pohonu (motorické jednotky) a regulačního orgánu” [18]. Tyto digitálně řízené komponenty slouží k formování membrány.



Obr. 2.16: Flexibilní bednění u metody SDC - lokální. Ukázka umístění akčních členů. [17]

Oproti tomu při metodě globální se prvek formuje po celé výšce bednění. Je k tomu potřeba náročnějšího mechanismu tvarování, ale umožňuje mnohem větší variace tvarů průřezu. V experimentu vysoké školy v Curychu [17] bylo k demonstraci této metody použito bednění ze dvou tuhých desek a dvou kovových ohýbatelných plátů obklopených aktuátory (Obr. 2.17). Povedlo se vytvořit dva metry dlouhý prvek, u kterého se plocha průřezu změnila ve středu oproti spodní a vrchní části až o 50 % (Obr. 2.17).

Nepostradatelnou část systému tvoří senzory umístěné u spodní části bednění. Celý tento systém zpětné vazby je detailně navrhován v [16] a [19]. Zaměřují se na kombinaci úrovně naplnění bednění materiálem a tření,



Obr. 2.17: Flexibilní bednění u metody SDC - globální. Nahoře vlevo - schématický vodorovný řez bedněním. p_{Rmax} - maximální možný nárůst objemu. $p_{L/Rmin}$ - minimální možný pokles objemu. Dole vlevo - ilustrační nákres bednění. a - tuhé desky; b - ohýbatelné kovové pláty; c - šipky, indikující pozice akčních členů. Vpravo - Vyprodukovaný sloupový prvek. [17]

kteří způsobí materiál při posunu bedněním. Pomocí těchto veličin je možné kvantifikovat svislé napětí v místě výstupu a informovat kontrolní systém o výskytu napětí a riziku porušení. Dále je nutné kontrolovat tlak v bednění v blízkosti výstupu a následně upravovat rychlost tisku. Tlak může ovlivnit „odtok“ materiálu a pravidelné vrstvení.

2.3.2 Sparse Concrete Reinforcement in Meshworks

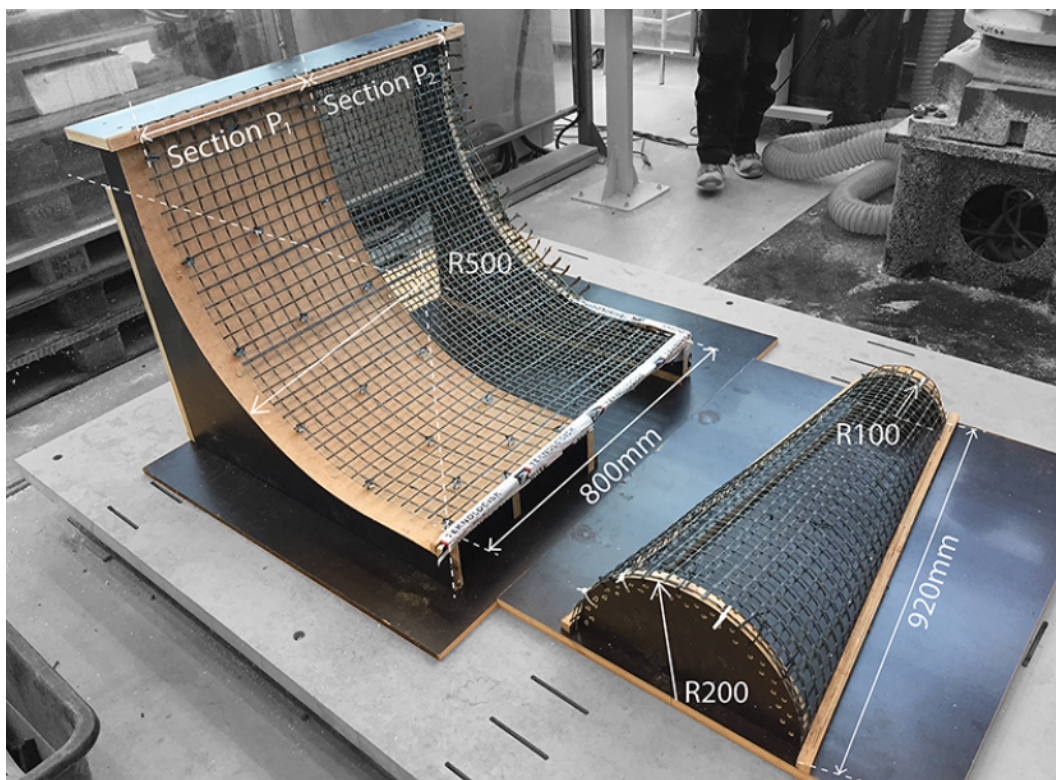
Sparse Concrete Reinforcement in Meshworks (SCRIM) je možné volně přeložit z angličtiny jako rozptýlení betonu po výztužné síťovině pomocí 3D tisku. Přestože má samotná výroba betonu a jeho alternativ oproti jiným materiálům relativně malý dopad na životní prostředí, stal se z něj jeden z hlavních producentů oxidu uhličitého v průmyslu. Metoda SCRIM je v tomto směru velice šetrná, jelikož snižuje množství spotřebovaného materiálu a přitom dokáže

vyprodukovat lehké prvky s porovnatelnými vlastnostmi. Spojuje revoluční možnosti betonových tiskáren s vyztužením pomocí textilních síťovin. Tímto hybridním přístupem je možné se vyhnout klíčovým problémům 3D tisku ve stavebnictví jako třeba vrstvení materiálu, výroba konstrukcí se sklonem a hlavně začlenění výztuže. SCRIM je zatím pouze ve vývojovém stádiu, ale dánský institut technologie se již pokusil o realizaci prvků takto vyrobených [15]. Jejich výzkum je v této práci použit jako prostředek pro bližší popis metody a nastínění možných budoucích překážek.

Systém výroby

Pro přípravu základní geometrie objektu se použije pevná síťovina sloužící zároveň jako výztuž. Na tu se pomocí upravené 3D tiskárny cementových kompozitů nanese požadovaný počet vrstev materiálu. Speciální úprava spočívá v otáčivosti hlavice tiskárny. Musí být schopná nanášet kompozit v různých úhlech, aby se docílilo dostatečného pokrytí síťoviny. Tímto způsobem se místo běžného vyztužování betonových prvků nebo přidání vláken (zlepšování tahové pevnosti) nanese na výztužnou síť materiál, který zlepší její tlakové vlastnosti. Výroba je rychlá a nespotřebuje se příliš materiálu. O její efektivitě je diskutováno v závěru kapitoly.

Během experimentu [15] byla použita síťovina CFRP (carbon fiber reinforced polymer), tedy síťovina z uhlíkových vláken s oky o velikosti $30 \times 30 \text{ mm}^2$. Ta byla zformována do výsledného tvaru prvku a následně upevněna, aby nedocházelo k jejímu posunu během procesu výroby (Obr. 2.18). Také musí odolat vyvolanému zatížení (hlavně vlastní tíze kompozitu). K nanášení materiálu byla použita kombinace šesti osého robota Fanuc R-2000iC/165F a čerpadla NETZSCH s možným průtokem až 100 dm^3 . Prostor pro pohyb hlavice byl zadefinován na $2 \times 3 \times 2 \text{ m}^3$ (délka \times šířka \times výška). Složení použitého materiálu o objemu 36 dm^3 bylo následující: cement CEM I 52.5N, popílek,

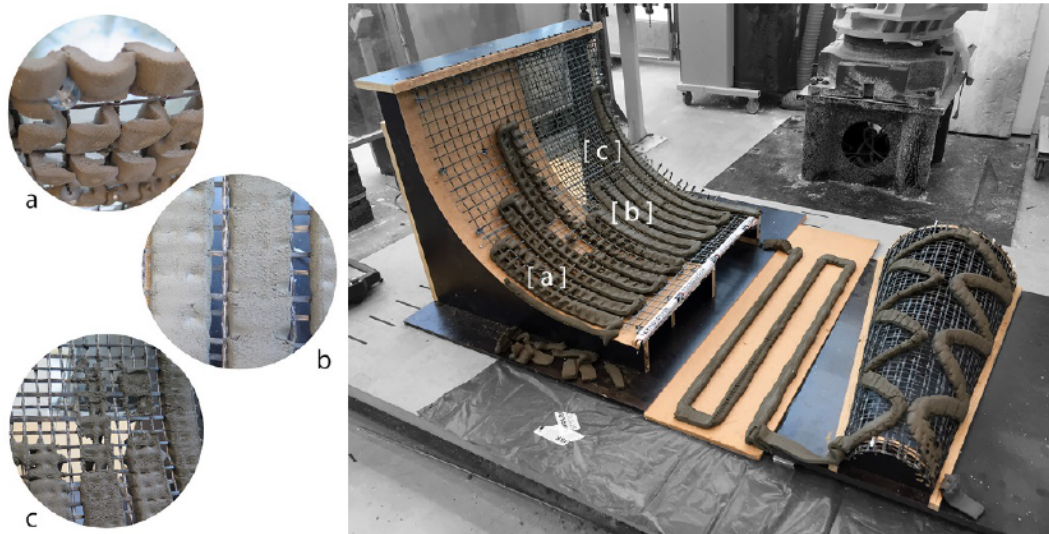


Obr. 2.18: Příprava síťoviny na metodu SCRIM pro první experiment. [15]

jemný písek (maximální velikost agregátu 1 mm), voda (vodní součinitel $w = 0,38$), retardér (0,5 %), plastifikátor redukující vodu (0,1 %).

Pro zjištění možných komplikací při tisku byly provedeny dva experimenty. První se týká dvou prvků - poloviční komolý kužel o průměrech 200 mm / 100 mm a výšce 920 mm (Obr. 2.18 vpravo) a čtvrtina plochy stěny válce o průměru základny 500 mm (Obr. 2.18 vlevo). V případě kuželu se síť CFRP kladla ve dvou vrstvách, tudíž vznikla oka o velikosti $15 \times 15 \text{ mm}^2$. Obě vrstvy byly spojeny, aby se zabránilo separaci. Stejný proces proběhl u válce, ale pouze v sekci P_2 (Obr. 2.18 sekce P_2). U Sekce P_1 byla zachována původní velikost mezer ($30 \times 30 \text{ mm}^2$). Po přípravě bylo zvoleno trasování hlavice a cementový kompozit byl nanesen na síť po vrstvách o šířce 40 mm.

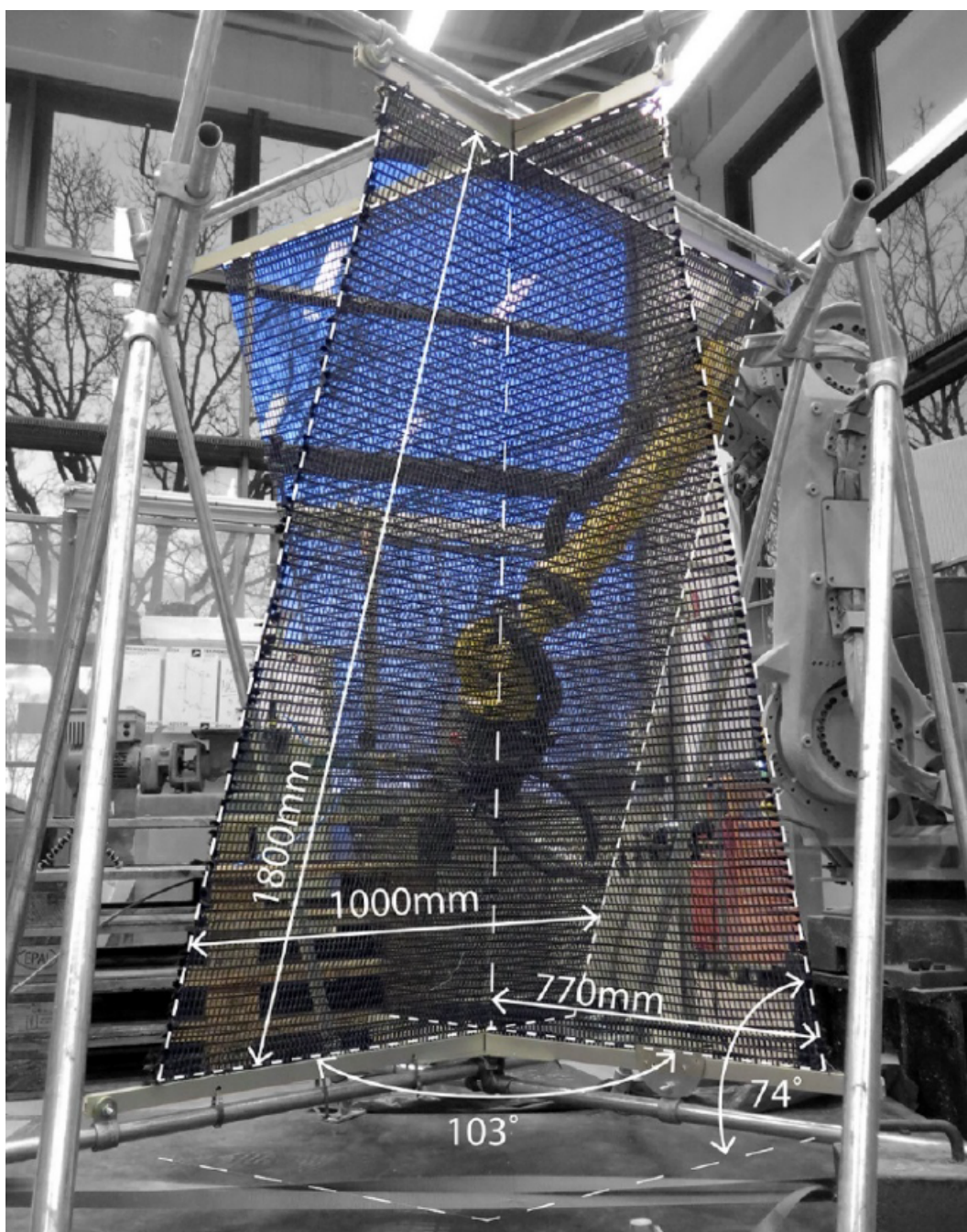
Po ztuhnutí materiálu (přibližně dvě hodiny po aplikaci) bylo patrné, že v sekci P_1 u válcové plochy docházelo k propadání materiálu (Obr. 2.19 a).



Obr. 2.19: Výsledek prvního experimentu provedeného metodou SCRIM. [15]

Nasvědčuje to faktu, že čerstvý cementový kompozit se nemohl vypořádat s ohybovým momentem a smykovým napětím způsobeným mezerovitostí v síti. Tento problém by se v budoucnu dal eliminovat přidáváním vláken přímo do materiálové směsi. V sekci P_2 a u půl kuželové konstrukce byl výsledek o poznání lepší. Mřížka v této části poskytuje lepší podporu pro čerstvý materiál, a tím minimalizuje propadání (Obr. 2.19 b). Při tisku je nutné zachovat dostatečnou vzdálenost od plochy, na kterou je kompozit nanášen. V opačném případě dojde v protlačení materiálu mřížkou (Obr. 2.19 c). O výsledku prvního experimentu lze konstatovat, že došlo k dobrému spojení cementového kompozitu a uhlíkových vláken a že nanášení v horizontální poloze je přijatelné.

V případě druhého experimentu byly navrženy dvě desky o rozměrech $1,8 \times 1 \text{ m}^2$ protínající se pod úhlem 103° a ve sklonu 74° od podkladu (Obr. 2.20). Velikost mezer v síťovině činila $14 \times 7 \text{ mm}^2$. Na prvek byl nanášen materiál ve vrstvách o tloušťce 34 mm. Cílem této konfigurace bylo zjistit výsledek spojení dvou desek pomocí nanášeného materiálu, zvýšit prostorovou komplexnost konstrukce a otestovat efekt prolínajících se vrstev. Při nanášení prvních vrstev vykazoval kompozit dobrou spojitost s uhlíkovými vlákny. Po nanášení



Obr. 2.20: Příprava síťoviny na metodu SCRIM pro druhý experiment. [15]

přibližně 20 kg začalo docházet k deformaci celé konstrukce zapříčiňující nedostatečnou přilnavost vrstev a jejich nekonstantní výšku (Obr. 2.21 a). Po

úpravě trasování a množství tisknutého materiálu byly tyto problémy eliminovány (Obr. 2.21 b).



Obr. 2.21: Výsledek druhého experimentu provedeného metodou SCIM. a - nepovedené trasování; b - upravené trasování s menším množstvím aplikovaného materiálu. [15]

2.3.3 Shrnutí a diskuze

Při výrobě vyztužených konstrukcí pomocí metody Smart Dynamic Casting se užívá flexibilní bednění umožňující tvarovou rozmanitost prvků (hlavně sloupových). Radikální změny průřezu po výšce tisknutých konstrukcí vyžadují co nejspolehlivější senzory zpětné vazby pro dodatečné uzpůsobení rychlosti tisku a pumpování materiálu. V současnosti je problém zkonfigurovat dostatečnou flexibilitu bednění v poměru k tlaku, který vyvíjí pumpovaný materiál. Další problematikou je deformace spodních částí konstrukce, se kterou se dá vypořádat zlepšením vlastností materiálu, ale na úkor ceny. Pokud se podaří tento systém lépe řídit a vybalancovat vlastnosti používaných materiálů, bude možné v budoucnu vytvářet i konstrukce o větších rozměrech.

Metoda Sparse Concrete Reinforcement in Meshworks je na úplném začátku, ale podněcuje k možným novým principům vyztužování 3D-tisknutých prvků. Přispívá hlavně větší svobodou v orientaci konstrukcí. Při dokonalejším provedení by se rapidně zvýšila rychlost výroby nepravidelných

konstrukcí. Na druhou stranu má metoda limity omezující její provedení. Aby nedocházelo k deformaci konstrukcí, je nutná podpora vyztužujících sítí, tedy v podstatě ekvivalent podpor u bednění, jehož použití je snahou úplně vyloučit. Bez podpory hrozí ohýbání sítě a následná nepřilnavost materiálu a nepravidelnost výšek vrstev. Otázka na konečné chování prvků při začlenění do staveb ještě nebyla zodpovězena. Ale je možné se domnívat, že nosnost těchto prvků bude omezená z důvodu malé tlakové pevnosti. Dají se také předpokládat velké deformace a slabá odolnost vůči vnějšímu prostředí.

2.4 Výroba bednění pomocí 3D tisku

Z hlediska aplikace ve stavebnictví se dá výroba bednění z kompozitních materiálů pomocí 3D tisku považovat za metodu, která má jeden z největších potenciálů na budoucí využití. Zatím existují dva možné přístupy - bednění z cementových kompozitů [20] [21] a metoda Mesh Mould [22]. Jak již bylo zmíněno v předešlých kapitolách, 3D tisk umožňuje velkou tvarovou rozmanitost a odstranění typického bednění oproti běžným metodám výstavby. Dále popisovaná metodologie by mohla být další úspěšnou alternativou pro vyztužování prvků realizovaných 3D tiskem.

2.4.1 Bednění z cementových kompozitů

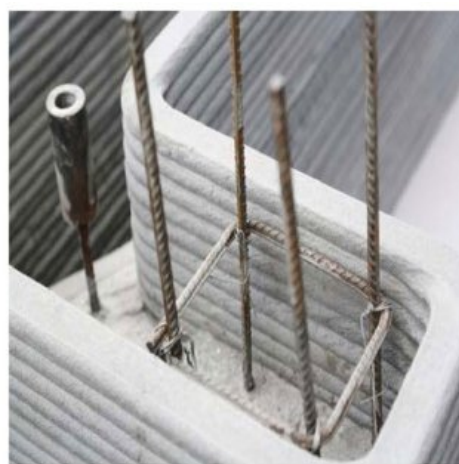
Princip spočívá ve čtyřech základních krocích. Nejdříve je potřeba navrhnout tvar konstrukce vyhovující prostoru, ve kterém se může pohybovat hlavice tiskárny. Poté se navržená „skořápka“, tedy ztracené bednění, vytiskne podle vhodného trasování. Zhotovené bednění musí mít takovou pevnost, aby uneslo dávku vlévaného betonu bez deformace nebo porušení. Do takto zhotoveného bednění se manuálně vloží potřebné množství výztuže. Výsledná konstrukce se nakonec vyplní běžným betonem (Obr. 2.22 b). Proces výstavby se může provádět postupně, aby nedocházelo k borcení nanášených vrstev. S tímto postupem je možné rychle a levně vyhotovit bednění pro tvarově složité stavby. Postup je možné aplikovat především na prvky stěnové, ale jsou i případy, kdy byl použit na sloupové prvky (Obr. 2.22 a).

Překážky realizace

Cílem je vytvořit bednění, které unese tíhu do něj vlévaného betonu. S tímto faktem se pojí pár problémů, které je nutné vyřešit před samotným tiskem. Řadí se mezi ně extrudovatelnost [21], boulení a plastický kolaps [25].



(a) Sloupový prvek vytvořený pomocí tisknutého bednění [23]



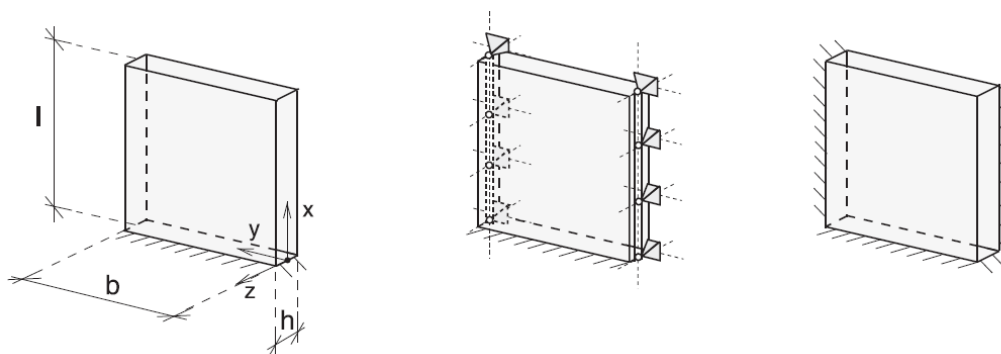
(b) Vyztužené bednění stěny z cementového kompozitu [24]

Obr. 2.22: Příklady 3D tisku bednění

Extrudovatelnost (z anglického *extrudability*) je schopnost dopravit čerstvý cementový kompozit pomocí čerpacího systému do hlavičky, kde musí být extrudován jako nepřerušovaná vrstva filamentu. Zatím neexistuje přesná zkouška, která by určila tuto vlastnost, proto se musí provést pár testů ve formě rovných vrstev, na kterých se učí nepřerušovatelnost, rovnoměrnost a konstantní výška.

Výzkum [25] pojednává dopodrobna o problematice boulení a plastického kolapsu 3D-tisknutých stěnových prvků. Právě to jsou dva hlavní mechanismy selhání, se kterými je možné se u této metody setkat. Ve výzkumu jsou stanovené rovnice, pomocí kterých se upraví výsledný design prvku. V závislosti na boulení jsou rovnice a okrajové podmínky odvozeny z rovnováhy nerovnoměrných sil působících na heterogenní desku. Heterogenní deska, jež je vystavena zatížení, je uvažována jako deska vetknutá (Obr. 2.23 vpravo), prostě podepřená (Obr. 2.23 uprostřed) nebo bez podpor volně stojící (Obr. 2.23 vlevo).

K plastickému kolapsu dochází při dosažení meze kluzu (při zatížení vlastní vahou) v kritickém místě stěny, tedy v jejím nejspodnějším místě (Obr. 2.23



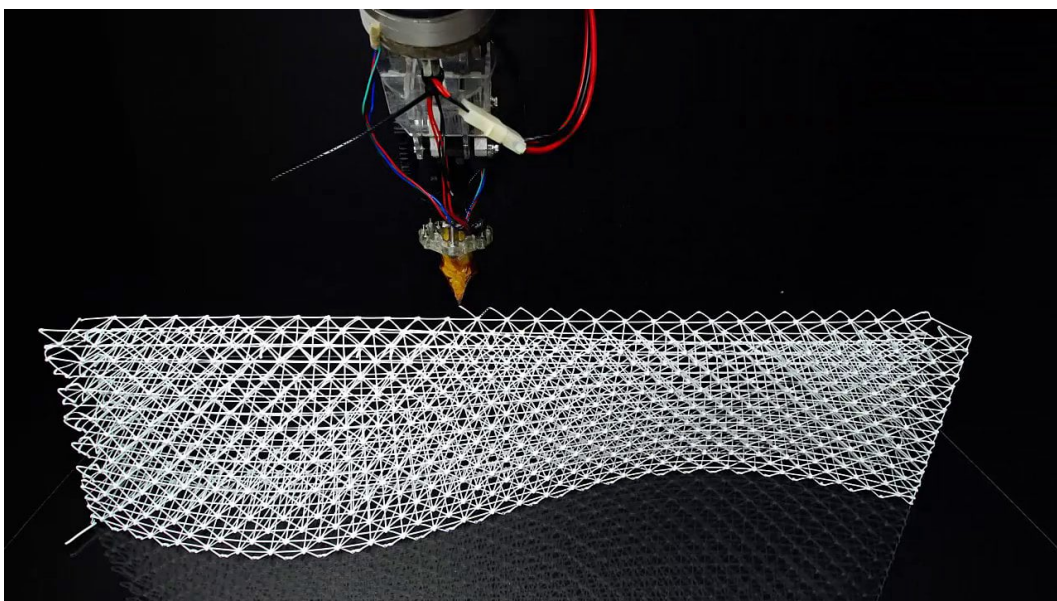
Obr. 2.23: Systém podepření stěnových prvků. vpravo - bez podpor volně stojící; uprostřed - prostě podepřená; vlevo - vetknutá. [25]

podle souřadného systému $x = 0$). Zde dosahuje biaxiální napětí od vlastní tíhy maxima. Samotné rovnice pro oba typy selhání jsou dostupné ve zmiňované referenci [25] a z důvodu jejich rozsahu v nich nebudou v této kapitole zmíněny.

2.4.2 Mesh Mould

Mesh Mould (MM), volně přeloženo jako forma ze síťoviny, je proces digitální výroby, který byl vynalezen na Spolkové vysoké technické škole v Curychu. Je to metoda spojující výrobu výztuže a bednění v jeden cyklus, jež je vyhotoven roboticky řízeným systémem.

Hlavním principem je tvorba tvarově složitých prvků s nízkou cenou a spotřebou materiálu. Celý proces začíná výrobou výztužné síťoviny, která v tomto případě proplétá celý prvek skrz na skrz (Obr. 2.24). Síť je dostatečně hustá, aby dokázala pojmout nalévaný materiál a aby si udržela svůj tvar pod váhou kompozitu. Jako materiál se hojně používají tisknutá polymerní vlákna nebo tisknutá ocel jako dražší varianta. Po vyhotovení požadovaného tvaru „skořápky“ se začne do jejího jádra opatrně nalévat cementová směs. Ta se postupně vrství a je ze stran manuálně uhlazována, aby nedocházelo k propadávání materiálu skrz stěny prvku. Celý proces výroby je rychlý a může se provádět in situ.



Obr. 2.24: Výztužná síťovina metody Mesh Mould. [26]



Obr. 2.25: Postupné vlévání cementového kompozitu a manuální uhlazování stran prvku u metody Mesh Mould. [26]

Optimalizace síťoviny

Před každým tiskem je nutné jasně určit uspořádání výztužné mřížky. Existuje celá škála možných tvarů od jednoduchých trojúhelníkových mřížek až po složité prostorové struktury. Geometrický tvar síťoviny je závislý na několika faktorech - optimalizovaný tok cementového kompozitu, sedání kompozitu, typy namáhání, materiál a doba výroby. Tyto faktory detailně popisuje publikace [27] ze Spolkové vysoké technické školy v Curychu.

Z hlediska sedání vlévaného materiálu je na jednu stranu nutné, aby struktura síťoviny byla dostatečně hustá (tedy aby nedocházelo k vytlačování kompozitu skrz oka v mřížce). Na druhou stranu musí být oka v jádru síťoviny tak velká, aby se mohl cementový kompozit rovnoměrně usazovat bez vzniku vzduchových dutin. Toho lze docílit optimálním digitálním modelem a následnými zkouškami sedání.

Při výrobě je prvek síťoviny namáhán dynamickým zatížením vlévaného materiálu, hydrostatickým tlakem čerstvého kompozitu a napětím vznikajícím po zatvrdnutí a zatížení prvku. Od nich se odvíjejí výsledné dimenze prvku.

2.4.3 Shrnutí a diskuze

Stavba se v dnešní době téměř neobejde bez klasického bednění. Je to pomocná konstrukce pro uložení čerstvého betonu a slouží k udání výsledného tvaru prvku. V této kapitole byly představeny dvě metody, které by mohly do budoucna klasický proces výstavby úplně změnit nebo jej alespoň v některých aspektech posílit. Bednění vytvořené z cementových kompozitů pomocí 3D tisku je vhodná alternativa, která zároveň poskytuje mnohem větší volnost ve tvarové rozmanitosti. Dá se předpokládat, že díky její jednoduchosti bude brzy začleněna do procesu výstavby. Ovšem je nutné s metodou ještě dále experimentovat. Zejména samotný tisk konstrukce bednění do výšky činí v současnosti problémy, se kterými se zatím nikdo pořádně nevyrovnal. Hrozba

plastického kolapsu, boulení a borcení vrstev při tisku jsou stále předmětem výzkumu. Jako druhá byla představena metoda Mesh Mould. MM začleňuje tisk polymerních látek do stavebního průmyslu. Z hlediska tvaru konstrukce je to metoda s největším potenciálem. Ale dá se předpokládat, že použité materiály zastupující funkci klasické ocelové výztuže, nebudou mít takovou pevnost a životnost. Jsou šetrnější k životnímu prostředí a rapidně snižují čas a cenu výstavby, ale jejich materiálové vlastnosti mají k oceli daleko.

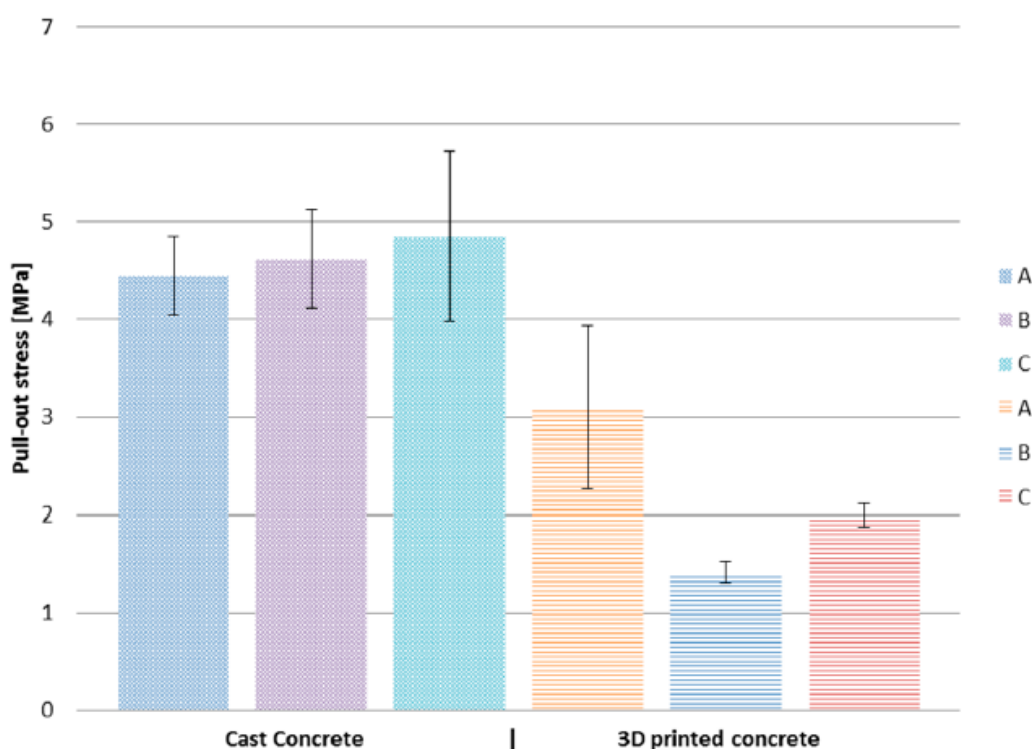
2.5 Pokládání kabelové výztuže při tisku

Ve dříve popsaných metodách byla výztuž instalována manuálně před nebo po procesu tisku. Vizí 3D tisku ve stavebnictví je minimalizace lidské pracovní síly za účelem levnější výroby a dokonalejší plynulé výstavby. Logickým důsledkem tohoto směru uvažování je tedy úplná automatizace jak tisku konstrukcí, tak pokládání výztuže. Metoda podkládání kabelové výztuže při tisku by mohla přinést v této oblasti náležitě přispět. Poprvé byla představena na vysoké škole v Eindhovenu na fakultě Built Environment (Budovy a prostředí)[28]. Princip spočívá v pokládání výztuže současně s tisknutou vrstvou cementového filamentu.

K typické sestavě 3D-tiskárny cementových kompozitů skládající se z nádrže na materiál, pumpy, hadice, ovládacího systému, robotického ramene a hlavice se v tomto případě přidá zařízení, které pokládá výztuž při tisku (Reinforcement Entraining Device - RED). Samotné roboticky ovládané zařízení je umístěno u hlavice stroje a výztuž přidává skrz hlavici v přímém kontaktu s extrudovaným materiálem. Skládá se z poháněcího motoru a rotační cívky s navinutou kabelovou výztuží (až 2000 m navinuté výztuže), podobající se běžné cívce filamentu do plastových 3D tiskáren. Aby mohla metoda při výrobě uspět, musí být ohybová tuhost průřezu výztuže co možná nejmenší. Je to z důvodu nutné ohebnosti, která je nedílnou součástí aplikace výztuže při tisku. Další součástí zařízení je potenciometr, který slouží k přizpůsobení rychlosti pokládání k rychlosti pohybu hlavice. Při výzkumu [28] provedly několik testů. Jedním z nich byla i zkouška, u které byla snaha nalézt nejvhodnější průměr výztuže. Nejdříve byl odzkoušen ocelový kabel o průměru 0,4 mm. U toho se ukázalo, že nemá dostatečnou flexibilitu a je příliš tenký. Takže při tisku se zařezával do cementové směsi. Nakonec se nejlépe osvědčily vysokopevnostní ocelové kabely průměru 0,63 - 1.2mm od firmy Bekaert Syncrocord. Tyto kabely vykazovaly vysokou pevnost v tahu za ohybu a dostatečnou pružnost.

2.5.1 Odtrhová zkouška

Pro zjištění soudržnosti cementového kompozitu a výztužného kabelu byla ve výzkumu [28] provedena odtrhová zkouška (Pull-Out Test). Byly vytvořeny dva typy obdélníkových zkušebních těles - beton (C 20/25) a tisknutý cementový kompozit (podobné materiálové vlastnosti jako beton C 12/15). U prvků byly použity 3 průměry ocelových kabelů umístěných uprostřed těles (A- 0,63 mm, B - 0,97 mm a C - 1,2 mm) a 3 různé tloušťky prvků (15 mm, 25 mm a 35 mm).



Obr. 2.26: Sloupcový graf výsledků u metody pokládání kabelové výztuže při tisku znázorňující průměrné odtrhové (smykové) napětí (Pull-out stress) [MPa] odzkoušených těles. První tři sloupce představují litý beton (Cast Concrete) a poslední tři sloupce tisknutý cementový kompozit (3D printed concrete) pro ocelové kabely ((A - 0,63 mm, B - 0,97 mm a C - 1,2 mm). [28]

Zkušební vzorky byly ponechány ve vodní lázni po dobu 14 dní a poté odzkoušeny na přístroji pro odtrhové zkoušky s maximální tahovou silou 5

kN. Výsledky jsou patrné z grafu Obr. 2.26 poukazujícího na maximální odtrhové (smykové) napětí před porušením. Z výsledků zkoušky je patrné, že může být dosažena uspokojivá pevnost vazby mezi ocelovým kabelem a litým betonem. U 3D tisknutých prvků jsou výsledky porovnatelné s hladkými ocelovými pruty [29] v litém betonu. Při porovnání litého a 3D tisknutého materiálu jsou viditelné poměrně výrazné rozdíly. To je pravděpodobně způsobeno složením materiálů.

2.5.2 Čtyřbodová zkouška ohybem

Pro demonstraci pevnosti v tahu za ohybu dané metody byla provedena čtyřbodová zkouška ohybem. Pomocí numerické analýzy založené na rovnosti momentů M_u a M_{cr} , kde $M_u > M_{cr}$, byly navrženy dimenze prvku. M_u představuje ohybový moment úplného selhání prvku, zatímco M_{cr} je ohybový moment při vzniku trhlin. Momenty vyplývají z následujících rovnic:

$$M_u = F_{u,cable} \cdot n \cdot z_{ave}$$

$F_{u,cable}$ = tahová síla v ocelové výztuži [kN]

n = počet kabelů výztuže [-]

z_{ave} = průměrná délka ramene momentu od výztuže brané jako $z_{ave} = 0.9 \cdot d_{ave}$, kde d_{ave} je průměrná vzdálenost výztužného kabelu od vrchní hrany nosníku [mm]

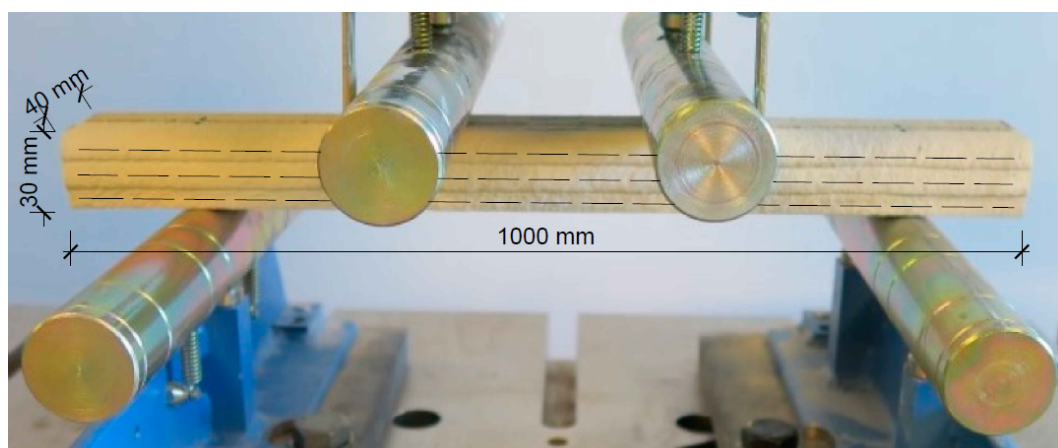
$$M_{cr} = f_{cm} \cdot W = f_{cm} \frac{b \cdot h^2}{6}$$

f_{cm} = střední hodnota pevnosti v tlaku cementového kompozitu [MPa]

b = šířka nosníku [mm]

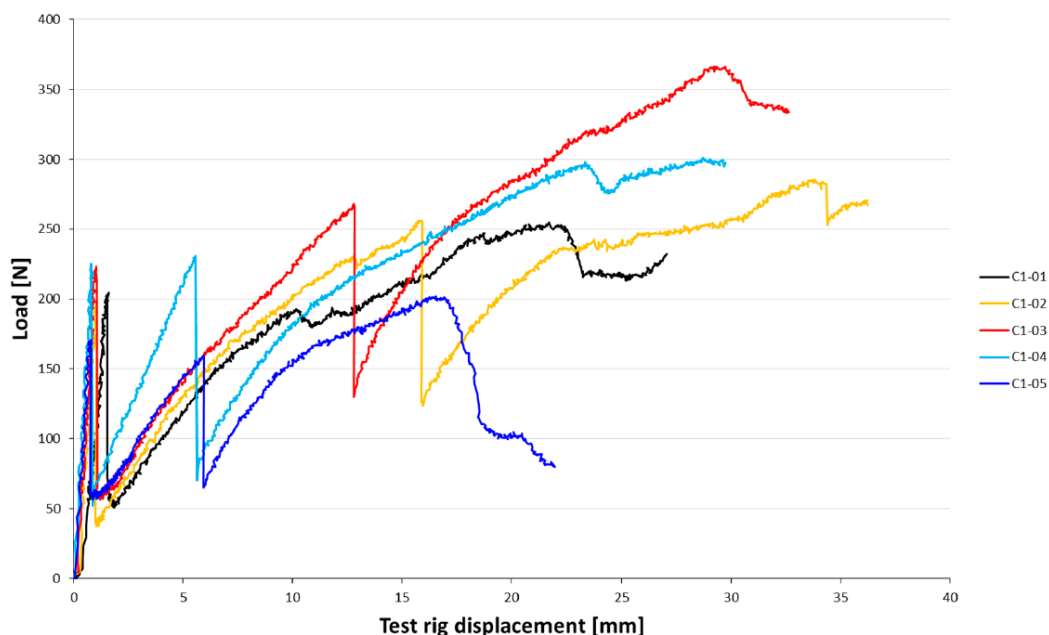
h = výška nosníku [mm]

Stanovené rozměry nosníku byly: šířka = 40 mm, výška = 30 mm, délka = 1000 mm (Obr. 2.27). Byl tedy vytvořen ze tří vrstev tisku na výšku a jedné na šířku. Do každé vrstvy byl při výrobě uložen jeden kabel typu C (o průměru 1,2 mm). Schéma zkoušky je patrné z následujícího obrázku (Obr. 2.27).



Obr. 2.27: Schéma čtyřbodové ohybové zkoušky. Čárkovaně - poloha výztuže ve vrstvách. [29]

Výsledky zkoušky provedené na pěti identických vzorcích jsou uvedené v následujícím grafu závislosti zatížení na průhybu (Obr. 2.28). Všechny kolapsy prvků nastaly v důsledku vyklouznutí výztužných kabelů z cementového kompozitu. Kablely se tedy ani v jednom případě nepřetrhnou. To mohlo být způsobeno vznikajícím vnitřním tlakem na výztuž při zatěžování. Dalším vysvětlením by mohla být napětí ve výztuži v místě zatěžování. Dosáhnou určité hodnoty, která může způsobovat ztrátu soudržnosti a následné vytržení kabelů bez ohledu na jejich kotevní délku. Test byl považován za neúspěšný, jelikož jeho cílem je výztuž přetrhnout a to se nepodařilo. I když vzorky vykazovaly přijatelnou pevnost v tahu za ohybu, jejich soudržnost je neuspokojivá. Další výzkum v této oblasti je do budoucna nutností.



Obr. 2.28: Schéma 4-bodové ohybové zkoušky. Graf závislosti zatížení (Load) [kN] na průhybu (Test rig displacement) [mm] pěti zkoušených vzorků. [29]

2.5.3 Shrnutí a diskuze

V kapitole 1.5 byla představena metoda pokládání kabelové výztuže při tisku z cementových kompozitů. Jejím principem je souběžné pokládání výztuže při tisku konstrukcí. Dochází téměř k úplné eliminaci lidské složky při výstavbě.

Při pohledu na výsledky zkoušek je patrné, že síla vazeb mezi kabelovou výztuží a cementovým filamentem je nízká oproti typickému ocelovému prutu. Prvky vykazovaly velkou výdrž po vzniku trhlin (patrné z nelineární fáze zatěžovaných vzorků v grafu Obr. 2.28), ale nedosáhly bodu přetržení výztuže.

Metoda je ve fázi vývoje a ještě je nutné se vypořádat s popsány problémy. Jedním z možných řešení je vytvořit na ocelových kabelech určitou povrchovou nerovnost (podobnou jako mají běžné ocelové pruty), která by zabránila vytržení a napomohla soudržnosti. Další překážkou je samotný průměr výztuže. Kabel musí být dostatečně flexibilní, aby mohl být

ukládán do tisknutého kompozitu a aby prošel skrz hlavici tiskárny. To by u větších průměrů nebylo možné a metoda by nemohla být použita u výroby masivnějších prvků, u kterých je požadována velká nosnost.

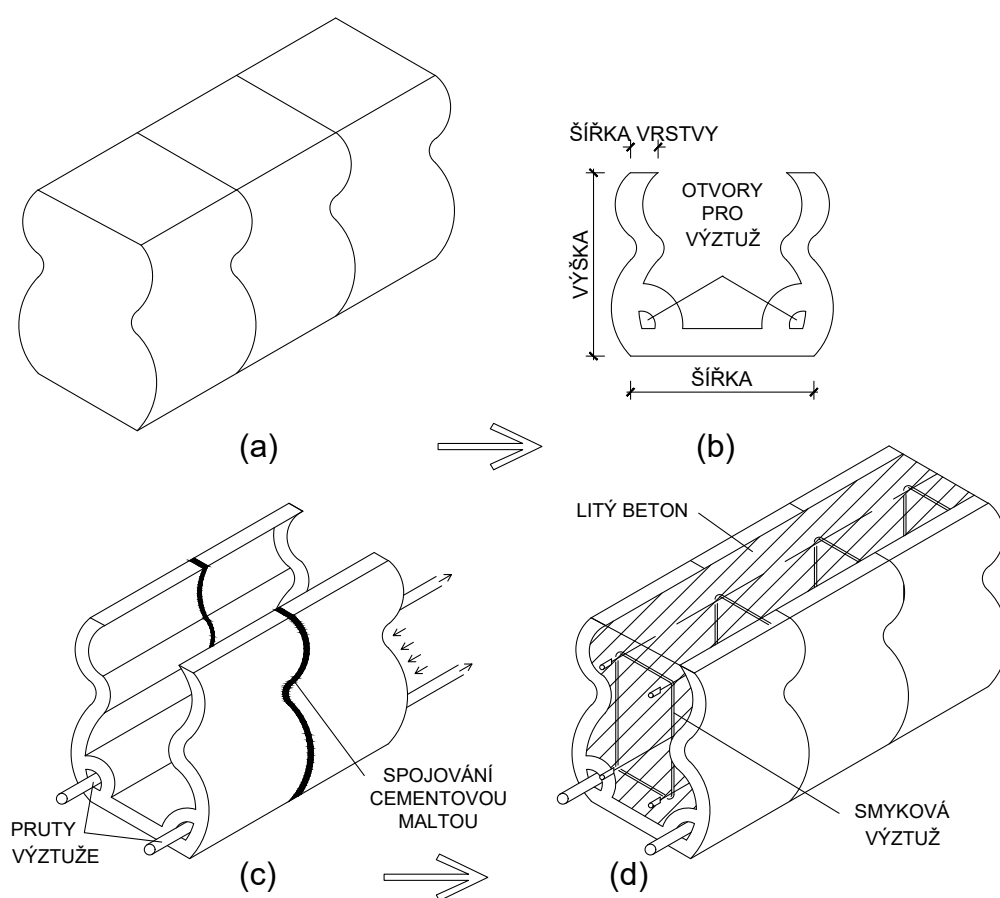
Kapitola 3

Metoda „koráلكových“ nosníků a její začlenění do konstrukce

Jedním z cílů této práce je podnítit vznik nových principů vyztužování 3D-tisknutých prvků. Jako nový koncept je představena metoda „koráلكových“ nosníků. Ta představuje skloubení běžné výroby monolitických staveb s inovativními postupy 3D tisku.

Konstrukce „koráلكového“ nosníku se skládá ze ztraceného bednění realizovaného 3D tiskem a monolitické části z litého betonu. Celý proces výroby začne rozdělením nosníku na jednotlivé segmenty (Obr. 3.1 a) podobně jako v kapitole 2.1 . Jako další krok přichází design průřezu. Průřez by měl být dutý (například ve tvaru U) a disponovat alespoň dvěma otvory v dolní části na pozdější vkládání výztuže (Obr. 3.1 b). Tloušťka stěny je definována možnostmi tiskárny. Je reálné tisknout jednu nebo více vrstev vedle sebe. Po vytvoření segmentů se připraví pruty výztuže odpovídající otvorům v průřezu. Segmenty se na výztuž postupně navlékají a v místech spojů se stmelí cementovou maltou nebo jiným vhodným pojivem (Obr. 3.1 c). Otvory pro výztuž se poté vyplní litým betonem. Po zkompletování požadované délky se nosník vloží na předem určené místo v konstrukci. V této fázi musí být nosník po-

depřen po celé svojí délce (možné je použít určitou formu dřevěné podpůrné stěny), aby nedocházelo k jeho deformaci a ohýbání výztuže. Po usazení se do nosníku vloží smyková výztuž a celý se vyplní běžným betonem (Obr. 3.1 d). Po zatvrdnutí betonu se jako poslední krok odstraní podpora.

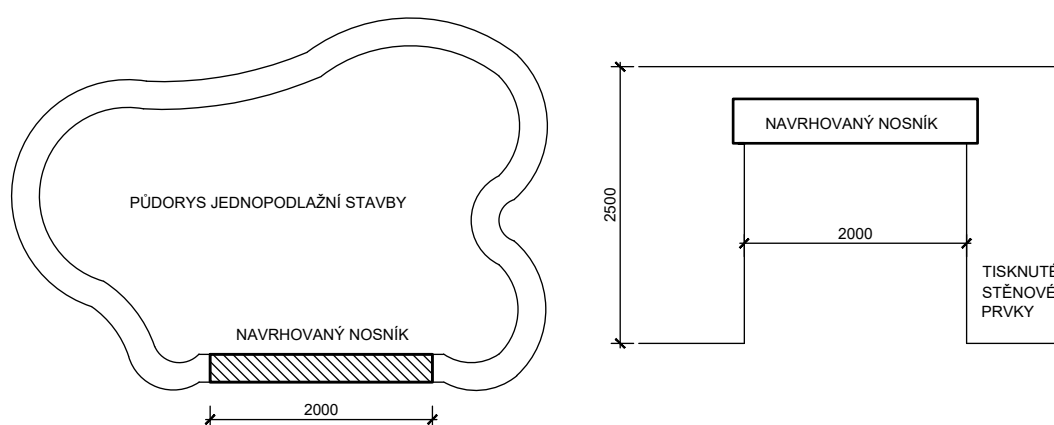


Obr. 3.1: Postup výroby „korálového“ nosníku. a - rozdělení nosníku na segmenty; b - návrh průřezu; c - spojování segmentů; d - vložení smykové výztuže a vyplnění litým betonem

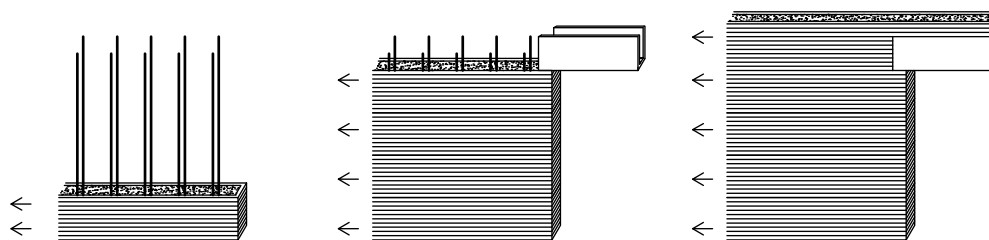
Pro demonstraci aplikace nosníku byla navržena konstrukce jednopodlažního domu se stěnami prováděnými metodou 3D-tisknutého bednění z cementového kompozitu (viz. kapitola 3.1 a příloha).

3.1 Atypická konstrukce jednopodlažního domu

Návrh konstrukce jednopodlažního domu je popsán na (Obr. 3.2). Stěny jsou vyrobené metodou 3D-tisknutého bednění z cementového kompozitu (kapitola 2.4.1). Jedna z možností je tisknout stěnové bednění do určité výšky (například 0,5 m), naklást výztuž po celé jeho délce a vyplnit běžným betonem pouze do zadané výšky. Tento proces (Obr. 3.3) se opakuje až po výšce uložení nosníku. Tisknutím po částech je možné se vyvarovat borcení stěn. Po uložení nosníku se vytiskne zbytek stěn (v rovině s nosníkem a přes něj). Následně se vyplní nosník zároveň s poslední vrstvou bednění stěnových prvků, aby došlo k dobrému spolupůsobení. Další možností je tisknout stěny s vnitřní strukturou, tedy spojování obou stran stěn pomocí vnitřní struktury z cementového kompozitu (Obr. 3.4). Pro stěnové prvky nebyly použity žádné výpočty. Možný postup je dostupný v [25].



Obr. 3.2: Schéma půdorysu (vlevo) a pohledu (vpravo) navrženého jednopodlažního domu.



Obr. 3.3: Postup výroby stěn metodou bednění z cementových kompozitů



Obr. 3.4: Schéma tisknuté stěny s vnitřní strukturou [30]

Navržený přímý nosník má obdélníkový průřez s výškou 400 mm a šířkou 250 mm. Tloušťka stěny tisknutého segmentu je 30 mm. Pro zjednodušení jsou uvažovány stejné materiálové vlastnosti pro litý beton a tisknutý cementový kompozit. V následujícím výpočtu byla navržena ohybová a smyková výztuž pro rozpon 2 m.

3.1.1 Podnět k dalšímu výzkumu

Jedna z možných komplikací je výplň prostoru okolo výztuže. Otvory pro výztuž musejí být o trošku větší než průměr samotných prutů, aby se segmenty mohly navlékat bez větších komplikací. Otvory se poté musí vyplnit litým betonem, aby nedocházelo ke korozi výztuže vlivem vnějšího prostředí. Jednou z možností je vyplňovat otvory před zasunutím prutů. Dále je možné otvory vyplňovat po zasunutí s tím, že se nechá dostatečný prostor pro litý beton.

Byla zmíněna pouze aplikace metody na přímé nosníky. Další použití by bylo možné pro nosníky oblé. Zatím je to pouze spekulace, ale s menší délkou tisknutých segmentů by bylo reálné je navlékat na ohýbané pruty. To by značně zvýšilo potenciál metody ve stavebnictví. Oblé tvary jsou vždy velkou komplikací zejména z důvodu výroby jejich bednění. Zvyšují cenu, dobu výroby a množství pracovní síly. S principem „koráلكových“ nosníků by se všechny tyto faktory snížili na minimum.

STATICKÝ VÝPOČET NAVRŽENÉHO NOSNÍKU

STATICKÝ VÝPOČET NAVRŽENÉHO „KORÁLKOVÉHO“ NOSNÍKU

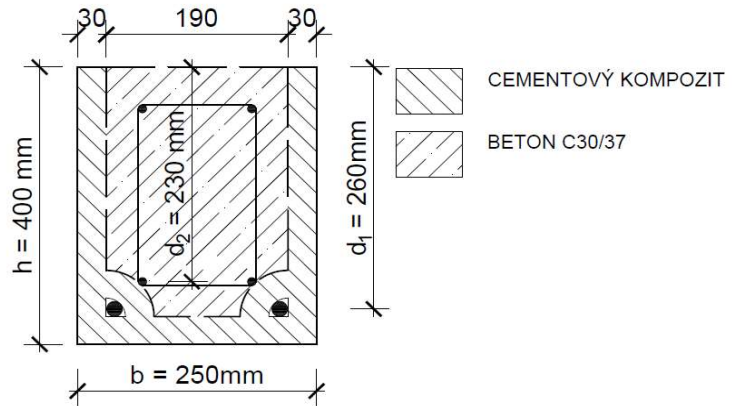
Schématický náčrtek průřezu:

$$b = 0,25 \text{ m}$$

$$h = 0,4 \text{ m}$$

$$d_1 = 0,26 \text{ m}$$

$$c = 0,03 \text{ m}$$



Materiálové vlastnosti:

U cementového kompozitu pro zjednodušení uvažujeme stejné materiálové vlastnosti jako u betonu 40/50.

Beton C40/50 + cementový kompozit:

Ocel B500B:

$$\alpha_{cc} = 1$$

$$\gamma_c = 1,5$$

$$\gamma_s = 1,15$$

$$f_{ck} = 40 \text{ MPa}$$

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \times (f_{ck} / \gamma_c) = 26,67 \text{ MPa}$$

$$f_{ctm} = 3,5 \text{ MPa}$$

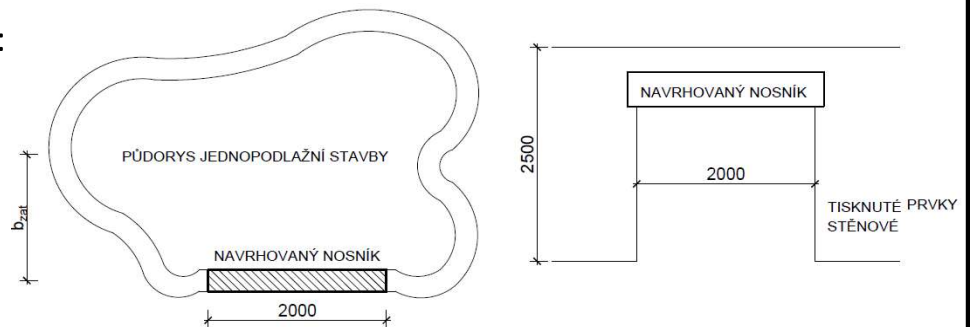
$$E_{cm} = 35 \text{ GPa}$$

$$f_{yk} = 500 \text{ MPa}$$

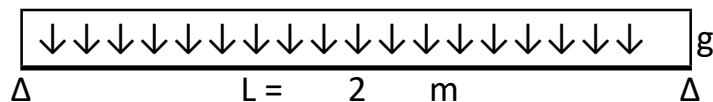
$$f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s = 434,78 \text{ MPa}$$

$$E_s = 200 \text{ GPa}$$

Schéma stavby:



Zatížení a výpočet momentu:



STÁLÉ: vlastní tíha nosníku: $g_1 = b \times h \times 25 = 2,5 \text{ kN/m}$

dřevěná stropní kce: $g_2 = 2 \text{ kN/m}$

Zat. šířka nosník.

$$b_{zat} = 2 \text{ m}$$

UŽITNÉ: ploché střechy: $q_1 = 0,75 \times b_{zat} = 0,75 \times 2 = 1,5 \text{ kN/m}$

sníh: $q_2 = 1,2 \times b_{zat} = 1,2 \times 2 = 2,4 \text{ kN/m}$

$g_k = 4,5 \text{ kN/m}$

$q_k = 3,9 \text{ kN/m}$

užitné zatížení a zatížení střešní kce v tomto případě neuvažujeme

výsledné zatížení: $f = g_k \times 1,35 + q_k \times 1,5 = 11,93 \text{ kN/m}$

moment: $M_{Ed} = (1/8) \times f \times L^2 = 5,96 \text{ kNm}$

STATICKÝ VÝPOČET NAVRŽENÉHO „KORÁLKOVÉHO“ NOSNÍKU

Návrh ohybové výztuže: uvažujeme výztuž $\varnothing 12$ mm

$\eta = 1$

$$\mu = M_{ed} / (b \times (d_1)^2 \times \eta \times f_{cd} \times 10^3) = 0,013$$

interpolací z tabulky 7.1 [1]:

$$\xi = 0,0166 < \xi_{bal} = 0,617 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

$$\zeta = 0,9935$$

$$A_{s1,req} = M_{Ed} / (\zeta \times d_1 \times f_{yd} \times 10^3) = 0,000053 \text{ m}^2$$

Navrženo: $2 \times \varnothing 12; A_{s1} = 2 \times \pi \times r^2 = 0,0002262 \text{ m}^2$

$$A_{s1} = 0,0002 \text{ m}^2 > A_{s1,req} = 0,000053 \text{ m}^2 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

Kontrola vyztužení:

$$\begin{aligned} A_{s,min} &= \max \{ (0,26 \times f_{ctm} \times b \times d_1) / f_{yk}; 0,0013 \times b \times d \} = \\ &= \max(0,0001 \quad ; \quad 0,0000845) = \\ &= 0,0001 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$A_{s1} = 0,0002 \text{ m}^2 > A_{s,min} = 0,000118 \text{ m}^2 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

Posouzení:

$\lambda = 0,8$

$$x = (A_{s1} \times f_{yd} \times 10^3) / (b \times \lambda \times \eta \times f_{cd} \times 10^3) = 0,0184 \text{ m}$$

$$\xi = x/d = 0,0709 < \xi_{bal} = 0,617 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

$$M_{Rd} = A_{s1} \times f_{yd} \times 10^3 \times (d - 0,5 \times \lambda \times x) = 24,844 \text{ kNm}$$

$$M_{Rd} = 24,844 \text{ kNm} > M_{ed} = 5,96 \text{ kNm}$$

\Rightarrow návrh vyhovuje

Navrženo: $2 \times \varnothing 12; A_{s,prov} = 2 \times \pi \times r^2 = 0,0002262 \text{ m}^2$

STATICKÝ VÝPOČET NAVRŽENÉHO „KORÁLKOVÉHO“ NOSNÍKU

Návrh smykové výztuže: Výztužný koš smykové výztuže není uvažován při výpočtu ohybové výztuže. Zvyšuje ohybovou tuhosti, ale nemá velký vliv.

$$V_{Ed} = (1/2) \times f \times L = 11,925 \text{ kN}$$

$$d_2 = 0,23 \text{ m}$$

$$z = 0,9 \times d_2 = 0,207 \text{ m}$$

Pro zvolenou hodnotu $\cot\theta = 2,5$ vychází únosnost tlakové diagonály:

$$v = 0,2$$

$$\min(V_{Rd,max}) = v \times f_{cd} \times 10^3 \times b \times z \times (0,5/1+2,5^2) = 95,1724 \text{ kN}$$

$$\min(V_{Rd,max}) = 95,172 \text{ kN} \geq 11,925 \text{ kN} = |V_{Ed}|$$

= lze navrhnout smykovou výztuž za předpokladu $\cot\theta = 2,5$

Volba: třmínky $\varnothing 6 \text{ mm}$

$$\begin{aligned} \text{vzdálenost třmínků: } s &\leq 0,75 \times d_2 = 0,1725 \text{ m} \\ &0,1725 \text{ m} \leq 0,4 \text{ m} \Rightarrow \text{nerozhoduje} \end{aligned}$$

omezení stupně vyztužení :

$$A_{sw} = \pi \times r^2 = 28,274 \text{ mm}^2$$

$$\rho_w = A_{sw}/(b \times s) = \rho_{w,min} = (0,08 \times f_{ck}^{(1/2)})/f_{yk} = 0,00101$$

$$\text{z toho vyplívá : } s \leq (A_{sw} \times 10^{-6})/(b \times \rho_{w,min}) = 0,11176 \text{ m}$$

$$\text{Návrh: } s = 0,11 \text{ m}$$

$$V_{Rd,s} = (A_{sw} \times 10^{-6} \times f_{yd} \times 10^3 \times z \times \cot\theta)/s = 111,76 \text{ kN}$$

Rozhodující posouvající síla při přímém uložení je ve vzdálenosti d_2 od líce uložení.

$$V_{Ed,r} = V_{Ed} - f \times (d_2 + 0,15) = 7,3935 \text{ kN}$$

$$V_{Ed,r} = 7,3935 \text{ kN} < V_{Rd,s} = 111,76 \text{ kN}$$

Vyhoví třmínky $\varnothing 6 \text{ mm}$ po 110 mm po celé délce prvku.

STATICKÝ VÝPOČET NAVRŽENÉHO „KORÁLKOVÉHO“ NOSNÍKU

Ověření přetvoření kontrolou ohybové štíhlosti:

Materiály:

Beton C40/50 + cementový kompozit:

$$f_{ck} = 40 \text{ MPa}$$

$$f_{cd} = 26,67 \text{ MPa}$$

Ocel B500B:

$$f_{yk} = 500 \text{ MPa}$$

$$f_{yd} = 434,78 \text{ MPa}$$

$$E_s = 200 \text{ GPa}$$

Ověření průhybu:

$$L/d_1 < \lambda_d = \kappa_{c1} \times \kappa_{c2} \times \kappa_{c3} \times \lambda_{d,tab}$$

$$\rho = A_{s,prov}/(b \times d_1) = 0,0035 = 0,35\%$$

z tab. 16.1 [1] pro nosník prostě podepřený stanovíme:

$$\lambda_{d,tab} = 20$$

$$\kappa_{c1} = 1 \quad (\text{obdélníkový průřez})$$

$$\kappa_{c2} = 1 \quad (\text{rozpětí je menší než 7 m})$$

$$\kappa_{c3} = (500 \times A_{s,prov})/(f_{yk} \times A_{s,req}) = 4,2606$$

Z hodnoty κ_{c3} je patrné, že průhyb v tomto případě nebude rozhodovat.

Další výpočet není nutný.

$$\lambda_d = \kappa_{c1} \times \kappa_{c2} \times \kappa_{c3} \times \lambda_{d,tab} = 85,211$$

$$L/d_1 = 7,6923 < \lambda_d = 85,211 \Rightarrow \text{průhyb vyhoví}$$

STATICKÝ VÝPOČET NAVRŽENÉHO „KORÁLKOVÉHO“ NOSNÍKU

Omezení napětí:

$$g_k = 4,5 \text{ kN/m}$$

Kombinace zatížení:

$$q_k = 3,9 \text{ kN/m}$$

obytné plochy:

$$\psi_2 = 0,3$$

kvazistálá kombinace zatížení:

$$f_{kv} = \Sigma g_k + \psi_2 \times q_k = 5,67 \text{ kN/m}$$

ohybový moment uprostřed rozpětí při kvazi. komb. zatížení:

$$M_{E,qp} = (1/8) \times f_{kv} \times L^2 = 2,835 \text{ kNm} = 0,0028 \text{ MNm}$$

charakteristická kombinace zatížení:

$$f_k = \Sigma g_k + q_k = 8,4 \text{ kN/m}$$

ohybový moment uprostřed rozpětí při char. komb. zatížení:

$$M_{E,k} = (1/8) \times f_k \times L^2 = 4,2 \text{ kNm} = 0,0042 \text{ MNm}$$

Geometrické charakteristiky průřezu bez trhlin - ideální průřez plně půs.:

plocha průřezu:

$$A_c = h \times b = 0,1 \text{ m}^2 \quad \alpha_e = E_s/E_{cm} = 5,7143$$

plocha ideálního průřezu:

$$A_l = A_c + \alpha_e \times A_{s1} = 0,1013 \text{ m}^2$$

vzdálenost těžiště ideálního průřezu od horního okraje:

$$a_l = [A_c \times a_c + \alpha_e \times (A_{s1} \times d_1)]/A_l = 0,2008 \text{ m}$$

moment setrvačnosti ideálního průřezu k jeho těžišti

$$I_l = I_c + A_c \times (a_l - a_c)^2 + \alpha_e \times [A_{s1} \times (d - a_l)^2] = 0,00133793 \text{ m}^4$$

ohybový moment při vzniku trhlin:

$$M_{cr} = f_{ctm} \times [I_l / (h - a_l)] = 0,0235 \text{ MNm} > M_{E,qp} = 0,0028 \text{ MNm}$$

=> trhliny se za těchto podmínek neočekávají

$$a_c = h/2 =$$

$$0,2 \text{ m}$$

STATICKÝ VÝPOČET NAVRŽENÉHO „KORÁLKOVÉHO“ NOSNÍKU

Průřez s trhlinami (vyloučený tah v betonu, namáhání ohybovým momentem):

vzdálenost neutrální osy od tlačného okraje:

$$x_{cr} = (\alpha_e/b) \times A_{s1} \times \{-1 + [1 + (2 \times b \times A_{s1} \times d_1)/(\alpha_e \times A_{s1}^2)]\} = 0,0469 \text{ m}$$

moment setrvačnosti trhlinou oslabeného průřezu:

$$I_{II} = (1/3) \times b \times x_{cr}^3 + \alpha_e \times [A_{s1} \times (d_1 - x_{cr})^2] = 0,0000673 \text{ m}^4$$

Posouzení napětí v betonu a v výztuži:

napětí v betonu při kvazistálé kombinaci zatížení:

$$\sigma_c = (M_{E,qp}/I_{II}) \times x_{cr} = 1,9774 \text{ MPa} < 0,45 \times f_{ck} = 18 \text{ MPa}$$

Napětí v tlačném betonu při kvazistálé kombinaci zatížení nepřekročilo hodnotu $0,45 \times f_{ck}$. Požadavek mezního stavu omezení napětí byl splněn.

napětí ve výtuži pro charakteristickou kombinaci zatížení:

$$\sigma_s = \alpha_e \times (M_{E,k}/I_{II}) \times (d - x_{cr}) = 75,99 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_s = 75,99 \text{ Mpa} < 0,8 \times f_{yk} = 400 \text{ Mpa}$$

Napětí ve výtuži při charakteristické kombinaci zatížení nepřekročilo hodnotu $0,8 \times f_{yk}$. Požadavek mezního stavu omezení napětí byl splněn.

Omezení šířky trhlin bez přímého výpočtu pomocí tab. 15.1 [1]:

Při posouzení maximálního průměru prutu pomocí spočítaného napětí ve výtuži $\sigma_s = 75,99 \text{ MPa}$ bylo zjištěno, že $\emptyset 12$ jsou dostačující pro omezení šířky trhlin.

Závěr

V rámci této bakalářské práce byl proveden souhrn možných metod vyztužování prvků z cementových kompozitů realizovaných 3D tiskem. Práce by měla sloužit jako předloha pro budoucí výzkumy ve zmíněné oblasti. Soustředí se nejen na představení samotných principů vyztužování takto zhotovených konstrukcí, ale i na zdůraznění překážek, které jsou při jejich aplikaci kladeny.

Při zamyšlení nad budoucím užitím má metoda výroby bednění z cementových kompozitů největší potenciál. Kombinuje jednoduchost procesu tisku bednění s komplexností tvarů výsledné konstrukce. Zároveň je šetrná k životnímu prostředí, jelikož rapidně snižuje množství odpadního materiálu ze stavby. Před použitím je nutné se zaměřit na problematiku borcení vrstev, vybočení a plastického kolapsu zmíněných v kapitole 2.4 a kapitole 3. Tyto faktory jsou v současnosti největší výzvou. Jako další metoda s praktickým využitím se jeví metoda Smart Dynamic Casting (SDC). Ta slouží k výrobě zejména sloupových prvků s nepravidelnými průřezy měnícími se po celé výšce prvku. Představuje efektivní způsob eliminace bednění za účelem snížení ceny a intervalu výroby. Konstrukce tiskárny SDC bude možné používat jak pro pre-fabrikaci, tak i pro užití in situ. Její nepraktičnost spočívá v omezení rozměrů vytvořených prvků. Z důvodu tlaku, kterým působí cementový kompozit na flexibilní membránu bednění je zatím nereálné vytisknout sloupy o větších plochách průřezů.

V ostatních metodách, jako aplikace externí výztuže pro nosníky, Sparse Concrete Reinforcement in Meshworks (SCRIM) nebo kladení výztužného kabelu při tisku, jde o kontroverzní témata s velkým množstvím nezodpovězených otázek. Slouží spíše jako inspirace určené pro podnícení nových idejí v oblasti vyztužování prvků z cementových filamentů realizovaných 3D tiskem.

Ve třetí kapitole byl navržen nový princip, zakládající se na navlékání segmentů z cementového kompozitu na ocelové pruty výztuže. Metoda by mohla být v budoucnu užívána k výrobě nosníků nepravidelných tvarů. Rozdělením na segmenty se mohou již předpřipravené nosníky přizpůsobit různým rozponům konstrukcí přímo na stavbě. Jejich výroba je jednoduchá a výsledný prvek by se únosností neměl lišit od běžných železobetonových nosníků.

3D tisk nemá zatím velké zastoupení ve stavebním průmyslu. Rychlost, kterou technologie postupuje, je obrovská. Je tedy pravděpodobné, že se inovativní metody vyztužování prvků realizovaných 3D tiskem budou využívat stále častěji.

Bibliografie

- [1] Alena Kohoutková, Jaroslav Procházka a Jitka Vašková. *Navrhování železobetonových konstrukcí: příklady a postupy*. České vysoké učení technické, 2014.
- [2] 2019. URL: <http://www.earch.cz/cs/stavitelstvi/technologie-3d-tisku-v-architekture-stavebnictvi>.
- [3] 2019. URL: <https://3dprint.com/116199/fossilized-concrete-printing/>.
- [4] *3D Printing Concrete*. URL: <https://a3511.wordpress.com/2018/09/20/3d-printing-concrete/>.
- [5] Taylor Barnett et al. *This 10,000 3D-Printed Concrete House Took Only 24 Hours to Build*. 2019. URL: <https://interestingengineering.com/this-10000-3d-printed-concrete-house-took-only-24-hours-to-build>.
- [6] John Newman. *Architecture Experiments with Additive Manufacturing - Digital Engineering*. 2019. URL: <https://www.digitalengineering247.com/article/architecture-experiments-with-additive-manufacturing>.
- [7] 2019. URL: <https://www.archdaily.com/773012/3d-printed-arabesque-wall-features-200-million-individual-surfaces>.

- [8] Domenico Asprone et al. “3D printing of reinforced concrete elements: Technology and design approach”. In: *Construction and Building Materials* 165 (2018), s. 218–231.
- [9] 2019. URL: http://www.winsun3d.com/En/Product/pro_inner/id/1.
- [10] Jasmin Chua a Jasmin Chua. *World’s first 3D-printed pedestrian bridge pops up in Madrid*. 2019. URL: <https://inhabitat.com/worlds-first-3d-printed-pedestrian-bridge-pops-up-in-madrid/>.
- [11] Manuel Hambach, Matthias Rutzen a Dirk Volkmer. “Properties of 3D-printed fiber-reinforced Portland cement paste”. In: *3D Concrete Printing Technology*. Elsevier, 2019, s. 73–113.
- [12] Biranchi Panda, Suvash Chandra Paul a Ming Jen Tan. “Anisotropic mechanical performance of 3D printed fiber reinforced sustainable construction material”. In: *Materials Letters* 209 (2017), s. 146–149.
- [13] Susanne Christ et al. “Fiber reinforcement during 3D printing”. In: *Materials Letters* 139 (2015), s. 165–168.
- [14] Ena Lloret-Fritschi et al. “Challenges of Real-Scale Production with Smart Dynamic Casting”. In: *RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication*. Springer. 2018, s. 299–310.
- [15] Phil Ayres et al. “SCRIM–Sparse Concrete Reinforcement in Meshworks”. In: *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design*. Springer. 2018, s. 207–220.
- [16] Fabio Scotto et al. “Adaptive Control System for Smart Dynamic Casting”. In: *Learning, Adapting and Prototyping-Proceedings of the 23rd CAADRIA Conference, Tsinghua University, Beijing, China, 17-19 May 2018*. Sv. 1. CumInCAD. 2018, s. 255–264.

- [17] Ena Lloret Fritschi et al. “Smart dynamic casting: slipforming with flexible formwork-inline measurement and control”. In: *HPC/CIC Tromsø 2017* (2017), Paper-no.
- [18] 2019. URL: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/964>.
- [19] Marc Schultheiss et al. “Feedback control of Smart Dynamic Casting through formwork friction measurements”. In: *SCC 2016-8th International Rilem Symposium on Self-Compacting Concrete, Flowing toward Sustainability*. RILEM Publications. 2016, s. 637–644.
- [20] Domenico Asprone et al. “Rethinking reinforcement for digital fabrication with concrete”. In: *Cement and Concrete Research* (2018).
- [21] Thanh T Le et al. “Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete”. In: *Materials and structures* 45.8 (2012), s. 1221–1232.
- [22] Norman Hack et al. “Mesh mould: differentiation for enhanced performance”. In: (2014).
- [23] Hannah Bensoussan. *XtreeE Imprime du Béton en 3D et Pousse les Limites de la Construction*. 2019. URL: <https://www.sculpteo.com/blog/fr/2016/12/07/interview-avec-xtreee-imprimer-du-beton-en-3d-pour-pousser-les-limites-de-larchitecture/>.
- [24] 2019. URL: <https://wohlersassociates.com/blog/2015/10/3d-printed-buildings/>.
- [25] ASJ Suiker. “Mechanical performance of wall structures in 3D printing processes: Theory, design tools and experiments”. In: *International Journal of Mechanical Sciences* 137 (2018), s. 145–170.
- [26] 2019. URL: <http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/forschung/221.html>.

- [27] Norman Hack et al. “Mesh Mould: Robotically fabricated metal meshes as concrete formwork and reinforcement”. In: *Proceedings of the 11th International Symposium on Ferrocement and 3rd ICTRC International Conference on Textile Reinforced Concrete, Aachen, Germany*. 2015, s. 7–10.
- [28] Freek Bos et al. “Experimental exploration of metal cable as reinforcement in 3D printed concrete”. In: *Materials* 10.11 (2017), s. 1314.
- [29] J Humbert, J Baroth a Laurent Daudeville. “Probabilistic analysis of a pull-out test”. In: *Materials and structures* 43.3 (2010), s. 345–355.
- [30] *First prototypes: 3D printed concrete wall 2 — XtreeE*. URL: <https://www.xtreee.eu/2015/08/19/first-prototypes-3d-printed-concrete-wall-2/>.