ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ

STUDIE CHOVÁNÍ STĚN ZHOTOVENÝCH ADITIVNÍ TECHNOLOGIÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
2022

Panajotis Marios Elia

Vypracoval:	**Panajotis Marios Elia**
Vedoucí práce:	**Ing. Josef Novák, Ph.D.**
Studijní program:	**Stavební inženýrství**
Studijní obor:	**Konstrukce pozemních staveb**

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta stavební
Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Elia Jméno: Panajotis Marios Osobní číslo: 486051

Zadávající katedra: Katedra betonových a zděných konstrukcí

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Studie chování stěn zhotovených aditivní technologií

Název bakalářské práce anglicky: Study on the behaviour of printed concrete walls

Pokyny pro vypracování:

Souhrn aktuálních poznatků k chování stěn zhotovených aditivní technologií - základní informace o aditivní technologii včetně příkladů výstavby tištěných objektů, technologie výroby stěn - prefabrikované konstrukce/monolitické konstrukce, podstata chování stěn, struktura stěn, styky stěn, Předběžný konstrukční návrh vybraného stěnového prvku.

Seznam doporučené literatury:

Odborné články z vědeckých databází - např. Science Direct.

Jméno vedoucího bakalářské práce: Ing. Josef Novák, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: 24.02.2022 Termín odevzdání BP v IS KOS 15.05.2022

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

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".

24. 2. 2022

Datum převzetí zadání Podpis studenta(ky)

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá 3D tiskem betonových konstrukcí. Prvním cílem bylo zpracovat rešerši. Ta obsahuje shrnutí podstaty aditivní technologie, nejčastěji užívané metody a popisuje chování tištěných objektů v závislosti na různých faktorech. Dále se zaměřuje na stěnové prvky. Popisuje a porovnává monolitické stěny s těmi prefabrikovanými, přičemž je snaha poukázat na specifika tištěných konstrukcí. Druhým cílem práce bylo zpracovat návrh stěnového prvku a zjistit, do jaké míry je možné využít současně používané platné normy. Za účelem posouzení stěny byly sestaveny 2 návrhové metody založené na odlišných předpokladech. Na základě uvedených hypotéz byl sestaven výpočetní program v MS Excel, ve kterém byl vypracován posudek.

KLÍČOVÁ SLOVA

Beton, aditivní technologie, 3D tisk, stěny, metodika navrhování stěn.

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with 3D printing of concrete structures. The first goal was to conduct a search. It contains a principles of additive manufacturing, the most commonly used methods and it describes the behavior of printed objects depending on various factors. It also focuses on wall elements. It describes and compares monolithic walls with prefabricated ones, while the effort is to point out the specifics of printed structures. The second goal of the work was to design a wall element and find out to what extent it is possible to use currently used valid standards. In order to design the wall, 2 design methods based on different assumptions were compiled. Based on the listed hypotheses, a computer program in MS Excel was compiled, in which a report was made.

KEYWORDS

Concrete, aditive manufacturing,3D printing, walls, methodology of a structural design.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně. Podklady, ať už se jedná o odbornou literaturu, technické normy, internetové články atd. jsou uvedeny v seznam použitých zdrojů.

Při práci jsem se řídil metodického pokynu č.1/2009 O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne ....

Panajotis Marios Elia

Poděkování

Mé poděkování patří zejména panu doktorovi Josefu Novákovi za odborné vedení, užitečné rady a ochotu, kterou mi v průběhu zpracování bakalářské práce věnoval. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za to, že mi umožnili studovat a po celou dobu studia mě psychicky a finančně podporovali. Děkuji taky svým přátelům, kteří mě zde na ČVUT provázeli po celou dobu studia a v neposlední řadě také mé přítelkyni.

Obsah

1. Úvod ... 9
2. Aditivní technologie ... 11
2.1 Podstata aditivní technologie ... 12
2.2 Konstrukce tištěné z cementových kompozitů ... 13
2.2.1 Metody využívající extruzi ... 13
2.2.2 Metoda založená na injektáži do štěrkového lože ... 14
3. Chování objektů zhotovených aditivní technologií ... 16
3.1 Souřadný systém konstrukcí vyrobených aditivní technologií ... 16
3.2 Zkoušky v tlaku ... 17
3.2.1 Závislost pevnosti na čase ... 17
3.2.2 Výsledky zkoušek v tlaku a způsoby porušení ... 18
3.2.3 Vliv časové prodlevy na pevnost v tlaku ... 21
3.2.4 Vliv rozptýlené výztuže na pevnost v tlaku ... 23
3.3 Zkoušky v tahu za ohybu ... 23
3.3.1 Vliv rozptýlené výztuže na pevnost v tahu za ohybu ... 25
4. Stěnové prvky ... 26
4.1 Namáhání stěnových prvků ... 26
4.2 Monolitické stěny ... 26
4.2.1 Stykování prvků ... 26
4.3 Prefabrikované stěny ... 34
4.3.1 Stykování prvků ... 34
4.3.2 Návrhové stavy ... 35
4.4 Stěny zhotovené aditivní technologií ... 36
4.4.1 Způsoby porušení v raném stádium ... 36
4.4.2 Způsoby porušení stěn po vytvrdnutí betonu ... 39
4.4.3 Stěnové struktury ... 40
4.4.4 Stroje určené k tisku ... 43
5. Popis konstrukce ... 46
5.1 Konstrukční schémata ... 47
5.2 Posuzovaná stěna ... 49
5.3 Popis materiálů nosných konstrukcí ... 49
6. Zatížení ... 49
6.1 Vodorovné zatížení ... 49
6.2 Svislé zatížení ... 50
6.3 Zatížení větrem ... 50

6.4 Zatížení sněhem 51
6.5 Stanovení účinků zatížení na posuzovanou stěnu 51
7. Výpočet 53
7.1 Analýza konstrukce 53
7.2 Návrhové postupy 54
7.2.1 Metoda A – tahové trhliny vyloučeny 55
7.2.2 Metoda B – tahové trhliny připuštěny 57
7.2.3 Porovnání metod 60
7.3 Zadání vstupních hodnot do výpočtového programu v MS Excel 62
7.4 Posouzení 63
8. Závěr 65
Seznam použité literatury 68
Použité normy a předpisy 71
Seznam obrázků 72
Seznam příloh 73

1. Úvod

Sektor stavebnictví se v posledních letech potýká s mnohými výzvami. Jedná se zejména o nedostatek kvalifikované pracovní síly a zvyšující se ceny stavebních materiálů. Nedostatek pracovní síly by bylo možné v budoucnu do jisté míry kompenzovat automatizací. Míra automatizace je však v sektoru stavebnictví v porovnání se sektorem průmyslu (strojírenství) mnohem menší. Jako jedna z možností se nabízí využití 3D tisku, který je dnes hojně rozšířen a běžně používán v mnoha odvětvích, jako je například strojírenství. V posledních letech se pak nejvíce pozornosti věnuje 3D tisku betonových konstrukcí. Přestože tato technologie dosáhla v nedávné minulosti významného pokroku, je stále ve fázi vývoje a zůstává zde stále mnoho nedořešených otázek, na které bude mimo jiné v průběhu práce upozorněno.

První, teoretická část popisuje podstatu aditivní technologie a specifika tisku cementových kompozitů. Pro bližší pochopení rozdílu mezi tištěnými a konvenčně prováděnými konstrukcemi byla do této práce zařazena kapitola popisující chování objektů zhotovených aditivní technologií. V této kapitole jsou popsány výsledky zkoušek a jak různé faktory ovlivňují výsledné chování vzorků. Tato kapitola je prvním krokem k pochopení komplexnějšího chování stěnových struktur a popisuje specifika a nevýhody plynoucí z využití této technologie. Následně se teoretická část věnuje stěnovým prvkům. Popisuje specifika provádění prefabrikovaných a monolitických konstrukcí, přičemž upozorňuje na odlišnosti mezi konvenčně prováděnými a tištěnými stěnami. Cílem teoretické části je shrnout dosavadní poznatky z oblasti 3D tisku se zaměřením na stěnové prvky, jejich chování a provádění.

Druhá, praktická část obsahuje komentovaný statický výpočet tištěné stěny. Cílem práce bylo ověřit použitelnost stávajících platných norem a nastínit metodiku návrhu a posouzení tištěných konstrukcí.

K tématice 3D tisku cementových kompozitů lze dohledat jen omezené množství zdrojů, a proto značná část práce vychází ze zahraničních článků uvedených ve vědeckých databázích Sciencedirect and Researchgate. Inspirací byly rovněž videa z různých webových stránek, která obvykle poukazovala na praktické využití technologie. Při konstrukčním návrhu stěnového prvku v praktické části byly využity současně používané metody pro navrhování běžných konstrukcí, které byly převzaty ze skript a platných norem.

Důvodem, proč jsem si zvolil dané téma je vzrůstající popularita a zájem o využití technologii 3D tisku ve stavebnictví. Prvním podnětem pro volbu tohoto tématu však bylo, že se mi naskytla možnost podílet se jako konstruktér na projektu prvního 3D tištěného domu v ČR. Ačkoliv je tato technologie v ČR na počátku, předpokládám, že se s ní v budoucnu budeme setkávat běžně. Vezme-li se v potaz, že neexistuje mnoho inženýrů, kteří mají s touto problematikou zkušenosti, tak je pro mě znalost tohoto odvětví na pracovním trhu konkurenční výhodou.

TEORETICKÁ ČÁST

2. Aditivní technologie

V dnešní době je beton celosvětově nejpoužívanější stavební materiál s mnoha přednostmi. Jedním z hlavních důvodů, proč je tento stavební materiál tak oblíbený, je cenová výhodnost surovin potřebných na jeho výrobu a fakt, že se dají těžit na většině míst po celém světě. Ačkoliv se jedná o relativně levné suroviny, výsledný produkt (beton), dosahuje výborných mechanických vlastností, je odolný vůči požáru a díky svému pseudo-plastickému chování v čerstvém stavu umožňuje zhotovit konstrukce složitých tvarů.

Nehledě na veškeré výhody, kterými beton, jako materiál nosných prvků, disponuje, čelí hned několika výzvám. V současnosti se nezávisle na technologii výroby (*in-situ = monolitický beton* nebo *precast = prefabrikovaný beton*) nejčastěji vyrábí beton vyztužený betonářskou výztuží nebo beton předepnutý předpínací výztuží, přičemž dochází k betonování do bednění, ve kterém je předem vyvázaná výztuž. Praktické uplatnění železobetonu s sebou ovšem přináší vysoké úsilí při armování a betonáži. To může ve výsledku vést ke zdravotním problémům způsobeným nedodržováním BOZP, což může mít za následek například vystavení cementovému prachu, úrazy nebo chemické popálení tekutým betonem. Kromě zdravotní rizikovosti při budování monolitických konstrukcí, je nevýhodou nutnost využívání bednění. To se může pomítnout až jako 50 % z celkové ceny. [1]

Druhý faktor, který v dnešní době nabývá na důležitosti, je produkce oxidu uhličitého, který vzniká jako produkt velmi energeticky náročné výroby cementu a zároveň se uvolňuje při vytvrzování betonu (hydratační reakce). V závislosti na metodách výpočtu se odhaduje, že cementářský průmysl je odpovědný za 5% globální emise nejznámějšího uhlíkového plynu. [2] Zavedení užívání příměsí a náhrad za cement, které umožňují průběh hydratační reakce, jako je popílek, pomohlo snížit uhlíkovou stopu pouze minimálně.

Třetí faktor, se kterým se betonářský průmysl potýká, je způsob, jakým materiál využíváme. Z historického hlediska je patrné, že se mění poměr ceny za materiál a za pracovní sílu. Srovnáme-li historické údaje s poměry současnosti je patrné, že v dnešní době je dražší právě složka pracovní síly. Z tohoto důvodu se klade důraz spíše na tvarovou jednoduchost, nežli na nalezení tvarově optimální geometrie, která by sice ušetřila materiál, ale zkomplikovala by proces výstavby bednění, který je časově i finančně náročný. [3]

S novými metodami 3D tisku, jako je aditivní technologie, se začalo experimentovat již v 90. letech minulého století a mohli by vést k řešení zmíněných problematik, ale i vnést do odvětví nový pohled na design a architekturu, jelikož nabízí zásadní urychlení výstavby a redukci nutné pracovní síly. Ačkoliv zájem o problematiku rychle stoupá a věnuje se jí celá řada univerzitních pracovišť a podnikatelů, objem informací je stále omezený a s nadhledem lze říct, že jsme v začátcích. Jedním z důvodů, proč se vývoj neposouvá rychleji, je velké množství faktorů vyvstávajících při výrobě, které mají vliv na výsledky zkoušek a zhoršenou možnost porovnávání výstupů studií. Příkladem můžou být například rozdílné betonové směsi pro tisk, které musí společně s technologií tisku (rychlost a trajektorie hlavy) splňovat požadavky směsi na tisknutelnost. Aby bylo možné vytisknout vzorek je třeba celou tuto řadu dílčích procesů sladit do výsledného technologického procesu, který bývá často „firemním know-how".

Rozdíl mezi použitými směsmi může v důsledku znamenat například jinou rychlost tisku, která má vliv na pevnost rozhraní mezi filamenty a vrstvami. Pomaleji tisknuté směsi mohou mít následně menší únosnosti. [2], [4], [3]

Od počátků vývoje se 3D tisk potýkal s mnohými názory, že se nejedná o vhodnou technologii, která by se dala využít k výstavbě obytných domů, a to zejména z toho důvodu, že v počátcích vývoje nebyly k dispozici velkorozměrové tiskárny. Mnoho výzkumníků zastávalo názor, že velikost 3D tiskárny je hlavní limitace technologie. Kromě velikosti tiskáren se vedly diskuse ohledně materiálu, který by měl být tisknut. Byly publikovány studie, které poukazovaly na to, že únosnost a stabilita konstrukcí, z tehdy tisknutých materiálů, by mohla znemožnit uplatnění ve větším měřítku. Jako jeden z prvních tisknutých materiálů byla použita překvapivě omítka, která se uplatnila zejména kvůli své cenové dostupnosti, nízké hmotnosti, rychlému vytvrzení a snad i faktu, že zde byla zkušenost se strojním omítáním. Nevýhodou omítky však byla nízká únosnost ve vlhkém stavu a smrštění přesahující 3 %. Nicméně s postupem času se podařilo navrhnout takové betonové směsi, které dokážou splnit požadavek na extruzi potrubím 3D tiskárny, což je dáno speciálním poměrem plastifikátorů a urychlovačů tuhnutí. Tyto směsi mají dostatečné stavěcí parametry, čímž je myšlena schopnost tisknutého filamentu udržet další vrstvy aniž by došlo ke kolapsu. Nedávno vyvinuté směsi vykazovaly pevnost v tlaku až 107 MPa, a tak bylo a je na základě této hodnoty možné usuzovat, že je možné tuto technologii využít v pozemním stavitelství. Jedním z prvních, kdo tento předpoklad prokázal, byl v roce 2014 tým inženýrů a architektů z firmy WinSun, který dokázal za pomocí velkorozměrové tiskárny o rozměrech 150x10x6,6 m, vytisknout svislé nosné konstrukce 10 obytných rodinných domů za méně než 24 hodin. [2], [5]

2.1 Podstata aditivní technologie

V rámci aditivní fabrikace se v praxi setkáváme hned s několika pojetími, metodami a používanými materiály. Proces výroby začíná vytvořením 3D modelu CAD softwaru, který je následně konvertován do STL formátu. Tento výstup je zpracován specifickými softwary, které rozvrství objekt na vrstvy. Dochází k převodu digitálního modelu na seznam příkazů a instrukcí, které tiskárna potřebuje ke své práci. [1]

V literatuře se můžeme setkat s vícero dělením 3D tisku. Dle [1] existuje 6 hlavních skupin.

Extruze materiálu – Fused deposition modeling (FDM)
Tato metoda je v současnosti běžně používaná pro plasty. Je to nejpopulárnější a nejméně cenově náročná technologie. Spočívá v roztavení materiálu, po kterém okamžitě následuje extruze. Tiskárna obvykle disponuje 2 hlavami. Tou první proudí materiál objektu a tou druhou podpůrný materiál, který se po zatvrdnutí odstraní. [1], [6]

Fotopolymerizace – Stereolitografie (SLA)
Jedná se o technologii založenou na vytvrzování polymeru citlivého na světelné záření. Nejčastěji užívaným druhem záření je ultrafialové záření vysílané formou laseru. Záření iniciuje buďto polymerizaci nebo vytvrzení.

Tryskání materiálu – Material jetting (MJ)
Dochází k postupnému ukládání kapek materiálu do vrstev. Obvykle se užívají fotosensitivní pryskyřice nebo roztavené materiály, které vytvrzují při pokojové teplotě.

Tryskání pojiva – Binder jetting (BJ)
Tekutá pojiva jsou nanášena do vrstev agregátu.

Tavení a přímá aplikace energie neboli powder bed fusion – Direct metal laser sintering (DMLS)
Proces tisku spočívá v nanesení tenké vrstvy prášku – nejčastěji kovového. Pomocí přesně zamířeného laserového paprsku dochází k roztavení prášku, který se díky tepelné vodivosti „speče" s předchozí vrstvou. Po dokončení cyklu se sníží deska, na kterou se objekt tiskne, nanese se další vrstva prášku a koloběh se opakuje.

Laminace vrstevnatého materiálu
Jedná se o metodu krájení a vrstvení. Objekt je vyráběn z mnoha tenkých plíšku zhotovených vykrojením laserem, které jsou na sebe ukládány a tepelně spojeny.

2.2 Konstrukce tištěné z cementových kompozitů

Společným znakem uvedených technologií (viz kapitola 2.1) je požadavek na co nejrychlejší vytvrzení za účelem dosažení vysoké rychlosti tisku. U tradičních výrobních postupů se proto využívá skupenských přeměn mezi tuhým a kapalným skupenstvím. Ty jsou zprostředkovány vnějšími zdroji energie, jako je laser nebo UV záření. Je tedy jasné, že tyto postupy nelze aplikovat u materiálů na bázi cementu. [1]

První a zároveň nejčastěji užívaná technika se dá zařadit do skupiny metod, které využívají k zhotovení extruze. Druhá technika se zařadit do skupiny metod, které využívají k zhotovení injektáže pojiva do lože agregátu.

2.2.1 Metody využívající extruzi

Tato metoda se začala používat již v 90. letech minulého století. Za jejím uvedením do betonářského sektoru se zasloužil profesor Khoshnevis a jeho tým. V dnešní době se jedná o nejrozšířenější metodu 3D tisku betonových konstrukcí.

Princip
Obecně je princip extruze založen na metodě ukládání roztaveného polymeru (FDM). Ten bezprostředně po extruzi rychle chladne a následkem toho mění své skupenství na pevné. V případě 3D tisku betonu (dále už jen 3DPC) se jedná o extruzi materiálu na bázi cementu (betonové směsi). Narozdíl od polymerů, které jsou využívány při výrobě objektů technologií FDM, mají cementové směsi menší citlivost na teplotu. Z toho důvodu je nutné přizpůsobit rychlost tisku a zvolenou geometrii rychlosti vytvrzování betonu, která přímo souvisí s hydratací cementových zrn.

Tato automatizovaná technologie by se dala chronologicky rozdělit do 3 kroků: pumpování směsi, extruze a uložení. V každém z těchto kroků je nutné zaručit, že betonová směs bude natolik viskózní, aby byla pumpovatelná. Na druhou stranu musí být směs dostatečně tuhá, aby nově vytištěné vrstvy byly schopné unést sami sebe a v případě tisku v exteriéru odolat účinkům zatížení větrem, aniž by došlo k vybočení segmentu (zejména u štíhlých stěn), ke stékání materiálu a nadměrnému sednutí materiálu. Souhrnně bývají tyto schopnosti čerstvé směsi nazývané jako stavitelnost či tisknutelnost. Jedním z technologických postupů bývá přidání urychlovačů tuhnutí při extruzi. Toto řešení umožňuje při použití viskóznější směsi stavět vyšší pracovní záběry.

Způsoby porušení čerstvě vytištěné konstrukce

V současné době rozeznáváme několik způsobů porušení čerstvě vytištěné konstrukce, které souvisí s reologickými vlastnostmi čerstvého betonu, technologií tisku a geometrií konstrukce. Detailněji je tato tématika popsána v kapitole 4.4.1.

Shrnutí

Ačkoliv metoda využívající extruzi betonové směsi přináší do stavebnictví zcela nové možnosti a nabízí se jako řešení v úvodu zmíněných problémů, tak s sebou přináší jisté obtíže. Výsledkem 3DPC je vrstevnatá struktura, která může být v několika pohledech nevýhodou. Zaměříme-li se na estetiku, je hodnocení velmi subjektivní. Ačkoliv je možné zachovat konstrukce jako pohledové a chápat tento krok jako architektonický záměr, tak ne každému takovéto vzezření musí vyhovovat. Je běžné, že se na zákazníkovo přání vytištěné konstrukce omítají – tolik k snaze eliminovat potřebnou pracovní sílu. Při pohledu na strukturu se taky nabízí otázka, zda vzhled vrstvené konstrukce nenapomáhá snadnému zachytávání nečistot, nezvyšuje náchylnost na biodegradaci a neusnadňuje přístup agresivním látkám jako jsou soli nebo sírany. Další nevýhodou technologie jsou rozhraní mezi vrstvami a filamenty, které se na základě provedených zkoušek jeví jako slabá místa. Do budoucna je tedy nutné tato místa analyzovat a v ideálním případě eliminovat. K zamyšlení se také nabízí výhody resp. nevýhody architektonického rázu. Přestože jsou zde názory, že 3DPC má potenciál vnést do architektury nový dech, tak jsou zde zkrátka limitace, se kterými se musí počítat. Mezi tyto omezené patří například přechod mezi svislými a vodorovnými konstrukcemi, který je omezen vlastnostmi betonu v čerstvém stavu. Pokud totiž nebude použit žádný podpůrný systém (např. bednění), tak přechod může probíhat jen pozvolna.

2.2.2 Metoda založená na injektáži do štěrkového lože

Tato metoda byla patentována již v roce 1993 a zařadila se do skupiny 3D tisku zhotoveného tryskáním pojiva. Původně byla tato technologie využívána například pro výrobu kostních implantátů. V betonářském sektoru se poprvé objevila v roce 1995.

Princip

Základní princip technologie spočívá v nanášení tekutého materiálu na agregátové lože o tloušťce 1 vrstvy, na kterém dojde k jeho penetraci a zmonolitnění. Na rozdíl od metody extruze se tedy agregát a pojivo dostanou do kontaktu až ve chvíli, kdy pojivo vyjde z tiskové hlavy. Po přidání vrstvy agregátu o dané tloušťce se proces opakuje a vznikají další vrstvy. Po ukončení tisku se všechen sypká složka, která nebyla propojen, odstraní a je možné ji znovu použít.

V současnosti se experimentuje s 2 hlavními přístupy k této technologii. Jejich užití závisí na různých kritériích jako je použité pojivo, povaha agregátu, funkce objektu, případná výztuž, formy ošetřování a další. Jedná aktivaci cementu pomocí kapek vody a nanášení cementové směsi na agregátové lože.

První přístup je založen na aktivaci suché směsi (agregát + pojivo = cement) pomocí kapek vody s případnou příměsí. Aplikací vody na suchou směs započne hydratační proces a dochází k tuhnutí v místech, kde byla nanesena voda. Výzva tohoto přístupu spočívá v navržení takové směsi a takového množství aplikované vody, aby došlo k rovnoměrné penetraci po celé výšce vrstvy. Při pronikání vody na výšku vrstvy se spoléhá pouze na gravitaci, a tak se jako kritická místa jeví zejména spodní části vrstev ve styku s rozhraním, do kterých se nemusí dostat tolik vody. V místech s nízkým

obsahem vody dochází ke snížení hydratace cementu, což může ve výsledku vést k vytvoření slabé až žádné vazby mezi vrstvami.

Druhý přístup je založen na injektáži cementové malty do agregátového lože. I u tohoto přístupu se je velmi důležité, aby cementová malta měla takovou konzistenci, aby došlo k penetraci přes celou výšku vrstvy a vytvořilo se silné rozhraní mezi vrstvami.

Shrnutí

Nehledě na přístupy je patrné, že finální vlastnosti objektu závisí na interakci tekuté a sypké složky. Metoda injektáže do agregátového lože disponuje oproti metodě založené na extruzi zásadní výhodou. Oproti ní totiž dokáže snadno přecházet mezi tiskem svislých a vodorovných konstrukcí bez potřeby jakéhokoliv podpůrného systému (bednění). Podpůrnou funkci zde zastává agregát, který je vrstvu po vrstvě pokaždé nanášen celoplošně. Ačkoliv lze nespojený agregát recyklovat a znovu ho použít, tak po ukončení tisku je nutné vynaložit nemalé úsilí na jeho odstranění. Množství agregátu a jeho stabilizace je překážkou této metody pro uplatnění ve větším měřítku. Pokud by měl být touto metodou vybudován i menší rodinný dům, muselo by být vytvořeno jakési obvodové bednění, které by bránilo agregátu se sesypat. Množství práce, která by musela být vynaložena k odstranění a uklizení přebytečného (nespojeného) agregátu je v rozporu se základní myšlenkou 3DPC – tj. urychlit výstavbu a redukovat nutnou pracovní sílu.

3. Chování objektů zhotovených aditivní technologií

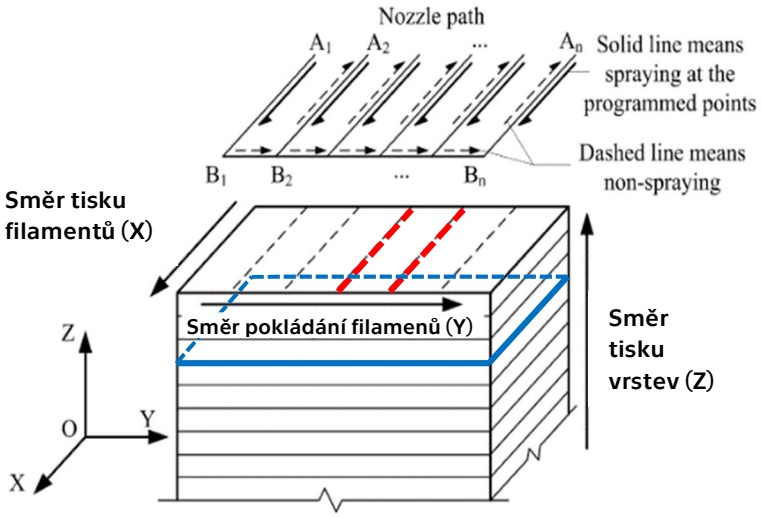
Srovná-li se libovolný referenční objekt zhotovený konvenčním způsobem (vylitím betonu do bednění) s takovým, jež byl vytvořen 3DPC, tak si lze povšimnout hned několika rozdílů. Technologie 3DPC vytváří, oproti klasickému postupu, anizotropní (ortotropní) strukturu, která se skládá z filamentů (proužků) vytvářejících vrstvy, na jejichž vlastnostech a spolupůsobení závisí výsledné parametry jako je únosnost. Klíčový faktor určující výsledné parametry objektu je právě rozhraní zmíněných proužků a vrstev, u něhož je rozdílná únosnost (mezi filamenty a mezi vrstvami) pravděpodobně způsobena technologií tisku, kdy čas mezi tiskem 2 sousedních pruhů je výrazně kratší než čas mezi tiskem sousedních 2 vrstev. [4]

Při porovnání hodnot vycházejících ze zkoušek vzorků v tlaku je patrné, že hodnoty naměřené na zkušebních tělesech vyrobených metodou 3DPC (bez jakéhokoliv vyztužení) jsou vždy nižší v porovnání s těmi zhotovenými konvenčním způsobem. [7] Porovnáme-li však výsledky zkoušek v tahu za ohybu nebo zkoušek vzorků v příčném tahu, lze zpozorovat trend opačný. [7] Vždy je však potřeba brát zřetel na anizotropii 3DPC, konkrétně tedy na směr zatěžování, jelikož vzorky namáhané v odlišných směrech mohou vykazovat diametrálně odlišné hodnoty únosnosti.

Společným znakem 3DPC a prostého monolitického betonu je bohužel jeho nízká duktilita s tím ruku v ruce jdoucí vlastnost porušit se křehkým lomem. V současnosti tedy mezi trendy patří minimalizovat negativní důsledky rozhraní vrstev na celkové vlastnosti, návrhem takového technologického postupu a betonové směsi, aby se vzniklý vzorek, co možná nejvíce, podobal strukturou a vlastnostmi tomu vytvořenému litím betonu do bednění a přidávat různé typy rozptýlené výztuže, která má za úkol zvýšit lomovou houževnatost materiálu a zamezit porušení křehkým lomem. [4], [7]

3.1 Souřadný systém konstrukcí vyrobených aditivní technologií

Jelikož se v uvedených studiích často liší pojmenování souřadných systémů, tak za účelem detailnějšího popisu testovaných vzorků a následného vyvození závěrů je nutné zavést jednotný souřadný systém. Ten úzce souvisí s technologií 3D tisku – konkrétně s algoritmem chodu hlavy. K pochopení je důležité porozumět postupu tisku. Pro názornost si chod stroje popíšeme na jednoduchém testovacím vzorku tvaru kvádru, který můžeme vidět na obrázku vpravo (viz Obrázek 1). Tryska tiskárny se posunuje ve směru osy *X* a po vytisknutí požadované délky elementární části - filamentu se hlava posunuje o vzdálenost rovnou jeho šířce. Právě směr kudy se posouvá hlava, když se přemisťuje mezi pruhy udává osa *Y*. Tiskneme-li souvislou vrstvu, kdy jsou pruhy navzájem rovnoběžné a bočně se dotýkají, tak je osa Y kolmá na osu *X* a dohromady tyto pruhy utvářejí vrstvu (viz Obrázek 1 modře vyznačeno rozhraní vrstev; červeně označeno rozhraní filamentů), která formuje rovinu *X*-*Y*. Po dokončení tisku vrstvy se hlava posouvá ve směru osy *Z* vzhůru o vzdálenost rovnou tloušťce pruhu. [4]

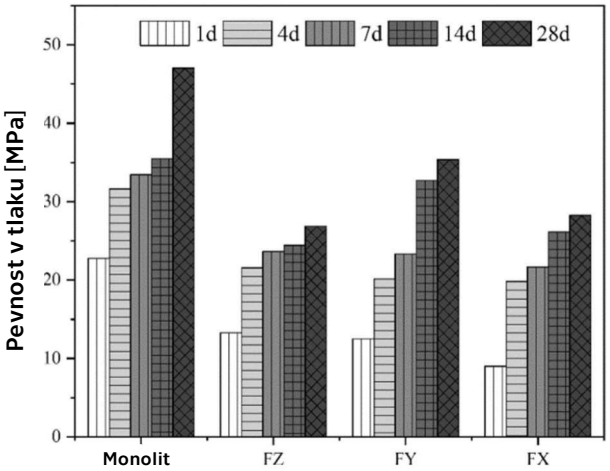


Obrázek 1 Souřadný systém [4]

3.2 Zkoušky v tlaku

Za účelem popisu chování tlačených konstrukcí zhotovených aditivní technologií, bylo vybráno 7 studií ([7], [4], [8], [9], [10], [11], [12]), které popisují závislost únosnosti na směru namáhání a rychlosti tisku. Jak bylo zmíněno v předchozí kapitole, v dnešní době je jedním z trendů přidávání výztužných drátků do směsi, a tak jedním z pozorovaných faktorů bude i závislost únosnosti na procentuálním obsahu rozptýlené výztuže.

Jelikož při zpracování studií výzkumné týmy používaly rozdílné směsi, tak hlavním cílem prezentace není představit čtenáři konkrétní hodnoty únosnosti, nýbrž zaměřit se a pokusit se zobecnit opakující se tendence. Byly vytvořeny hypotézy, které popisují příčinu porušení.



Obrázek 2 Průměrné hodnoty krychelné pevnosti stanovené v různých směrech [7]

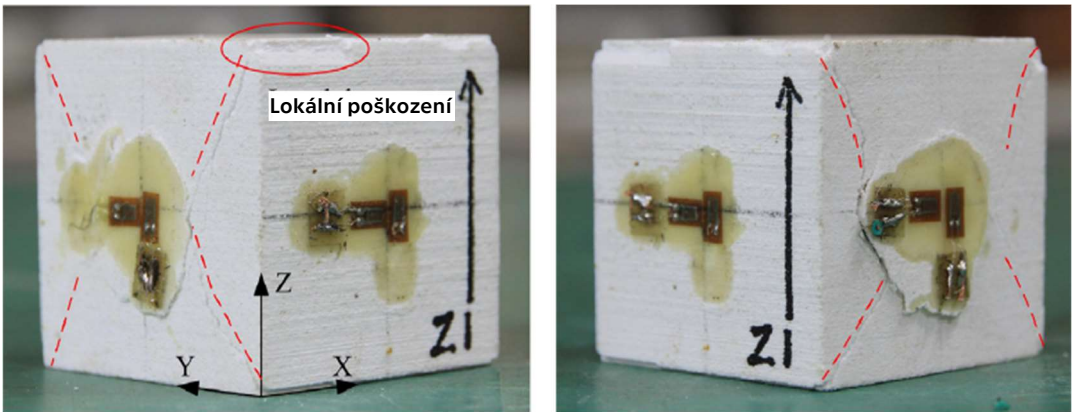
3.2.1 Závislost pevnosti na čase

Studie č. 1 [7] prokazuje rostoucí tendenci pevnosti v závislosti na čase. Srovnáme-li v jakémkoliv časovém okamžiku pevnosti konvenčně vyrobených vzorků s těmi vyrobenými aditivní technologií, tak ty monolitické nabývají větších pevností v tlaku. Pevnost v tlaku u monoliticky vyrobeného vzorku naměřená po 28 dnech byla 47,03 MPa, kdežto u vzorku zhotoveného aditivní technologií to bylo pouze 35,35 (při zatěžování ve směru osy *Y*), což je v porovnání s konvenčním vzorkem přibližně 75 %.

Pozorujeme, že u všech vzorků dochází k strmému nárůstu pevnosti v období 0 – 4 dny. Dále si můžeme povšimnout strmého nárůstu pevnosti ve směru osy *Y* po 7 dnech, který je v porovnání s pevnostmi ve zbylých směrech výrazně větší. Na základě provedených testů lze konstatovat, že konstrukce zhotovené aditivní technologií jsou anizotropní, a to od začátku do konce své životnosti. Pevnost vzorků ve směru osy *Y* byla největší, druhá v pořadí se ukázala být ve směru osy *X* a jako nejmenší se ukázala být pevnost ve směru osy *Z*.

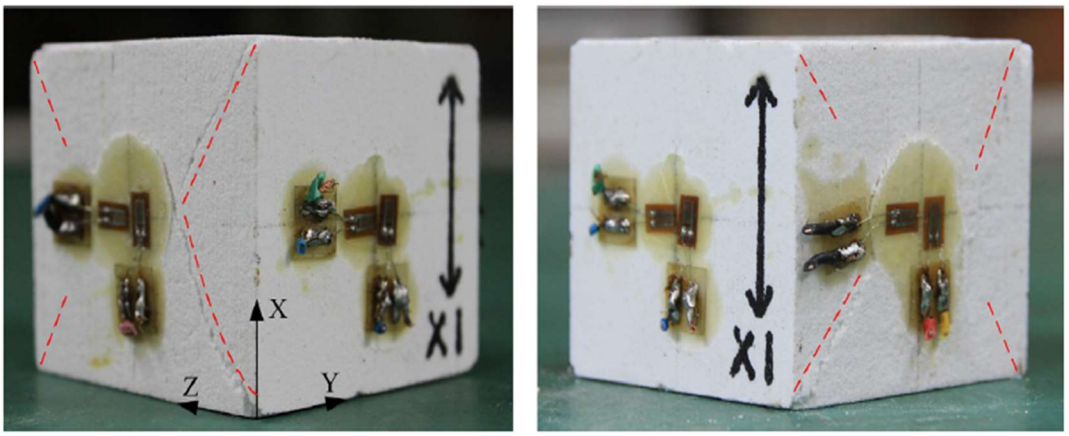
3.2.2 Výsledky zkoušek v tlaku a způsoby porušení

Studie č. 2 [4] se věnuje způsobům porušení vzorků zhotovených aditivní technologií. Srovnáme-li porušení monolitické krychle s tou zhotovenou aditivní technologií, pozorujeme jeden zásadní rozdíl. Diagonální trhliny formující známý tvar přesýpacích hodin se u vytištěného vzorku tvoří zpravidla u dvou protilehlých stran. Ostatní strany zůstávají téměř nepoškozené. Pokud zatěžujeme vzorek ve směru osy *Z*, dochází k rozvoji diagonálních trhlin na protilehlých stranách v rovinách *Y-Z* (viz Obrázek 1). Kromě rozvoje trhlin došlo k lokálním odštípnutím kousků betonu na hranách krychle z důvodu koncentrace napětí pod ocelovou roznášecí zatěžovací deskou.



Obrázek 3 Pohledy na krychli zatěžovanou ve směru osy Z [4]

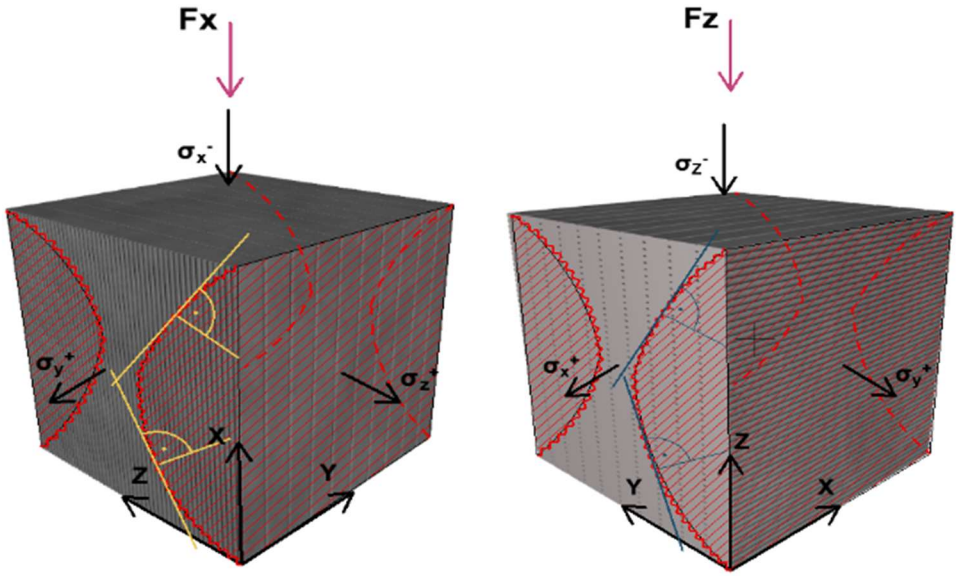
Při zatěžování ve směru osy *X* dochází, obdobně jako u předchozího namáhání, k tvorbě a rozvoji trhlin na protilehlých stranách, tentokrát ovšem v rovinách *X-Z*. Dle [4] je rozvoj trhlin v těchto rovinách způsoben defekty souvisejícími s technologií tisku, a to zejména kvůli tomu, že jeden z testovaných vzorků vykazoval jiný způsob porušení – delaminaci vrstev.



Obrázek 4 Pohledy na krychli zatěžovanou ve směru osy X [4]

Možné zdůvodnění nejednotnosti studií

Dle autora by příčina mohla být spojena s odlišnou pevností rozhraní mezi filamenty a mezi vrstvami, která je zapříčiněna technologií tisku. Při zatěžování vzorků zhotovených aditivní technologií se stejně jako u monolitických objektů generují příčná tahová napětí ve směrech kolmých na směr namáhání. Tyto tahová napětí namáhají buďto filamenty, rozhraní mezi filamenty anebo rozhraní mezi vrstvami. Poloha a tvar trhlin je závislý na tom, které z rozhraní filament-filament a vrstva-vrstva je namáháno (viz Obrázek 1 modře vyznačeno rozhraní vrstev; červeně označeno rozhraní filamentů a Obrázek 5).



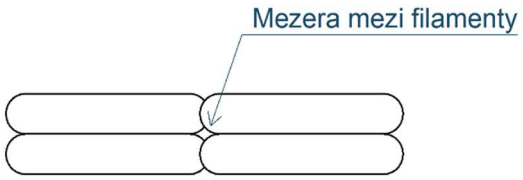
Obrázek 5 Pohled na vzorek zatížený ve směru osy X a Z, červená šrafa = odtržená oblast, klikatá čára = diagonální trhliny [vlastní]

V případě namáhání ve směru osy *Z* vznikají příčné tahy ve směru os *X* a *Y*. Napětí ve směru osy *X* přímo přenášejí filamenty, kdežto napětí ve směru osy *Y* namáhá oslabené místo, jímž je v tomto případě rozhraní mezi filamenty (viz Obrázek 1 - červeně označeno rozhraní filamentů). Diagonální trhliny tvaru přesýpacích hodin jsou pak kolmé na osu filamentu. Na obrázku níže (viz Obrázek 5) je červenou šrafou naznačená odtržená oblast, u které dojde k odštěpení části betonu, který je namáhán tahovým napětím σ_y. Obdobně je tomu při namáhání ve směru osy *X*. Dochází k příčným tahům ve směru os *Y* a *Z*. Napětí ve směru osy *Y* namáhá rozhraní mezi filamenty a napětí ve směru osy *Z* namáhá rozhraní mezi vrstvami (viz Obrázek 1 - červeně označeno rozhraní filamentů). Jelikož se předpokládá, že pevnost rozhraní mezi vrstvami je slabší než ta mezi filamenty, dojde k odštěpení části betonu, který je namáhán tahovým napětím σ_z.

Nabízí se tu otázka, proč jsou právě pevnosti naměřené na krychlích při zatěžování ve směru osy *X* ty největší. Je obecně známo, že příčina selhání betonových zkušebních vzorků je poškození příčnými tahy. Jak již bylo zmíněno, tak k poškození zapříčiněnému příčnými tahy může dojít u vzorků zhotovených aditivní technologií buďto v rozhraní mezi filamenty anebo v rozhraní mezi vrstvami. Na základě výše uvedených hypotéz by se dalo předpokládat, že únosnosti ve směru osy *Z* budou větší než ve směru osy *X*. Většina studií však poukazuje na opak, proto bude nutné tento fenomén hlouběji prozkoumat a pochopit.

Z výsledků tak tedy nepřímo vyplývá, že pevnost rozhraní mezi vrstvami je větší než pevnost rozhraní mezi filamenty. To by znamenalo, že čas mezi uložením sousedních

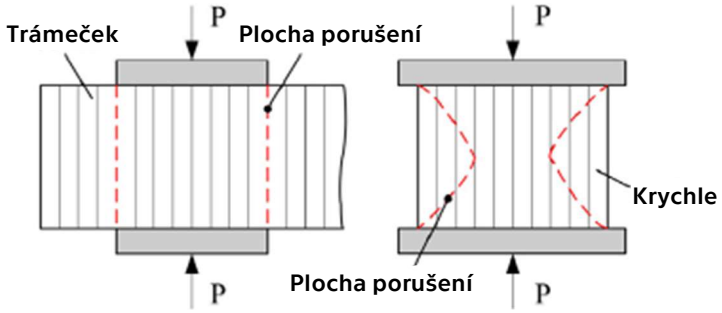
vrstev, resp. filamentů nemusí být ten nejdůležitější a rozhodující faktor pro tvorbu kvalitního a pevného rozhraní. Na výsledné pevnosti rozhraní mezi vrstvami by se tedy mohl projevit vliv přitížení vrchními vrstvami. Ten roste s přibývajícím počtem vrstev nad rozhraním. Pevnost rozhraní mezi filamenty se zásadně odvíjí od technologie tisku. Viskozita směsi, tvar hlavice i vliv přitížení ovlivňují kvalitu a pevnost vytvořené vazby, přičemž špatná kombinace těchto faktorů může vést k oslabení rozhraní až vzniku mezery mezi filamenty (viz Obrázek 6).



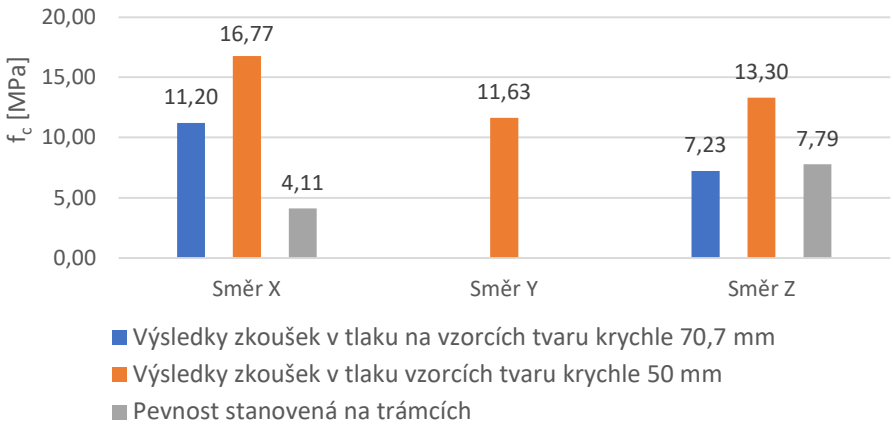
Obrázek 6 Naznačení mezery vzniklé špatně navrženým technologickým postupem [vlastní]

Porovnání výsledků získaných na trámcích a na krychlích

Studie č. 2 [4] také porovnává hodnoty pevnosti v tlaku naměřené na vzorcích tvaru krychle a na trámcích (viz Obrázek 7). Nejlepší pevnosti dosahovaly krychelné vzorky při zatěžování ve směru osy *X*. Pevnosti naměřené na trámcích mají však nejlepší únosnosti při zatěžování ve směru osy *Z*. Studie tento jev zdůvodňuje rozdílnými způsoby zatěžování, které v důsledku vedly k odlišným typům porušení. Při zatěžování trámku ve směru osy *X* došlo k smykovému porušení na rozhraní vrstev v rovině *X*-*Y*. Pevnosti zkoušené na trámcích byly ve směru osy *X* nižší než ve směru osy *Z*, což pravděpodobně způsobeno horší pevností rozhraní vrstev v porovnání s rozhraním filamentů.

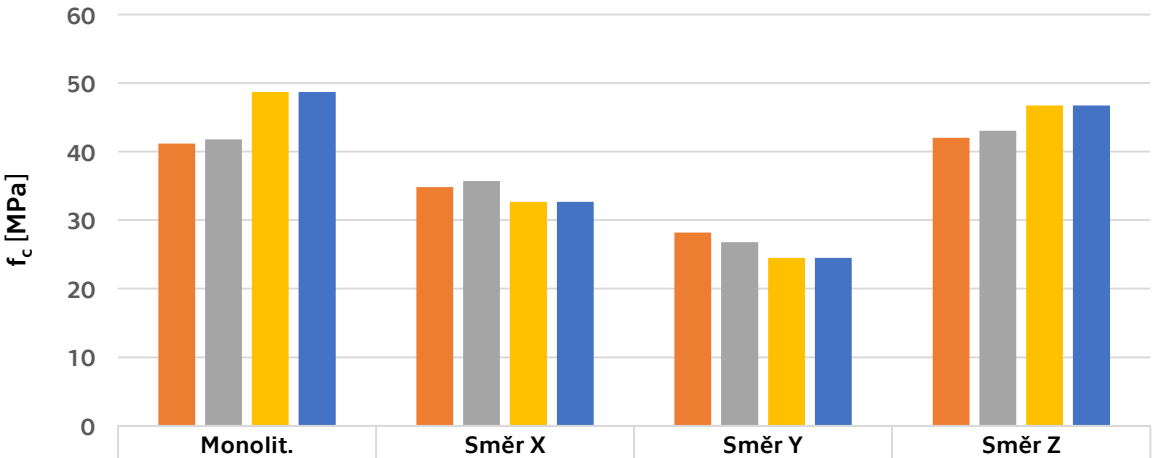


Obrázek 7 Trámek (vlevo) a vzorek tvaru krychle (vpravo) [4]



Obrázek 8 Hodnoty pevností stanovených na krychlích a trámcích [4]

Výsledky studií č. 3 [10] a č. 4 [11] ukazují shodně, že pořadí velikostí pevnosti v různých směrech je od největšího *X*, *Z* a *Y*.



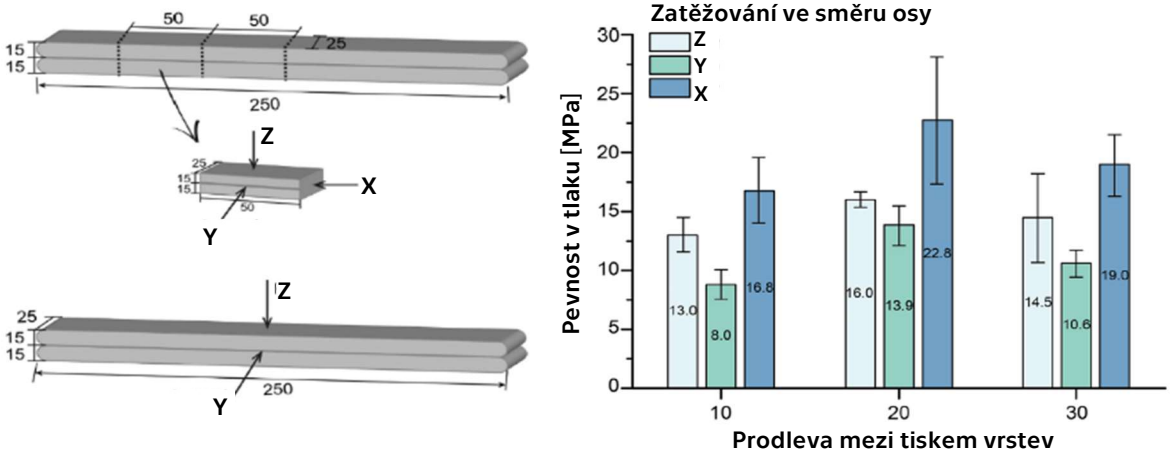
	Monolit.	Směr X	Směr Y	Směr Z
R0	41,16	34,83	28,18	42,03
R50	41,76	35,69	26,79	43,04
R0F	48,7	32,68	24,52	46,74
R50F	48,7	32,68	24,52	46,74

Obrázek 9 Hodnoty krychelných pevností stanovených na různých směsích a v různých směrech [10]

3.2.3 Vliv časové prodlevy na pevnost v tlaku

Porovnání pevností v tlaku v různých směrech v závislosti na časové prodlevě tisku

Studie č. 5 [9] se zabývá vlivem povrchové vlhkosti na pevnost rozhraní. Byly zhotoveny jednoduché vzorky skládající se ze 2 na sobě vytištěných filamentů (viz Obrázek 10). Byly vytvořeny 3 sady vzorků, které se lišili v časové prodlevě, za kterou byl vytisknut horní filament. Porovnávané časové prodlevy byly 10, 20 a 30 minut. I tato studie poukazuje na anizotropní vlastnosti konstrukcí zhotovených aditivní technologií. Nezávisle na časové prodlevě se ukazuje, že pevnost ve směru osy *X* je největší a je následována pevností ve směru os *Z* a *Y*. Tento trend se shoduje s výsledky studií č. 3 [10] a č. 4 [11].



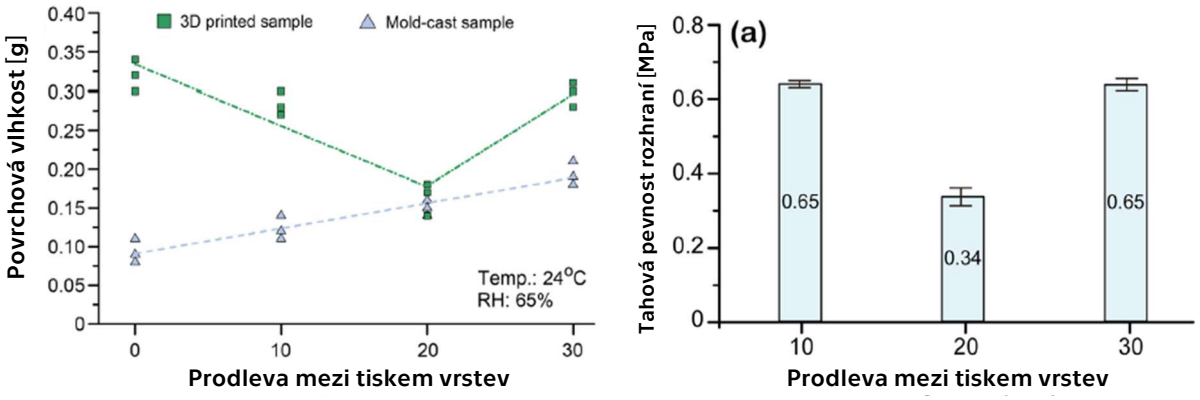
Obrázek 10 Pohled na zkušební vzorky (vlevo) a hodnoty únosnosti vzorků v tlaku v závislosti na prodlevě výtisku 2. vrstvy (vpravo) [9]

Vliv časové prodlevy mezi tiskem přilehlých vrstev

Studie č. 2 [4] poukázala na fakt, že delší časový úsek mezi tisknutými vrstvami může mít negativní vliv na jejich pevnost. Studie č. 5 [9] jako možné vysvětlení uvádí, že pro

vytvoření kvalitního rozhraní je potřebná relativně vyšší míra povrchové vlhkosti, která se vlivem povrchového odpařování s plynoucím časem snižuje. Z toho důvodu bylo očekáváno, že únosnost vzorků bude vykazovat spíš klesající tendenci. Výsledky studie č. 5 [9] však vykazují trend opačný. Studie testovala pevnost rozhraní vzorků a objevila, že mezi 10 a 20 min. pevnost roste a mezi 20 a 30 min. klesá (viz Obrázek 10). Předpoklad tedy nebyl zcela správný, a tak studie přichází s možným vysvětlením.

Bezprostředně po extruzi betonové směsi z hlavy je vidět, že se na povrchu hromadí voda. Ta se zde objevuje jako důsledek extruze směsi, při které dochází k její shlukování při obvodu výústě tiskové hlavy. V časové prodlevě mezi tištěním navazujících filamentů dochází k povrchovému odpařování této vody. Časem však do procesu vstupuje jev známý jako krvácení betonu, následkem kterého se začne ze směsi uvolňovat voda s cementem. Studie odhalila, že hodnoty povrchové vlhkosti vzorku zhotoveného aditivní technologií vykazují pokles před 20 minutou a nárůst v období po 20 minutě. To odpovídá experimentálně naměřeným hodnotám přírůstku povrchové vlhkosti vlivem krvácení betonu. Při srovnání časově závislého průběhu funkcí povrchové vlhkosti a pevnosti rozhraní, vidíme shodu (viz Obrázek 11). Studie tedy poukázala na fakt, že po jistém časovém úseku dochází vlivem krvácení betonu u 3DPC ke kompenzaci odpařené vody přebytečnou záměsovou vodou, což se kladně projeví na pevnosti rozhraní mezi vrstvami. Studie však nedokázala vysvětlit, z jakého důvodu není průběh únosnosti v tlaku a v tahu za ohybu stejný jako průběh pevnosti rozhraní. Do budoucna bude nutné tento fenomén hlouběji prostudovat.

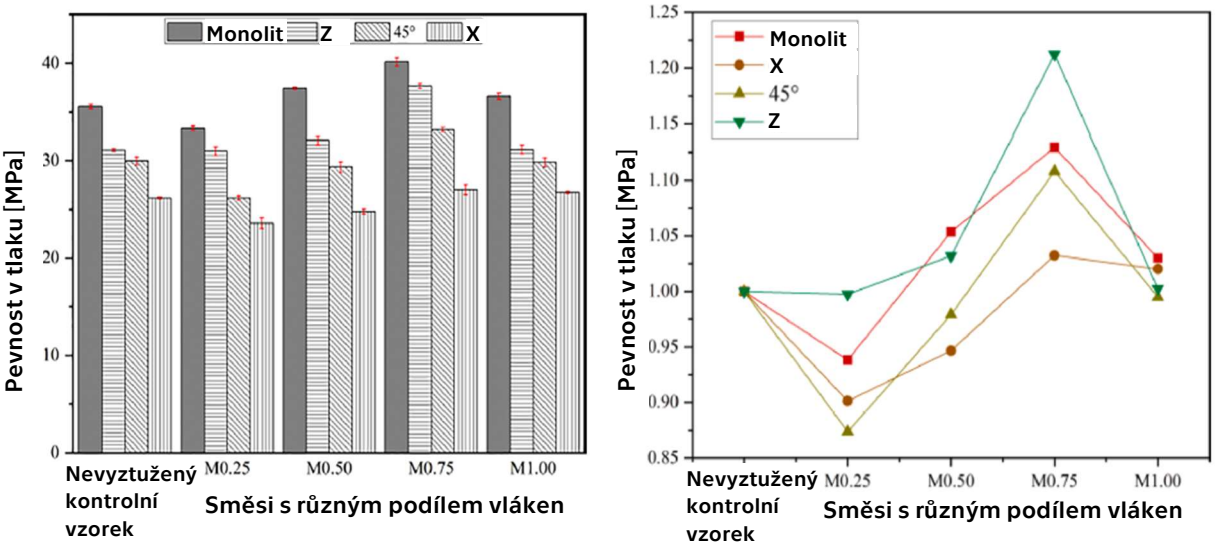


Obrázek 11 Závislost povrchové vlhkosti na čase (vlevo) a závislost pevnosti rozhraní vrstev na čase (vpravo) [9]

Je však nutné dodat, že problematika není zcela probádána. Tato práce konkrétněji popsala pouze jeden způsob, jak časová prodleva ovlivňuje pevnost rozhraní. V odborné se však objevují i další způsoby, jako je oslabení rozhraní vznikem dodatečných pórů v rozhraní nebo nedostatečné provázání vrstev kvůli nárůstu modulu pružnosti spodní vrstvy.

3.2.4 Vliv rozptýlené výztuže na pevnost v tlaku

Jak již bylo zmíněno, v dnešní době je trendem přidávat do směsí vlákna, která slouží k omezení objemových změn, omezení trhlin a zlepšení duktility 3DPC. Vlivem rozptýlené výztuže ve směsi se zabývá studie č. 6 [8]. Studie porovnává kontrolní - nevyztužený vzorek s 4 rozdílně vyztuženými vzorky, které byly zatěžovány ve 3 směrech. Téměř u všech kontrolních směsí byly monoliticky utvořené vzorky únosnější, než vzorky zhotovené aditivní technologií. Ukázalo se, že při 0,25 % obsahu vláken zaznamenal vzorek v porovnání s nevyztuženým menší únosnost. Vzorky vyztužené 0,5 % a 1 % vláken zaznamenaly pouze malé zlepšení oproti nevyztuženým vzorkům. Nejlepší zlepšení oproti kontrolnímu vzorku zaznamenala směs s 0,75 % vláken. Nižší únosnost v případě 0,25 % a 1 % obsahu vláken studie vysvětluje následovně. Obecně lze říct, že přidáním vláken do směsi vznikají póry, které oslabují strukturu materiálu. V případě 0,25 % obsahu vláken oslabení způsobené vzniklými póry převyšuje výhody plynoucí z vyztužení. U 1 % vyztužení může zase docházet ke shlukování vláken a vytváření nežádoucích vzduchových bublin, což vede ke snížení pevnosti v tlaku.



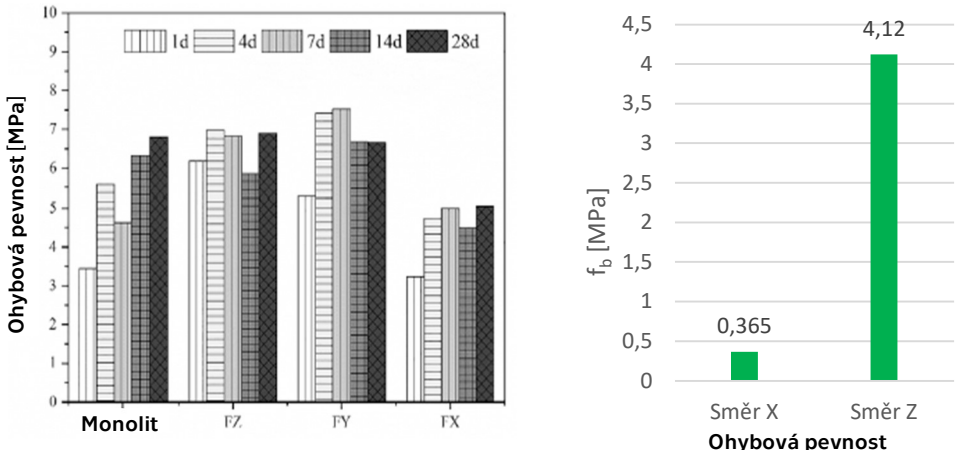
Obrázek 12 Pevnosti v tlaku rozdílně vyztužených vzorků namáhaných v různých směrech (vlevo) a relativní pevnosti v tlaku rodílně vyztužených vzorků namáhaných v různých směrech (vpravo) [8]

3.3 Zkoušky v tahu za ohybu

Za účelem popisu chování ohýbaných konstrukcí zhotovených aditivní technologií, bylo vybráno 5 studií ([7], [4], [9], [11], [12], [13]), na kterých bude popsána závislost únosnosti na směru namáhání a rychlosti tisku. Jedním z pozorovaných faktorů bude i závislost únosnosti na procentuálním obsahu rozptýlené výztuže. Pozorovaným faktorem budou, jak je už u popisu prvků vyztužených rozptýlenou výztuží zvykem, hodnoty CMOD (rozevření kořene trhliny = Crack mouth opening displacement).

Ve studii č. 1 [7] byly hodnoty ohybové pevnosti f_b stanoveny ze zkoušky čtyřbodovým ohybem a byly vypočteny dle vztahu $f_b = \frac{F_b L}{bh^2}$. Ve studii č. 2 [4] byly hodnoty stanoveny ze zkoušky tříbodovým ohybem a byly vypočteny dle vztahu $f_b = \frac{3F_b L}{2bh^2}$, kde F_b je vnášená síla, L je délka trámečku, b je šířka a h je výška průřezu U ostatních studií způsob výpočtu napětí není uveden.

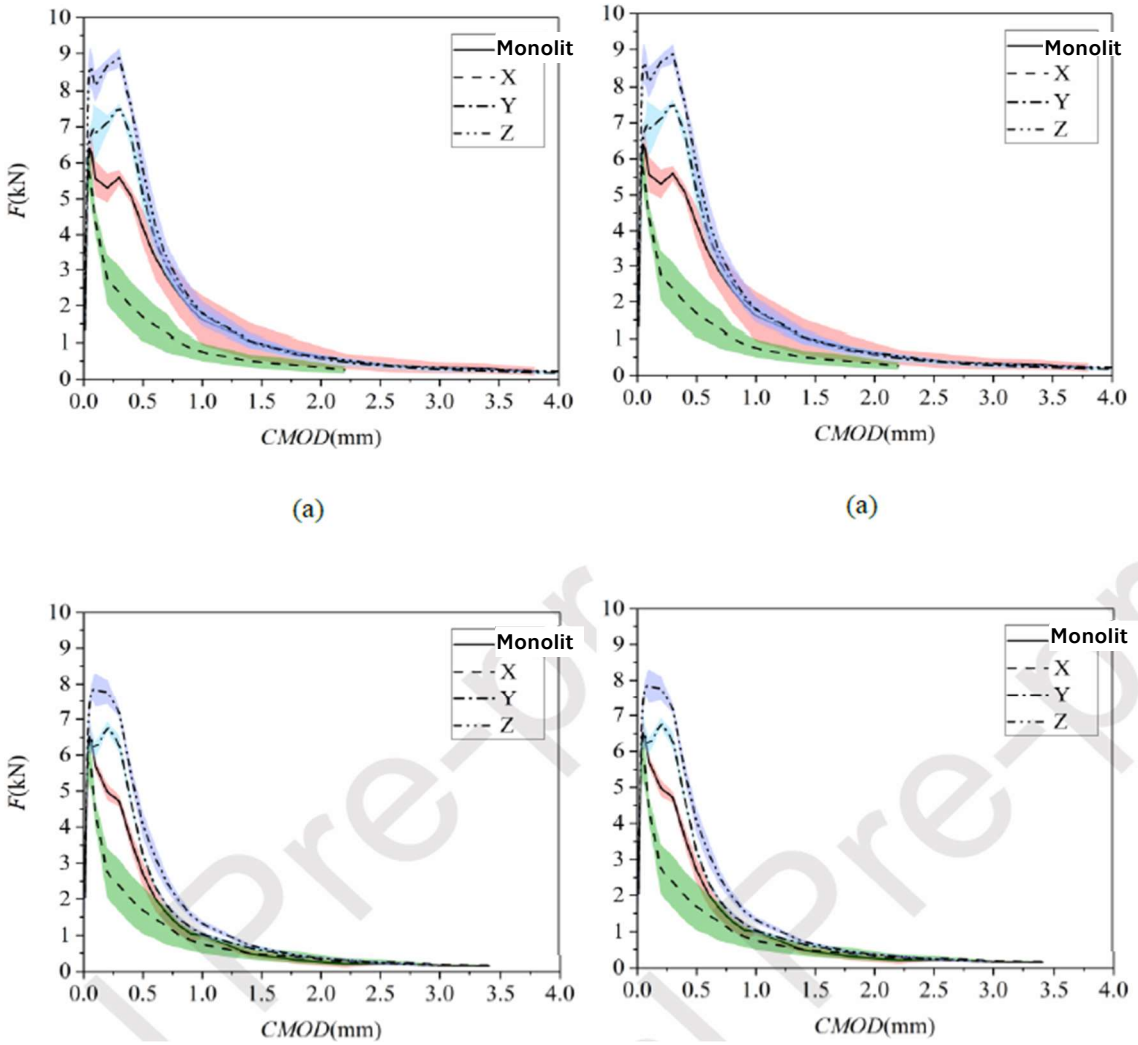
Studie č. 1 [7] poukazuje na zjevnou anizotropii. Ukázalo se, že při určitém typu namáhání dokáže tištěný beton předčit ten monolitický. V porovnání s monoliticky zhotovenými vzorky vykazovaly ty zhotovené aditivní technologií lepší vlastnosti při namáhání ve směru osy *Z* (6,91 MPa 3DPC vs. 6,79 MPa monolit. beton). Většina porovnávaných studií ([7], [4], [12], [13]) se shoduje na tom, že směr zatěžování *Z* vykazuje nejlepší výsledky. Směry zatěžování *Z* ([7], [4], [12]) a *Y* ([7], [12]) vykazovaly výrazně lepší výsledky v porovnání se směrem *X*. Tento jev lze vysvětlit následovně. Zatížíme-li vzorky ve směrech *Z* a *Y*, dochází k tahu při spodním povrchu. Tento tah namáhá osově filamenty, které jsou ve vodorovné poloze (směr *Z*) nebo jsou svisle (směr *Y*). V případě, kdy zatěžujeme trámky ve směru osy *X*, tak dochází k tahovému namáhání rozhraní mezi vrstvami. To je považováno za nejslabší článek 3DPC a únosnost prvku v tahu za ohybu přímo závisí na tahové pevnosti daného rozhraní.



Obrázek 13 Ohybová pevnost v závislosti na směru zatěžování studie č. 1 (vlevo) [7] a studie č. 2 (vpravo) [4]

3.3.1 Vliv rozptýlené výztuže na pevnost v tahu za ohybu

Studie č. 8 [13] porovnávala hodnoty pevnosti v tahu za ohybu vzorků s rozptýlenou výztuží. Na pracovních diagramech (viz Obrázek 14) lze znovu pozorovat anizotropii vzorků zhotovených aditivní technologií. Naměřené únosnosti, získané při zatěžování v různých směrech, jsou v pořadí od největšího *Z* (fialová); *Y* (světle modrá); monolitický vzorek (červená) a *X* (zelená). Studie poukázala na fakt, že při tisku dochází značnému usměrňování drátků. Většina z nich je seřazena ve směru tisku – tedy podélně ve směru filamentu (ve směru osy *X*). Tento jev je se výrazně promítá v ohybovéúnosnosti trámků. Při zatěžování ve směru Z a X dochází k využití drátků, kdežto při namáhání ve směru osy X není drátků téměř vůbec využito. [8]



Obrázek 14 Porovnání pracovních diagramů vzorků s rozptýlenou výztuží zatěžovaných v různých směrech [13]

4. Stěnové prvky

Jedná se o plošné nosné konstrukce, které se ze statického hlediska navrhují pro přenos svislého zatížení do základových konstrukcí a pro zajištění prostorové tuhosti a stability konstrukce. Se stěnovými prvky se můžeme nejčastěji setkat u stěnových a skeletových konstrukčních systémů. Nejčastěji bývají prováděny jako zděné nebo železobetonové.

Z technologického hlediska rozlišujeme monolitické a prefabrikované konstrukce. Monolitické konstrukce se zpravidla zhotovují in situ, tedy na stavbě, kdežto prefabrikované konstrukce jsou vyráběny ve specializovaných továrnách a na stavbu jsou dováženy. Každá z technologií má své výhody a nevýhody, které budou popsány v následujících kapitolách.

4.1 Namáhání stěnových prvků

Jak bylo zmíněno výše, stěnové prvky se využívají v různých druzích konstrukčních systémů, ve kterých bývají vystaveny různým typům zatížení. Obecně lze rozdělit zatížení dle směru působení na svislé a vodorovné. Mezi svislá zatížení patří vlastní tíha konstrukcí, užitná zatížení nebo sníh. Mezi ta vodorovná patří zejména vítr a zemní tlak. Rozhodující účinek zatížení pro návrh dimenzí stěn záleží na jejich rozmístění a celkovém charakteru objektu.

Normálová namáhání, jejichž důsledkem vzniká v konstrukci normálové napětí σ_x, jsou vyvolávána normálovými silami a působením ohybových momentů. Normálové síly jsou způsobeny svislým zatížením od nadlehlých konstrukcí. Ohybové momenty jsou způsobeny jednak vodorovným zatížením jako je vítr a zemní tlak, tak díky tuhým styčníkům (stěna – strop) zatížením stropních konstrukcí. U kloubových uložení vznikají normálová namáhání od normálové síly, ale i od momentu, který vzniká excentrickým uložením. Smykové namáhání je nejčastěji spjato s působením vodorovných zatížení.

4.2 Monolitické stěny

Monoliticky zhotovené železobetonové stěny se nejčastěji používají v podélných a příčných stěnových systémech a jsou realizovány zpravidla in situ. Tato kapitola se bude zabývat stěnami zhotovenými in situ a bude porovnávat stěny zhotovené konvenčním způsobem s těmi zhotovenými 3D tiskem.

4.2.1 Stykování prvků

Stykováním monolitických prvků jsou myšleny zejména různé druhy spar. Obecně rozlišujeme 3 druhy spar. Prvním druhem jsou tzv. pracovní spáry související s technologií provádění. Zbylé dva druhy řeší problematiku objemových změn a patří mezi ně spáry dilatační a nepravé. Dilatační spáry umožňují volné objemové rozpínání konstrukce způsobené teplotní roztažností. Nepravé spáry řeší problematiku objemových změn zapříčiněných smršťováním konstrukce.

4.2.1.1 Pracovní spáry

Jedná se o vodorovné i svislé spáry související s technologií betonáže a jsou spjaty s tzv. pracovními záběry. Pracovní spáry se navrhují u rozsáhlých konstrukcí, které nelze vybetonovat bez přerušení. V místě pracovních spar není přerušena výztuž a spojení betonu musí být schopno přenášet napětí. Vodorovné pracovní spáry vznikají zpravidla mezi základovou potažmo stropní deskou a svislými konstrukcemi. Aby bylo zaručené tuhé spojení obou částí, tak ze svislých prvků vyčnívá startovací výztuž. Svislé pracovní

spáry vznikají mezi 2 pracovními záběry (betonovanými úseky) stropních nebo stěnových konstrukcí. Obecně jsou monolitické konstrukce velmi tuhé, protože jejich součásti jsou dokonale spojeny. [14] [15] [16]

Pracovní spáry z pohledu stěn zhotovených aditivní technologií

U stěn zhotovovaných aditivní technologií by se dalo každé rozhraní mezi vrstvami chápat jako jakási pracovní spára nebo technologická přestávka. Na rozdíl od konvenčně prováděných monolitických konstrukcí se však u tištěných konstrukcí klasická žebírková výztuž využívá jen zřídka, navíc je tato výztuž umístěna obvykle do rozhraní vrstev, kde vykazuje spíš negativní vliv na spolupůsobení nadlehlých filamentů. [17] V případě vodorovných spar se tedy klasická svisle orientovaná výztuž o spolupůsobení částí (v tomto případě 2 nadlehlých vrstev) nepostará. Tištěné vrstvy jsou pak propojeny tak, že na sebe nanášené vrstvy jsou dostatečně čerstvé, aby umožnili tvorbu kvalitního rozhraní. Jak již bylo ale zmíněno, delší prodleva mezi tiskem může znamenat oslabení pevnosti rozhraní. [9] Kromě klasické žebírkové výztuže se často do tištěných směsí přidává rozptýlená výztuž. Studie však prokázaly, že dochází k podélnému usměrňování vláken kvůli průchodu tiskovou hlavou. Toto usměrnění zásadně zmenšuje potenciál vláken propojit vrstvy. [8] Z hlediska využívání svislé výztuže se nabízí způsob navržený studií [18], kdy se do ještě čerstvě vytištěné stěny zavrtává šroubovicová výztuž.

Předešlý odstavec se věnoval pracovním sparám mezi vrstvami tištěné konstrukce. Nyní bude popsána vodorovná pracovní spára mezi stěnou, resp. sloupem a stropní deskou. Tato spára mezi svislými a vodorovnými konstrukcemi je u konvenčních monolitických konstrukcí považována za tuhý styk, čímž umožňuje převést část ohybového momentu z vodorovné konstrukce na tu svislou. To znamená, že je stěna namáhána ohybovým momentem od vodorovné konstrukce a je nutné ji posoudit na namáhání normálovou silou a ohybovým momentem (M+N). To u konvenčních monolitických konstrukcí nebývá problém, jelikož jsou vyztuženy svislou výztuží, která přebírá tahové napětí v betonu. Jak již bylo zmíněno výše, tištěné konstrukce nejsou vyztuženy svislou výztuží a vykazují tak relativně špatné únosnosti v ohybu, a tak je u nevyztužených tištěných konstrukcí vnesení těchto přídavných momentových namáhání nežádoucí. Principiálně by se tak tištěné konstrukce daly přirovnat k těm zděným, u kterých bývá zvykem ukládat stropní konstrukce kloubově, aby nedocházelo k přenosu momentů do zdi a následnému rozevření ložných spar. Na základě výše popsaných hypotéz se tedy jeví jako vhodné navrhovat styky vodorovných a svislých konstrukcí jako kloubové. To platí jak pro monolitické, tak prefabrikované tištěné konstrukce.

4.2.1.2 Dilatační spáry

Dilatační spáry – teplotní roztažnost

Monoliticky zhotovené konstrukce jsou staticky neurčité. To může být výhodné v situaci, kdy dojde k porušení části nosného systému, při kterém je konstrukce schopná přerozdělit zatížení a zamezit tak progresivnímu kolapsu. Na druhou stranu, statická neurčitost je nevýhodná z hlediska objemových změn. Na rozdíl od staticky určitých konstrukcí se totiž v těch staticky neurčitých při zatížení objemovými změnami tvoří dodatečné silové účinky. Aby tato dodatečně vnášená zatížení nepoškodila konstrukci, tak se navrhují tzv. dilatační spáry, které umožňují volné objemové změny. Těmito spárami neprochází podélná ani příčná výztuž.

Konstrukční řešení – teplotní roztažnost
K návrhu konstrukce z hlediska teplotní roztažnosti lze přistoupit už v rané fázi projektování. Kdy vhodně zvolené konstrukční řešení nemusí vyžadovat návrh dilatačních spar. Takovéto vhodně zvolené řešení může být například umístění ztužujícího jádra doprostřed budovy, kdy toto umístění dovoluje konstrukci se volně rozpínat do všech stran. Další faktor, který lze ovlivnit již v rané fázi projektu, je uschovat všechny nosné konstrukce do tepelné obálky budovy. Takto navržená tepelná obálka udržuje nosné konstrukce v relativně malém teplotním výkyvu, na který není nutné dilatace navrhovat.

Mezi nejběžnější konstrukční řešení bývá zdvojení svislých nosných konstrukcí v místě dilatace (zdvojení neprochází základovou konstrukcí) nebo různé druhy kluzných uložení. Jak bylo zmíněno výše, tak tištěné konstrukce je z hlediska namáhání vhodné navrhovat jako staticky určité, což je výhodné i z hlediska teplotní roztažnosti.

Dilatační spáry – nerovnoměrné sedání
Dilatační spáry se také navrhují z důvodu nerovnoměrného sedání staveb, kdy spára musí umožnit jednak svislý, tak i vodorovný pohyb konstrukce. Spára musí procházet všemi nosnými i případně navazujícími kompletačními konstrukcemi, přičemž zpravidla prochází (na rozdíl od dil. spáry navržené kvůli obj. změnám) základovou konstrukcí.

Konstrukční řešení – nerovnoměrné sedání
Mezi nejběžnější konstrukční řešení bývá vykonzolování stropní konstrukce nebo vložení oboustranně kluzně uloženého stropního pole. [14] [15] [16]

U tištěných konstrukcí, které neobsahují výztuž může nerovnoměrné sedání způsobit značné škody. V závislosti na charakteru sedání se můžou objevit tahové, ale i smykové trhliny. Znovu by se zde dalo chování stěn zhotovených 3DPC přirovnat zdivu. Návrh MSP základů by tedy měl být spíše konzervativní a konstrukce by neměla být vystavena nerovnoměrnému sedání.

4.2.1.3 Nepravé spáry (řízené trhliny)
Další příčinou objemových změn jsou reologické změny v materiálu. Mezi ty nejzásadnější reologické procesy v betonu patří dotvarování a smršťování. Na rozdíl od dotvarování, které je zapříčiněné silovými účinky na konstrukci, smršťování probíhá už při betonáži. Smršťování je jev, kterému se při provádění betonových konstrukcí nevyhneme. Je možné ho pouze omezit. Dle Eurokódu 2 [N1] rozlišujeme 2 druhy smršťování, které mohou v realitě působit souběžně anebo se prolínat:

a) Autogenní (chemické) smršťování – je proces probíhající v průběhu tvrdnutí betonu. Hlavní část autogenního smršťování probíhá v počátečních dnech po vybetonování. Principem je jev, kdy objem reaktantů, což jsou látky vstupující do chemické reakce, je větší než objem produktů reakce, což jsou reakcí utvořené látky. V našem případě se jedná o hydratační reakci betonu, do které vstupuje voda s pojivem. Výsledný produkt, tedy zhydratovaný cement, má mnohem menší objem než nezhydratovaný cement s vodou.

b) Smršťování vysycháním – je proces probíhající pozvolna po začátku tuhnutí betonu, při kterém dochází k úniku vody. Pokud k tomuto úniku dochází před začátkem tuhnutí betonu, mluvím o plastickém smršťování. Plastické smršťování je

charakterizováno odpařováním vody z povrchu čerstvého betonu. Vysychání se může, v závislosti na okolních podmínkách, střídat s přijímáním vody.

Míru smrštění lze omezit složením směsi čerstvého betonu a různými druhy ošetřování.

Omezení důsledků smršťování úpravami směsi

Křivka zrnitosti – je jeden z významných parametrů směsi ovlivňující smrštění. Jemnozrnné směsi obecně obsahují mnohem větší množství cementu v porovnání s hrubozrnnými a jelikož smršťuje pouze cementový tmel, tak se směsi obsahující menší částice agregátu více smršťují. Jemnozrnné směsi užívané při 3DPC jsou jedním z důvodů, proč se tištěný beton smršťuje mnohem více než konvenční monolitický. [19]

- Vodní součinitel – směsi, které jsou charakterizovány větším vodním součinitelem vykazují obvykle větší míru smrštění, což je dáno menším objeme vody, která by se potenciálně mohla z betonu vypařit. Množství záměsové vody resp. hodnota vodního součinitele směsi se dá snižovat přidáním plastifikátorů. [20]
- Cement – druh cementu a jemnost mletí také zásadně ovlivňují smrštění. Aby bylo minimalizováno smrštění je vhodné využít cement s pozvolným vývojem hydratačního tepla a počáteční pevnosti. Jemněji mleté cementy, tedy cementy s velkým měrným povrchem vykazují větší smrštění v porovnání s hruběji mletými. [20] To se jeví jako problém u tištěných konstrukcí, které obsahují vysoké množství cementu. To je dáno tím, že od nichž vyžadujeme relativně rychlý nárůst pevnosti a zároveň není možné použít větší frakce kameniva.

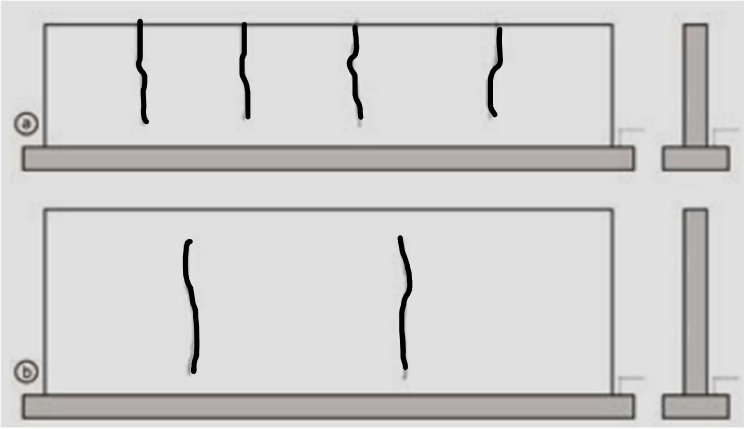
Omezení důsledků smršťování ošetřováním betonu

Při provádění monolitických konstrukcí se betonuje do bednění, které znemožňuje odpařování vody, a tak dochází k vysychání betonu pouze z 1 strany (vrchní povrch). U 3DPC však vytištěný filament vysychá hned ze 3 stran (po vytištění vrstvy nad, ze 2). Nadměrné vysychání může způsobit nedostatek vody pro hydrataci cementu, velké smršťování a s ním spojené riziko vzniku trhlin. Z tohoto důvodu je zapotřebí věnovat dostatečnou pozornost ošetřování.

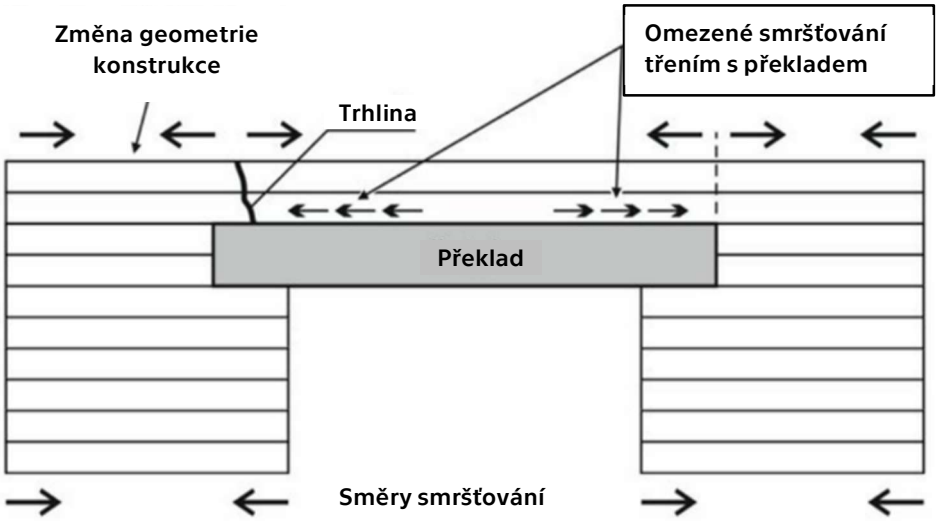
- Zakrytí betonu fólií – fólie omezuje únik vlhkosti a zároveň chrání beton před povětrnostními vlivy. Zakrytí fólií se pozitivně odráží na míře plastického smrštění a vysychání betonu.
- Kropení vodou – zabraňuje plastickému smršťování a smršťování vysycháním. Nesmí však dojít k vyplavování cementu s vodou z betonu. Voda by měla mít teplotu blízkou čerstvému betonu.
- Vlhčení mlhou – jedná se o nejvhodnější způsob ošetřování betonu, jelikož nanášené kapičky se při nástřiku ochladí na teplotu okolního vzduchu.

Zejména v létě se pak jeví jako vhodné posunout betonáž do večerních hodin, kdy je v exteriéru nižší teplota a konstrukce není vystavená slunečnímu záření. Pokud jsou konstrukce prováděné aditivní technologií realizovány in situ, tak se v praxi osvědčilo konstrukce kropit vodou, vlhčit mlhou či překrývat fólií. Jedno z možných opatření je výstavba ochranné konstrukce – jakéhosi altánu pokrytého fólií, který uschová tištěnou konstrukci a ochrání ji před povětrnostními podmínkami a slunečním zářením. Obecně lze však konstatovat, že z hlediska účinků smršťování je vhodnější konstrukce realizované 3DPC vyrábět jako prefabrikované, a to zejména kvůli lepším podmínkám pro ošetřování, které nabízí výroba v továrně.

Pokud není smrštění zabráněno, tak ke vzniku tahových napětí v konstrukci nedojde. Pokud však bráníme tzv. volnému smrštění, dochází ke vzniku tahových napětí. Ve chvíli, kdy tato tahová napětí dosáhnou hodnot větších, než je tahová pevnost betonu v daném časovém okamžiku, vytvoří se dělící trhliny, které prochází celým průřezem konstrukce. S omezeným smrštěním se nejčastěji setkám u základových desek, kdy omezujícím účinkem se tření s podložím. Kritickým místem jsou také stěny, které jsou betonovány na starší vyzrálou desku (viz Obrázek 15). Smrštění je v tomto případě omezeno třením s deskou ale i provázáním se startovací výztuží. To je problémem zejména při návrhu bílých van, od kterých se požaduje vodonepropustnost. Jedním z dalších míst náchylných ke vzniku trhlin jsou oblasti nad otvorem (viz Obrázek 16), ve kterých se jednak mění podmínky pro smršťování, tak dochází k omezenému smršťování kvůli tření s překladem. Navrhování nepravých spar nám umožňuje aktivně přistoupit k návrhu konstrukce. V praxi to pak znamená, že se do konstrukce záměrně umístí oslabené místo, ve kterém vznikne tzv. řízená trhlina. Těmito spárami prochází podélná výztuž. [14] [15] [16]



Obrázek 15 Příklad dělících trhlin ve stěnách: charakter trhlin nízké stěny (nahoře) a charakter trhlin vysoké stěny (dole) [14]



Obrázek 16 Vznik trhlin nad otvorem

4.2.1.4 Dilatační spáry a nepravé spáry 3DPC stěn

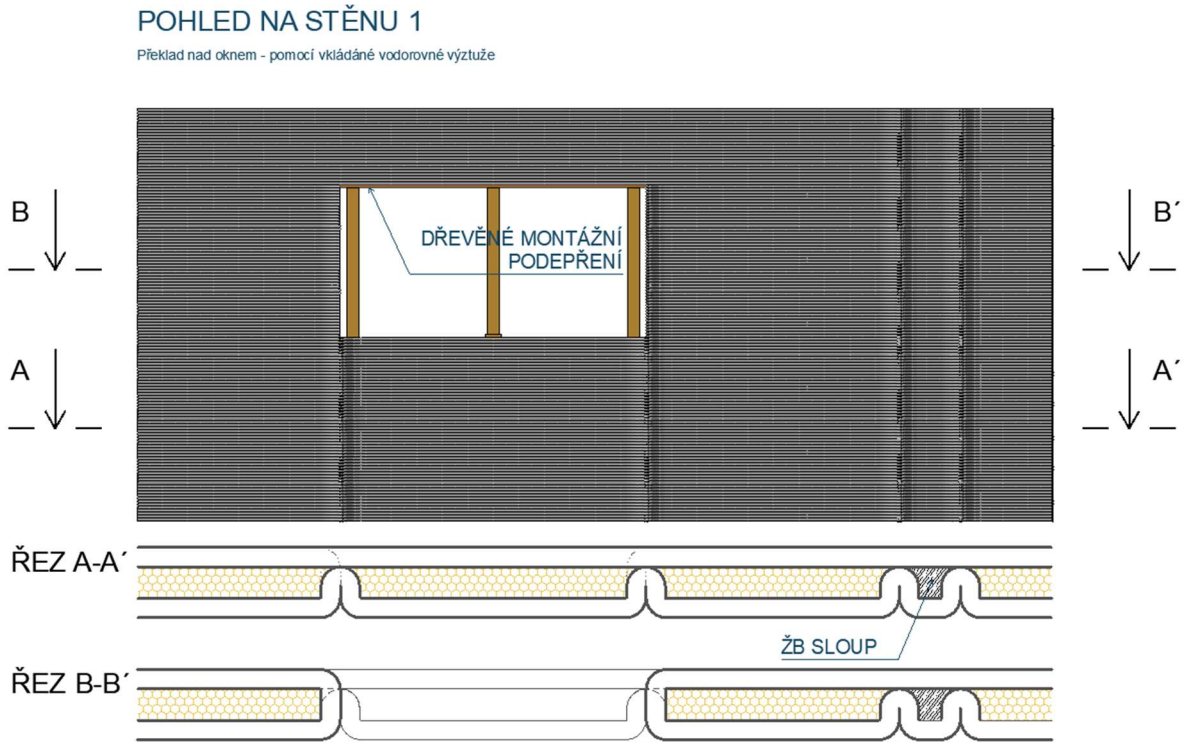
Konstrukce zhotovené 3DPC mají velmi podobné vlastnosti z hlediska teplotní roztažnosti jako klasické monolitické konstrukce. Koneckonců jsou také vyrobeny

z cementového kompozitu. Navíc, jak bylo rozebráno výše, jsou mnohem více náchylné na smršťování. K tématice dilatačních a nepravých spar 3DPC konstrukcí však není mnoho informací a realizací je pouze hrstka. Řešení, které budou uvedeny v této práci, jsou převzaty z pozorování již realizovaných konstrukcí. Ty jsou zdokumentovány a komentovány ve videích dostupných v kanálu amerického odborníka na technologii 3D tisku betonových konstrukcí Jarreta Grosse. [21] Nutno poznamenat, že níže uvedené příklady spar byly realizovány při stavbě jednopodlažních rodinných domků, a tak nemusí být vhodné pro aplikaci u rozsáhlejších projektů.

Za účelem názorného popisu spar byly zhotoveny 2 pohledy na stěny s různým řešením dilatačních a nepravých spar.

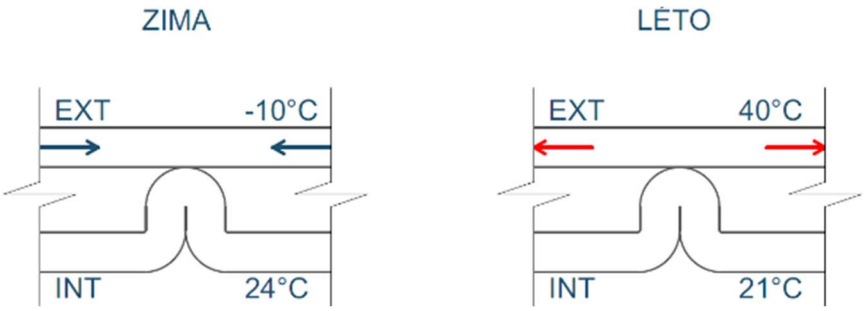
Řešení 1

Stěny je vhodné z hlediska objemových změn rozdělit na oddilatované úseky, aby nedošlo ke vzniku trhlin od smršťování. Jako kritická se jeví zejména 2 místa. První příčinou trhlin je omezené smršťování stěny zapříčiněné třením se základovou deskou. To se může objevit po celé délce stěny. V tomto případě je řešeno tak, že nepravé spáry, ve kterých očekáváme vznik kontrolních trhlin od smršťování jsou utvořeny oslabením průřezu tak, že trajektorie vnitřního segmentu stěny opisuje obrácené „U". Navíc u stavby, jejíž stěna je zobrazená na Obrázek 18 a Obrázek 19 se dvojicí záhybů ve tvaru obráceného „U" vytvořilo ztracené bednění pro konvenční ŽB sloup. Druhým kritickým místem jsou oblasti kolem okenního otvoru. To zejména z důvodu odlišných podmínek pro smršťování, jelikož ostění okna se chová jako volný okraj stěny, kdežto nadpraží je průběžné. Navíc pokud na dřevěné montážní podepření nebude před tiskem uložena fólie, můžeme se bavit o další restrikci smrštění způsobené třením mezi dřevěným prknem a betonem. Překlad otvoru je vytvořen vložením vodorovné výztuže mezi tištěné vrstvy, a proto není možné pokračovat s nepravou spárou i v nadpraží. [21], [15]



Obrázek 17 Pohled na stěnu 1 a řezy [vlastní]

Při pohledu na toto řešení (viz Obrázek 17) je jasné, že v místech nepravých spar jsou velké tepelné mosty. Do jisté míry je možné, že je tento problém opomenut, jelikož se realizovaná stavba nachází ve státě Florida (USA), kde se i v zimě teploty pohybují okolo 19°C. Na Obrázek 18 jsou vyobrazeny návrhové teploty. Z obrázku je také patrné, že daná struktura stěny se skládá z vnějšího a vnitřního segmentu stěny, přičemž teplotou je zatížen zejména ten vnější. Vnější segment stěny je však v celé délce stěny průběžný, a tak bude řízená trhlina z venku jasně viditelná. To je neestetické a zároveň rizikové z hlediska biodegradace. Otázka je, zda takto navržená struktura neumožňuje uvolnění napětí, které vzniklo omezeným smršťováním a teplotní roztažností, pouze vnitřnímu segmentu stěny.

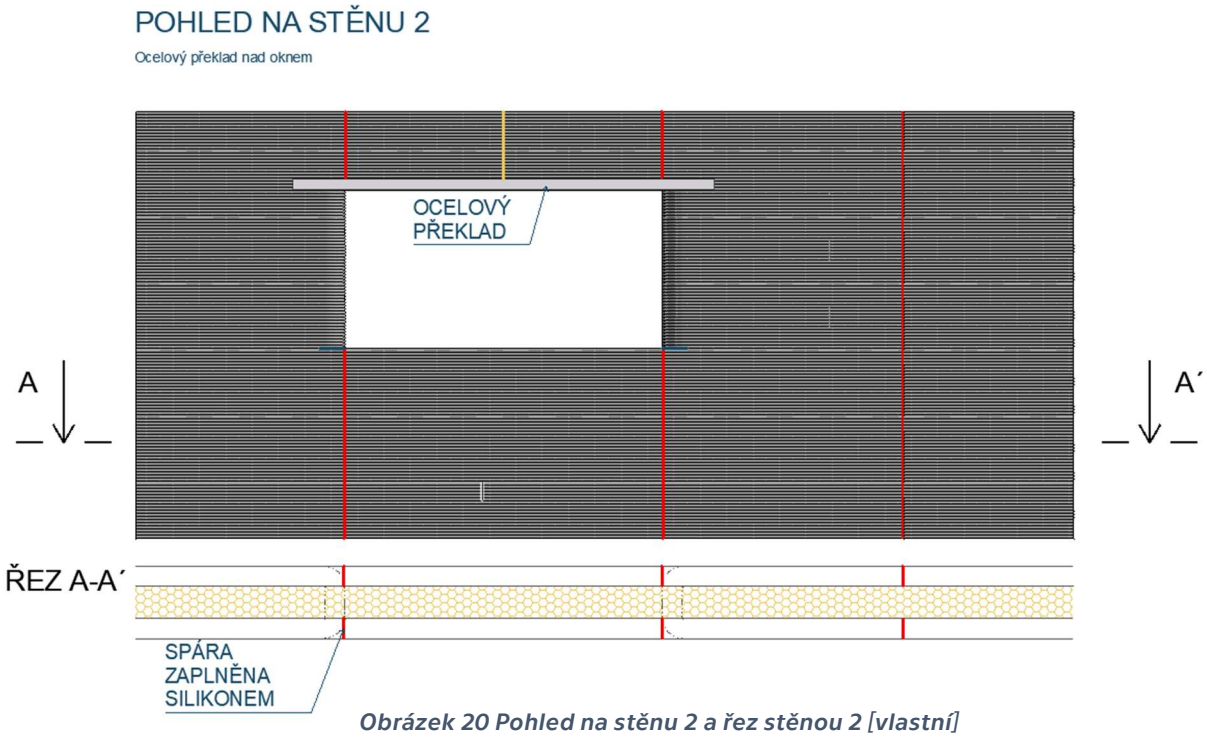


Obrázek 18 Znázornění teplotního namáhání [vlastní]

Obrázek 19 Příklad realizované stěny s „U" záhyby [21]

Řešení 2

Ve stěně 2 se spáry řeší manuálně, a to úplným nebo částečným nařízntím stěny přes celou výšku ještě v čerstvém stavu. Po zatvrdnutí betonu se vzniklá drážka zatmelí trvale pružným tmelem. Spáry jsou umístěny po celé délce stěny. Navíc u této stěny bylo možné nepravé spáry umístit do nadpraží, jelikož je zde jako okenní překlad užit ocelový profil, který zároveň slouží i jako montážní podepření tištěných vrstev nadpraží. Na obrázku (viz Obrázek 20) je červenou čarou naznačeno umístění spar. Žlutou čarou je naznačeno eventuální řešení.



Obrázek 20 Pohled na stěnu 2 a řez stěnou 2 [vlastní]

Toto řešení se zdá být efektivnější z hlediska tepelných ztrát, jelikož oproti předchozímu zde nejsou tepelné mosty. Další výhodou spar vytvořených naříznutím stěny je možnost využití jednoduché stěnové struktury – jako je v tomto případě jednoduché dvouvrstvé. Vytvořením spáry naříznutím, namísto utvořením oslabeného místa ve struktuře stěny, se také šetří materiál. Na druhou stranu, toto řešení vyžaduje přítomnost pracovníka na stavbě, který před zatvrdnutím bude vytvářet drážky a po zatvrdnutí bude vzniklé mezery tmelit. Jako rizikové se jeví vytváření drážky v ještě čerstvém betonu. Obzvláště nebezpečné to může mít při provádění drážky do velmi štíhlých stěn, kdy se neopatrnou manipulací s nářadím může čerstvě vytištěná stěna poškodit, ztratit stabilitu nebo se v krajním případě zbortit.

Obrázek 21 Příklad realizované stěny se zatmelenou spárou [21]

4.3 Prefabrikované stěny

Prefabrikované stěny se používají do montovaných systémů. Prefabrikovaným konstrukcím se poměrně často dává přednost před těmi monoliticky realizovanými. Mezi výhody prefabrikace patří možnost tvorby libovolných tvarů, vyšší jakost, lepší kvalita povrchu a další. Prefabrikované dílce můžou být hospodárnější, jelikož dílce vyráběné opakovaně má význam optimalizovat a ušetřit tak na materiálu. Z hlediska požární odolnosti disponují prefabrikované konstrukce výrazně lepšími parametry a jejich náklady na údržbu jsou výrazně menší. Výstavba objektů z prefabrikovaných dílců také zajišťuje rychlejší výstavbu a úsporu skladovacích prostorů na staveništi.

Projektování prefabrikovaných konstrukcí je z mnoha hledisek specifické. Při projektování je třeba brát zřetel na dostupnost potřebných dílců, možnost dopravy prefabrikátů na stavbu, možnost provádění montáže nebo třeba podmínky pro výstavbu v dané lokalitě.

4.3.1 Stykování prvků

Hlavním rozdílem mezi prefabrikovanými a monolitickými konstrukcemi je zejména způsob, jakým mezi sebou spolupůsobí jednotlivé dílce, resp. části konstrukce. Jak již bylo zmíněno výše, monolitické konstrukce mají tuhé styčníky. Navržená monolitická konstrukce má díky tuhým styčníkům možnost přerozdělovat zatížení a vytvářet tak jakési skryté rezervy. Prefabrikované montované systémy však takovými rezervami neoplývají. To je dáno užíváním zejména kloubových a pružných styků. Ty jsou dominantně užívány hlavně kvůli své ekonomičnosti ale také kvůli faktu, že vyrovnat se monolitickým stykům je konstrukčně velmi složité.

Styčníky a jejich tuhost hrají zásadní roli při zjišťování účinků zatížení na montovanou konstrukci. Dále budou popsány nejběžněji užívané typy styků. Míra tuhosti se bude vztahovat k monolitickému styčníku. [22]

4.3.1.1 Kloubový styk

Tento styk umožňuje vzájemné pootočení dílců aniž by při tom vznikl ohybový moment. Uspořádání styčníku musí po odtížení umožnit návrat do původní pozice. Typickým příkladem kloubového styku je uložení stropních předpjatých panelů Spiroll prostřednictvím maltového lože nebo pryžového ložiska. Kloubový styk lze navrhnout také jako posuvný prostřednictvím válečkového ložiska. [22]

Tištěné konstrukce disponují relativně malou ohybovou únosností, a tak se tento styk v místě přechodu svislé konstrukce na tu vodorovnou zdá být jako nejvhodnější (detailněji je problematika popsána v kapitole 4.2.1.1). V současnosti se u realizovaných konstrukcí nejčastěji kombinují svislé vytištěné konstrukce s vodorovnými konstrukcemi, které jsou provedeny konvenčními způsoby. Staticky vhodné se zdá být využití železobetonové monolitické desky, která je kloubově uložena na tištěné stěny. Toto řešení vytváří tuhou stropní tabuli, která celý objekt ztužuje. Využití monolitické desky se zdá být o to vhodnější, pokud jsou svislé konstrukce prefabrikované a mezi sebou v porovnání s těmi monolitickými tolik nespolupůsobí. Další frekventovaně využívanou možností je využití sbíjených vazníků, které jsou na stěnu také uloženy kloubově. Tyto vazníky bývají nejčastěji uložené na pozednici nebo železobetonový věnec. V případě velmi lehkých střešních skladeb a umístění do vyšších větrných oblastí může docházet k tahovým reakcím v podporách vazníku. V těchto případech je pak

nutné přikotvit vazník ke stěně (sloupu). To ale může být vzhledem k používání dutých stěnových struktur problémem.

Dalšími možnými alternativami stropů, které mohou být kloubově uloženy jsou stropy zhotovené z různých druhů prefabrikátů. Patří mezi ně skládané vložkové stropy, prefamonolitické filigránové stropy nebo stropy z prefabrikovaných předpjatých stropních panelů Spiroll. Všechny tyto prefabrikáty, ať už jsou to POT nosníky u skládaných vložkových stropů, filigránové panely nebo samotné panely Spiroll, je nutné ukládat do maltového lože nebo různých druhů elastomerových nebo jiných ložisek, aby nedošlo k vzniku lokálních špiček napětí. Zde se znovu zdá být složitá stěnová struktura spíše komplikací. Do budoucna by se vývoj měl zaměřit na oblast spojů a styků, s důrazem na propojení klasických stavebních systémů s 3D tiskem betonových konstrukcí.

4.3.1.2 Pružný styk

Jedná se o netuhé spojení dílců. Při zatěžování dochází ke vzájemnému natočení dílců o úhel, který je přímo úměrný velikosti ohybového momentu v daném místě. Tuhost styčníku je pak vyjádřena jako převrácená hodnota pootočení vyvolaného jednotkovým ohybovým momentem. Typickým příkladem je připojení průvlaku se sloupem v hlavě sloupu pomocí ocelových trnů. Tyto trny jsou předem zabetonované do sloupu a jsou zasunuty do předem připraveného otvoru v průvlaku. [22]

4.3.1.3 Tuhý styk

Takto spojené dílce se při zatížení vůči sobě vzájemně nepootočí. Jedná se o dokonalé spojení prvků a nejblíže se to podobá chování monolitického styčníku. Typickým příkladem tuhých styčníků jsou uložení prefabrikovaných sloupů do kalichových patek. Tento styk je možné předpokládat za rovnocenný monolitickému styku pokud jsou splněny následující podmínky [22]:

1) Spáry musí být vyplněny cementovou maltou anebo jemnozrnným betonem.
2) V tažených oblastech je nutné veškerou výztuž propojit svařením, sešroubováním nebo pomocí svorníků. Případně lze výztuž zakotvit v cementové zálivce.
3) V tlačených oblastech se tlak přenáší výztuží, která musí opět účinně spojena (viz bod 2). Je nutné zabránit vybočení výztuže.

4.3.2 Návrhové stavy

Oproti monolitickým konstrukcím je nutné ty prefabrikované navrhovat kromě finálního návrhového stavu ještě na dočasné návrhové situace. Změny návrhových situací vyplývají z různých statických působení prvků anebo ze změny statického systému (po zmonolitnění). Statický výpočet pak musí také obsahovat detailní návrh spojů a manipulačních úchytů. [22]

4.3.2.1 Manipulace s dílci

Jednou z výhod prefabrikovaných konstrukcí je možnost vyrábět prvky v jiné poloze, než budou osazeny. U všech prvků je však nutné brát zřetel na zatěžovací stavy plynoucí z jejich výroby, dopravy a montáže. Základní dočasné návrhové stavy jsou [22]:

- Vyjímání dílce z formy (bednění) je prvním stavem, kterým jsou dílce namáhány. Dílce jsou zvedány z bednění zdvihacím zařízením. Statické schéma zatěžování

vyplývá z umístění úchytů a typu zdvihacího zařízení. Na prvek při zdvihání působí vlastní tíha a třecí síla vznikající mezi povrchem betonu a bedněním.

- Doprava dílce je jedním z návrhových stavů, který je nezbytný posoudit zejména u dílců, které jsou přepravovány kamionem. Kritické může být i přetáčení dílce při provizorním zajišťování polohy.
- Skladování dílců je jedním z neopomenutelných návrhových stavů. Často bývá zvykem skládat dílce na sebe s podložením dřevem či jiným materiálem. Při návrhu je vhodné předvídat různé nepříznivě působící excentricity.

Z pohledu výroby prefabrikovaných konstrukcí realizovaných aditivní technologií je jasné, že odpadá zatížení třecí sílou mezi bednění a betonem, jelikož tištěné konstrukce nevyžadují použití bednění. Jak již bylo zmíněno, tištěné konstrukce jsou často nevyztužené, a tak změny statického schématu dané transportem dílce můžou způsobit jeho porušení. Z hlediska skladování dílců je vhodné přechovávat prvky již ve výsledné poloze tak, aby nedocházelo ke vzniku dalších zatěžovacích stavů, které se liší od toho výsledného.

4.3.2.2 Navrhování úchytů

V praxi se využívá široká škála úchytů sloužících k manipulaci s dílcem. Jejich tvar a uspořádání musí být navrženo v souladu se způsobem uchycení, zvedáním a vlastnostmi manipulačního zařízení. Pro spolehlivost úchytu je rozhodující zpravidla stav porušení jednorázovým namáháním. V potaz se berou následující způsoby porušení [22]:

- Přetržení nebo ulomení oka (šroubu)
- Vytržení oka (šroubu) z betonu
- Vytržení oka (šroubu) spolu s přilehlou částí betonu
- Roztržení betonu příčným tahem od soustředného namáhání
- Otlačení betonu

4.4 Stěny zhotovené aditivní technologií

Mezi stěnami zhotovenými aditivní technologií a těmi zhotovenými konvenčním způsobem je hned několik zásadních odlišností. Monolitické stěny jsou betonovány do bednění, které čerstvému betonu poskytuje oporu a určuje jeho tvar. Na druhou stranu, stěny zhotovené aditivní technologií bednění nepotřebují. To s sebou však (zejména v rané fázi) přináší hned několik technologických výzev. V kapitole 4.4.1 jsou popsány způsoby porušení v raném stádiu, kdy je beton čerstvý a jsou zde nastíněny různé druhy úprav vedoucí ke zlepšení tisknutelnosti. Kapitola 4.4.2 se věnuje způsobům porušení stěn po vytvrdnutí betonu.

4.4.1 Způsoby porušení v raném stádium

a) Zhroucení čerstvě vytištěného filamentu

Toto porušení je spjaté se základní podmínkou na tisknutelnost směsi. Jedná se o zhroucením čerstvě uloženého filamentu. Jehož počáteční napětí na mezi zplastizování (initial yield stress) musí být větší než hydrostatický tlak jedné vrstvy $p_h = h_0 \rho g$, kdy h_0 je tloušťka vytištěného filamentu, ρ je hustota čerstvé směsi a g je tíhové zrychlení. Studie [23] také poukazuje na fakt, že u vyšších rychlostí tisku by mohlo dojít ke vzniku hydrodynamických tlaků, které by mohly mít vliv na stabilitu vytištěného

filamentu. Toto porušení tedy úzce souvisí s technologií tisku a vlastnostmi tištěné směsi. [23]

b) Rozdrcení spodní vrstvy vl. tíhou vrchních vrstev

Jedná se o rozdrcení spodní vrstvy, která je zatížena vl. tíhou všech vrstev nad ní. Aby nedošlo k jejímu kolapsu, tak v každém časovém okamžiku musí platit, že napětí na mezi zplastizování v daném čase je větší než $H\rho g/\sqrt{3}$. [23]

c) Sednutí konstrukce

Při tisku vyšších konstrukcí může docházet k relativně velkému poklesu (sednutí). U stěny vysoké 2 m to může být až v řádu desítek centimetrů. K tomuto jevu může dojít, i když nebylo překročeno napětí na mezi zplastizování. Aby bylo omezeno sednutí, tak studie zavádí maximální dovolenou relativní deformaci ε_{max}. Platí, že počáteční smykový modul pružnosti G_0 musí být větší než $h_0\rho g/\varepsilon_{max}$. [23]

Při každém uložení nové vrstvy se zvyšuje napětí v nižších vrstvách o konstantní hodnotu $h_0\rho g$. Přírůstky deformací se však s postupem času snižují, což je dáno postupným tuhnutím a tvrdnutím betonu. [23]

d) Stabilitní porušení

Kromě porušeních spjatých zejména s materiálovou pevnosti se můžeme také setkat se stabilitními typy porušení. Ty jsou u 3DPC konstrukcí poměrně frekventované, jelikož tisknuté prvky bývají často poměrně subtilní. Studie uvádí vztah pro kritickou výšku plné obdélníkové konstrukce H_c, u které lze očekávat vybočení při zatížení vlastní tíhou:

$$H_c \cong \left(\frac{8EI}{\rho g A}\right)^{1/3} \tag{1}$$

kde E je modul pružnosti, I je moment setrvačnosti průřezu a A je průřezová plocha. Z rovnice (1) lze tedy vyjádřit minimální hodnotu modulu pružnosti E, při které nedojde k vybočení:

$$E_{min} \cong \frac{{H_c}^3 \rho g A}{8I} \tag{2}$$

Studie poukazuje na fakt, že požadavek na minimální elastický modul pružnosti vycházející z rovnice (2) závisí na třetí mocnině výšky konstrukce, kdežto požadavek na napětí na mezi zplastizování (viz *b)*) závisí pouze na mocnině první. Lze tedy předpokládat, že pro každou konstrukci existuje jistá výška, která bude rozhodovat o způsobu porušení. Je-li výška objektu menší než ta zmíněná, tak rozhodující porušení bude to rozdrcením spodní vrstvy. Dojde-li však k překročení zmíněné výšky, rozhodující způsob porušení bude stabilitního rázu. [23]

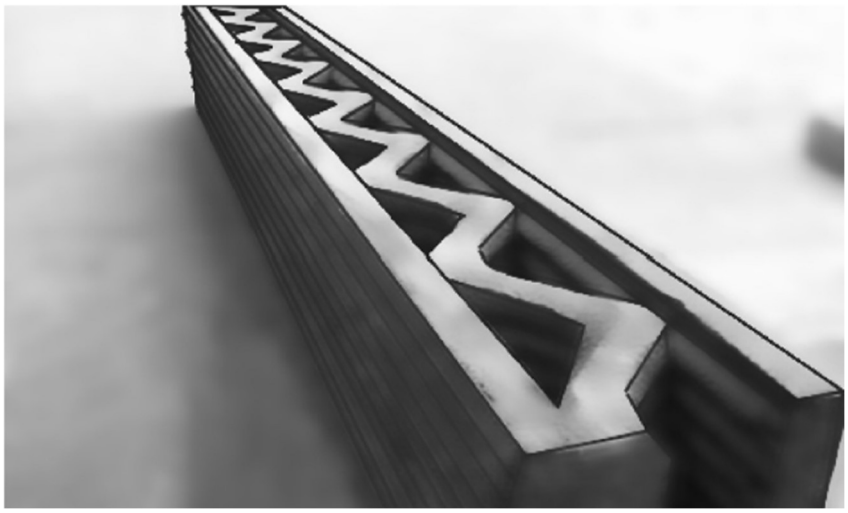
Na základě rovnice (1) lze navrhnou následující opatření pro zlepšení stability tisknuté konstrukce v raném stádiu:

- **Úpravy ovlivňující modul pružnosti E a hustotu směsi ρ**

Navrhnout viskóznější směs, která bude mít větší modul pružnosti. Upravit složení směsi přidáním většího množství urychlovačů tuhnutí, které urychlí nárůst hodnoty modulu pružnosti v závislosti na čase. Odlehčení směsi může být také jednou z úprav jak dosáhnout lepší tisknutelnosti.

- **Úpravy momentu setrvačnosti *I***

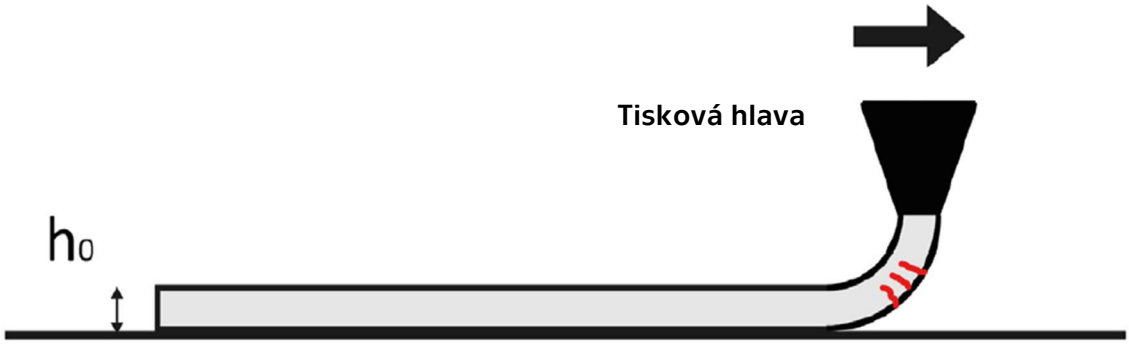
Jedná se o úpravy geometrie konstrukce. V dnešní době se můžeme setkat s celou řadou stěnových struktur, které více či méně přispívají k vylepšení stability konstrukce. Nejedná se však o prosté zvětšení momentu setrvačnosti. Důležitou roli hraje samotná geometrie konstrukce. Ta může při správném návrhu výrazně zlepšit stabilitu konstrukce. Kromě zlepšení mechanických vlastností nám vhodné geometrie umožňují šetřit materiál, vylehčovat konstrukce a zlepšovat tepelně-technické a akustické vlastnosti. Příkladem takovýchto struktur je vylehčená struktura stěny s vnitřní příhradovinou (viz Obrázek 22). [23]



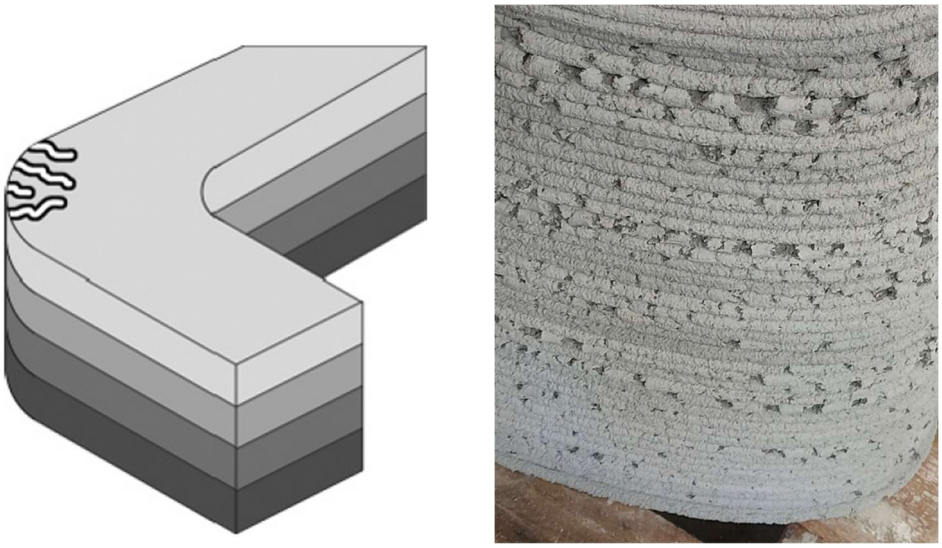
Obrázek 22 Příklad vylehčené stěnové struktury tvaru příhrady [23]

e) Vznik trhlin v raném stádiu

U materiálů kašovité konzistence se předpokládá, že po překročení pevnosti na mezi zplastizování (yielding criterion) nedojde ke tvorbě trhlin, ale k „tečení" materiálu. Nesprávně navržené směsi s nízkou viskozitou označované jako „no slump" směsi však nemusí tento předpoklad splňovat. Následkem jsou pak trhliny vznikající při extruzi na taženém povrchu tištěného filamentu. Trhliny tedy mohou vznikat například při tisku oblouků s malým poloměrem (viz Obrázek 24 - vlevo), kdy jsou vnější vlákna tisknutá rychleji než ty vnitřní, čímž dochází ke vzniku tahových napětí ve vnějších vláknech. Trhliny můžou však vznikat již při samotné extruzi na spodní straně filamentu (viz Obrázek 23).



Obrázek 23 Naznačení tahových trhlin při spodní straně filamentu vzniklých při extruzi [23]



Obrázek 24 Trhliny vzniklé pohybem tiskové hlavy po obloukové trajektorii s malým poloměrem (vlevo) [23] a trhliny vzniklé špatnou konzistencí směsi (vpravo) [vlastní]

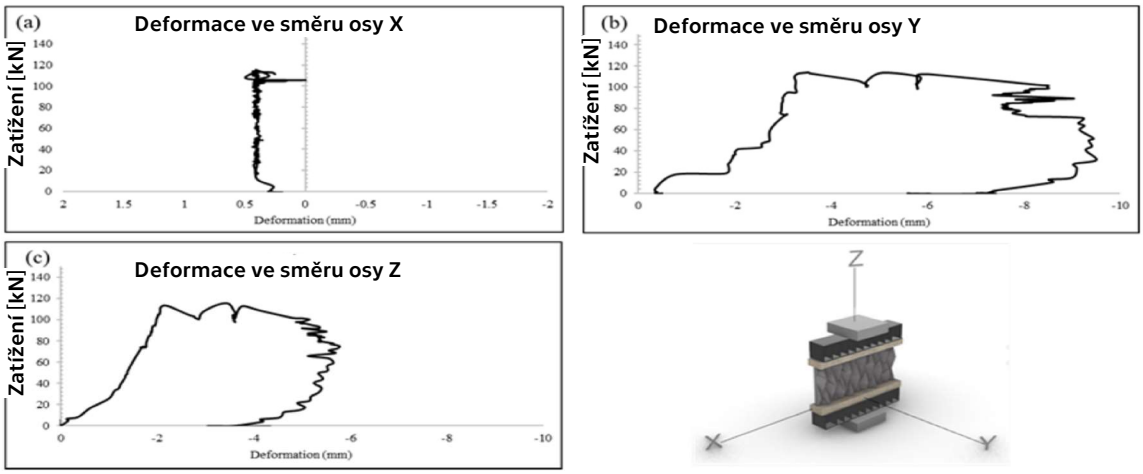
Řešení této problematiky spočívá v navržení dostatečně viskózní směsi a vyvarování se tisku oblouků s malých poloměrů, jako jsou rohy ostrých úhlů. [23]

4.4.2 Způsoby porušení stěn po vytvrdnutí betonu

Za účelem popisu chování stěn zhotovených aditivní technologií, byly vybrány 4 studie ([24], [25], [17], [26]). Budou popsány zejména typy porušení a různé faktory, které je ovlivňují.

Studie se shodují na tom, že stěny zhotovené aditivní technologií jsou velmi křehké. Při zatěžování stěn docházelo nejčastěji k náhlému kolapsu bez varování. U většiny zkušebních těles došlo při zatěžování dostředným tlakem k velké příčné deformaci, která byla zpravidla větší než ta svislá. Tyto deformace naznačují, že komplexní geomterie určují způsob porušení. Tisknuté struktury, které šetří materiál, jsou kvůli své štíhlosti náchylnější ke stabilitním problémům jako je vybočení. Je třeba si uvědomit, že nemusí dojít pouze k vybočení stěny jako celku, ale i k vybočení elementárních částí stěn v rámci stěnové struktury.

Studie č. 9 [24] porovnává předpokádanou materiálovou únosnost stěny s výsledky zkoušek. Materiálová únosnost byla vypočtena na základě vztahu f_c*A, kde f_c je pevnost betonové směsi v tlaku a A je celková plocha průřezu (bez dutin). Naměřené výsledky zkoušek jsou v porovnání s vypočtenými hodnotami výrazně nižší (až 2,76x menší) než se předpokládalo. To je dáno stabilitním způsobem porušení, kdy dochází k vybočení štíhlé a duté stěny. Opět je však možné předpokládat, že existuje jistá výška, při které nebude rozhodovat stabilitní způsob porušení, ale dojde k překročení pevnosti materiálu v tlaku. Obecně lze říci, že vyšší stěny budou mít problémy spíše s vybočením, kdežto relativně nízké stěny budou mít tendenci porušit se drcením.



Obrázek 25 Deformace ve směru os X (vlevo nahoře), Y (vpravo nahoře) a Z (vlevo dole) a axonometrický pohled na stěnu (vpravo dole) [24]

Vliv vodorovné výztuže

Studie č. 11 [17] se zabývala vlivem ručně vkládané vodorovné výztuže. Výztuž byla v této studii vkládána mezi vrstvy. Oproti nevyztuženým vzorků, u kterých se svislé trhliny koncentrovaly v rozích, se u vyztužených prvků trhliny utvořily rovnoměrněji po celé stěně. Ve výztuži bylo naměřeno tahové napětí, což indikuje, že výztuž zabraňovala příčné deformaci. U většiny zkoušených stěn se však ukázalo být rozhraní vrstev, ve kterých byla umístěna výztuž, jako oslabené. Při porovnání stejně velikých stěn se stejnou strukturou disponovaly ty nevyztužené vyššími únosnostmi.

Vliv rozptýlené výztuže

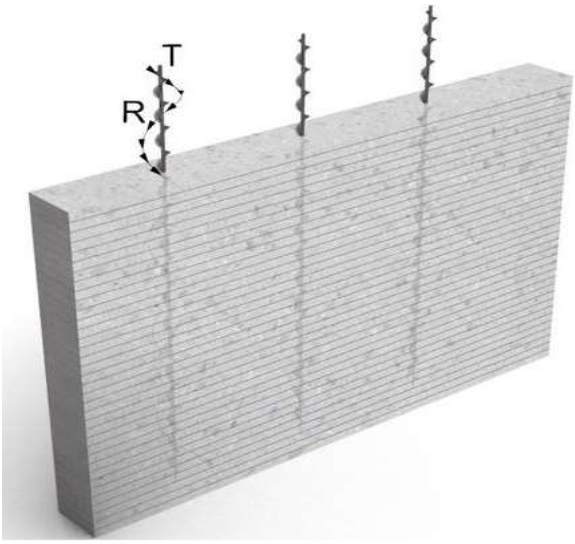
Je žádoucí, aby byla v budoucnu věnována pozornost vlivu rozptýlené výztuže nejen na menší zkušební tělesa, nýbrž i na komplexní stěnové chování. Potenciál využití rozptýlené výztuže je veliký a při jejím vhodném využití je možné vylepšit vlastnosti konstrukce. Aplikace rozptýlené výztuže by mohla umožnit využití méně staticky efektivních stěnových struktur (jako jsou struktury na Obrázek 31), a tak umožnit architektům větší volnost při návrhu nenosných i nosných konstrukcí.

4.4.3 Stěnové struktury

Stěny zhotovené aditivní technologií jsou málokdy tištěné jako plné. V praxi se objevuje celá řada stěnových struktur, které zlepšují vlastnosti stěny. Vhodně zvolené struktury ovlivňují jak mechanické vlastnosti, tak ty stavebně fyzikální. Při návrhu stěnových struktur je cílem najít rovnováhu mezi množstvím použitého materiálu, únosností struktury, akustickými, požárními a tepelně technickými vlastnostmi.

Plné stěny

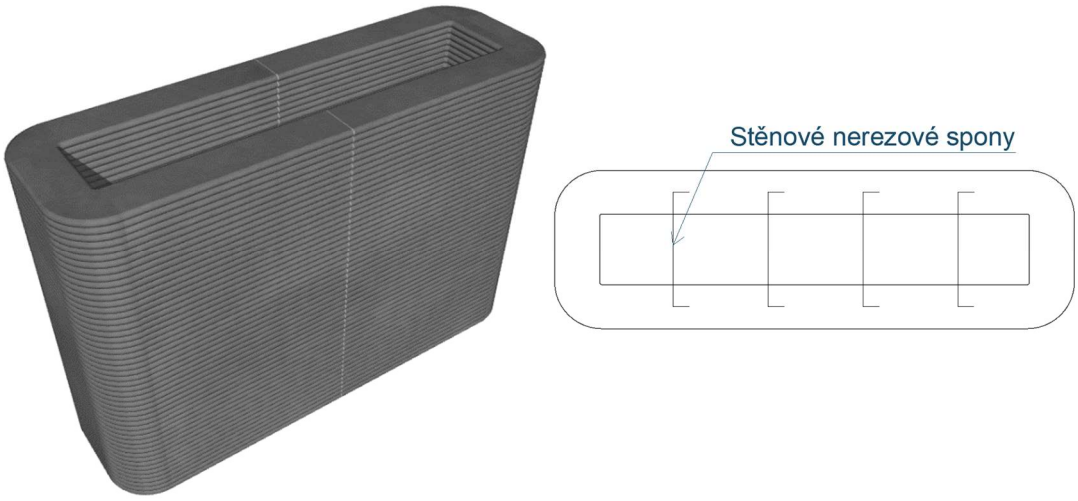
Jedná se o nejjednodušší stěnovou strukturu. Můžou to být jednovrstvé ale i vícevrstvé stěnové struktury, které by bylo nutné v tuzemských podmínkách zateplit vnější konvenční tepelnou izolací. Podle rozsahu a charakteru objektu se tloušťka těchto stěn bude odvíjet zejména od požadavků na stavitelnost (viz kapitola 4.4.1) a akustiku. Větší tloušťka plné stěny v porovnání s ostatními stěnovými strukturami splňuje požadavky na krytí výztuže a umožňuje tak použití šroubovicových výztuží. Plné stěny disponují v porovnání s dutinovými stěnami (vnitřně nezateplenými kamennou vlnou) vysokou požární odolností. [18] [21]



Obrázek 26 Plná stěna se šroubovicovou výztuží [18]

Prosté duté stěny

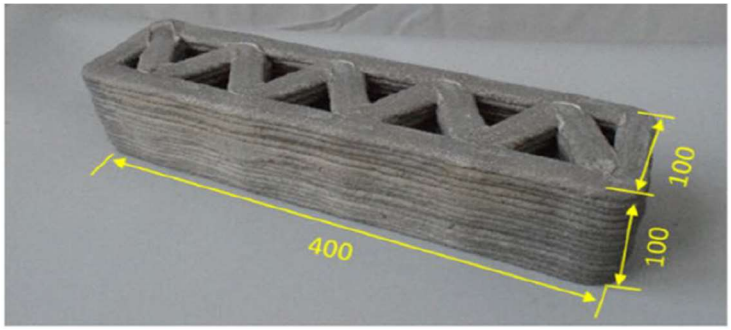
Jedná se o nejjednodušší dutinovou strukturu. Struktura stěny se skládá z vnitřního a vnějšího stěnového segmentu. Tyto stěnové segmenty bývají společně propojeny pomocí nerezových spon, které jsou manuálně vkládány při tisku mezi vrstvy a stabilizují stěnu. Spony však nezajišťují dostatečné smykové propojení segmentů stěny, a tak je celkový moment setrvačnosti dán součtem jednotlivých momentů setrvačností stěnových segmentů. Dutina mezi stěnovými segmenty se obvykle plní různými druhy tepelných izolací. Nejčastěji se užívá sypaná nebo stříkaná izolace. Tato stěnová struktura se díky své velké dutině jeví jako nejvhodnější z hlediska vedení instalací TZB. Na druhou stranu se jedná o jednu z méně únosných stěnových struktur, která disponuje i relativně špatnou požární odolností. Za účelem zlepšení požárních a tepelně izolačních vlastností se do dutiny stěny přidává kamenná vlna. Přidáním kamenné vlny se požární odolnost stěny dá srovnat se stěnou plnou. [18]



Obrázek 27 Prostá dutá stěna – axonometrický pohled (vlevo) a řez s naznačenými sponami (vpravo) [vlastní]

Stěny s vnitřní příhradovinou

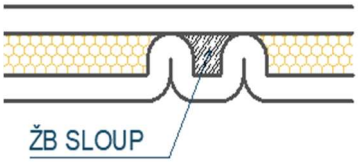
Jedná se o jednu z nejběžněji používaných stěnových struktur. Hojně se rozšířila zejména kvůli svému skvělému poměru množství materiálu ku únosnosti. Její vhodně zvolená geometrie přispívá ke zlepšení stability stěny v ranné fázi i ve fázi, kdy je betonu zatvrdlý. Díky vnitřní příhradovině není nutné do stěny vkládat spony. Zároveň je možné dutiny vyplnit různými tepelnými izolacemi a vést jimi rozvody TZB. [27] [21] [23]



Obrázek 28 Stěnová struktura s vnitřní příhradovinou. [27]

Stěny s vnitřními železobetonovými sloupy

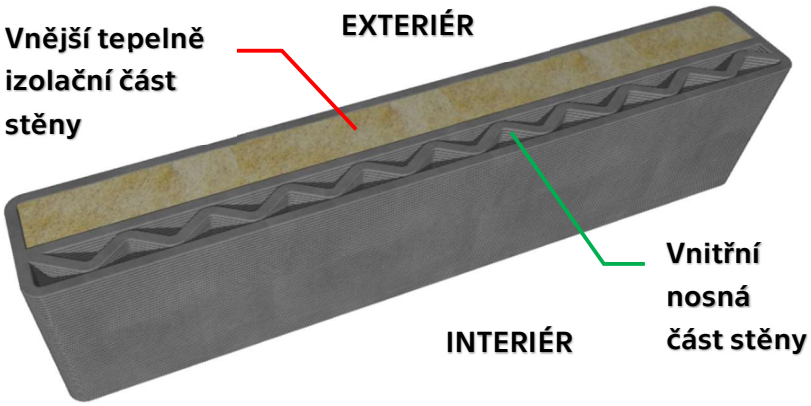
Nejčastěji se jedná o prosté duté stěny, které jsou po určitých vzdálenostech vyztuženy železobetonové sloupy. Geometrie stěny vytváří ztracené bednění pro vybetonování sloupů. Ty společně s klasicky vyztuženými překlady tvoří železobetonovou rámovou konstrukci. Stěna zastává potom spíše výplňovou funkci. Konstrukční systém skládající se z železobetonových rámů je potom snadno obhájitelný před stavebními úřady, které nemusí být otevřené novým technologiím. Nevýhodou jsou tepelné mosty vznikající v místech sloupů.



Obrázek 29 Stěnová struktura s vnitřními ŽB sloupy [vlastní]

Kombinované stěny

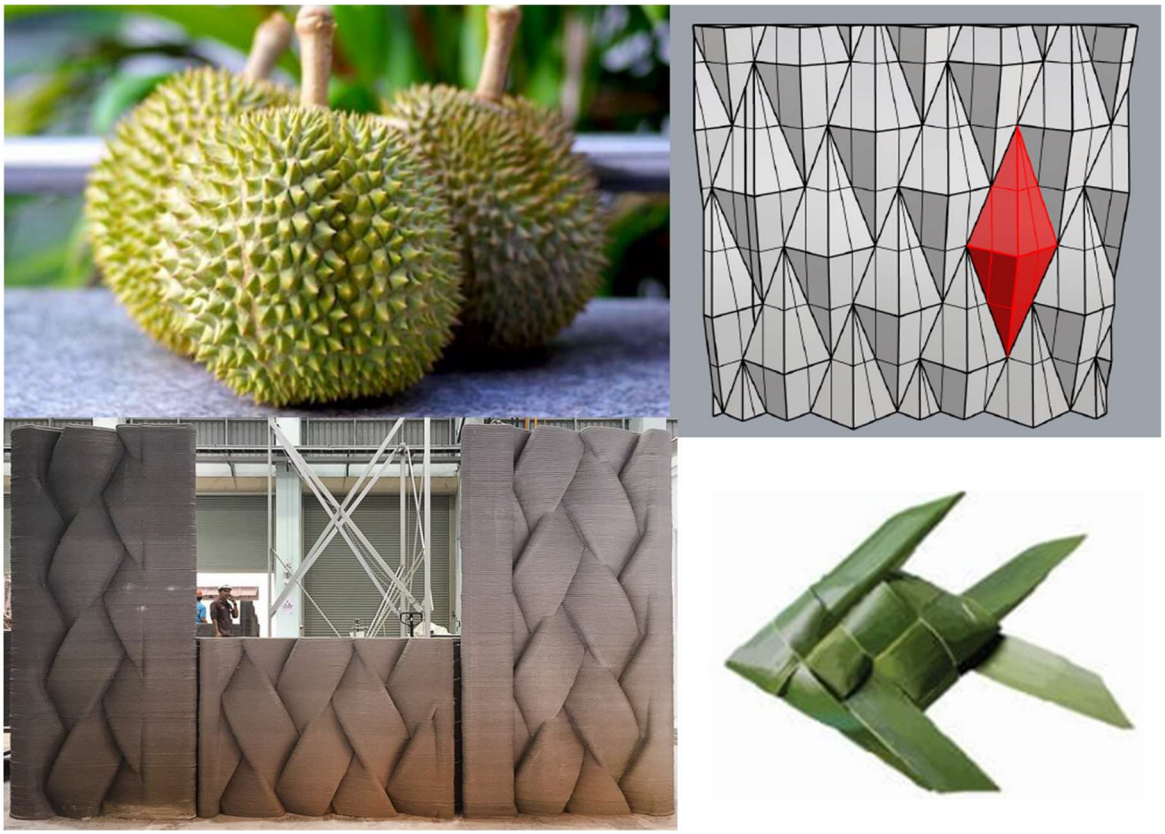
Kombinované stěny se nejčastěji skládají ze 2 částí, přičemž každá z částí plní odlišnou funkci. První z částí – ta vnitřní plní nosnou funkci a ta druhá – vnější tvoří tepelně izolační funkci. Struktura nosné části bývá opatřena vnitřní příhradovinou. Struktura druhé – vnější části je nejčastěji prostá dutá a je spřažena s nosnou částí pouze nerezovými sponami. Vnější tepelně izolační část je vyplněna tepelnou izolací.



Obrázek 30 Axonometrický pohled na kombinovanou stěnu [vlastní]

Designové stěny

Jedná se o stěny, které nejsou primárně nosné, ale spíše okrasné. Tyto stěnové struktury jsou často inspirované různými přírodními nebo uměleckými motivy.



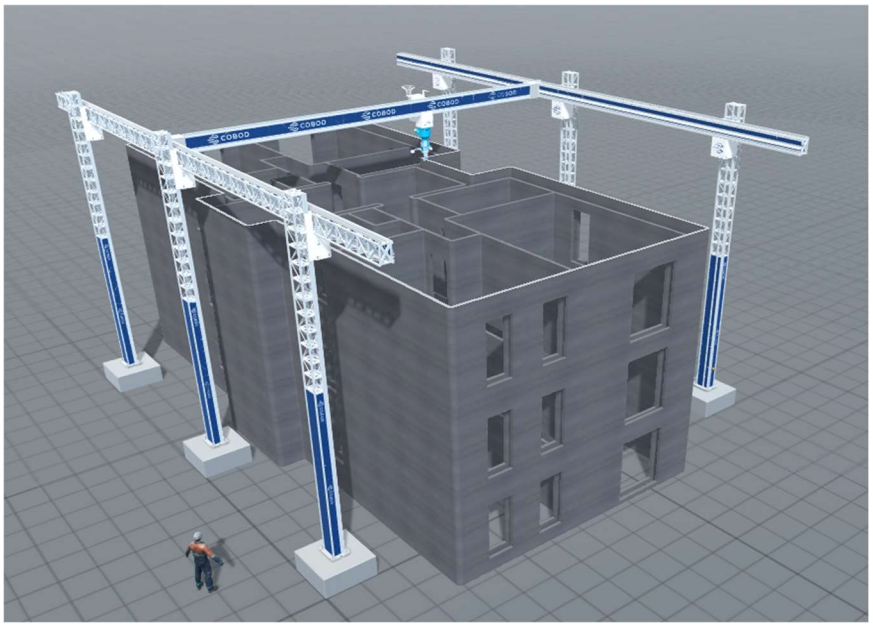
Obrázek 31 Organická struktura inspirovaná skořápkou durianu (ovoce; nahoře) a struktura inspirovaná tradičními Thajskými ručními pracemi (dole)

4.4.4 Stroje určené k tisku

V souvislosti s velikostí tisknutého objektu se můžeme setkat s mnoha rozdílnými mechanismy translace tiskové hlavy. Pro zhotovení základních elementů se nejčastěji využívá 6osé robotické rameno. V tomto případě se slučuje systém dopravy (pumpa) a ukládání (tisková hlava) materiálu. Další frekventovaně používaný mechanismus je napodobením klasických 2D tiskáren na papír, jejichž hlava se posunuje po mostovém jeřábu. K zajištění 3D tisku bylo nutné přidat ještě ovládání výškové polohy hlavy. Většina realizovaných 3DPC konstrukcí rodinných domů byla zhotovena právě za pomocí portálových jeřábů. Na obrázku níže (viz Obrázek 32[1]) je vyobrazena konstrukce jeřábu firmy COBOD a svislé nosné konstrukce 3patrové plánované budovy 6 Unit Apartment Block navržené architekty Harcourt Architects. Konstrukce se skládá z 6 svislých sloupků kotvených do základových patek, 2 jeřábových drah a příčného mostového jeřábu, na kterém je umístěna tisková hlava.

Využití portálových jeřábů v praxi se v poslední době stává velmi oblíbenou volbou tiskového zařízení. Je zajímavé pozorovat, jakou rychlostí se ubírá vývoj tiskových zařízení v oblasti 3DPC. Zejména vezme-li se v potaz, že mnozí kritici této technologie viděli jako jeden z hlavních problémů a omezení technologie právě velikost tiskáren.

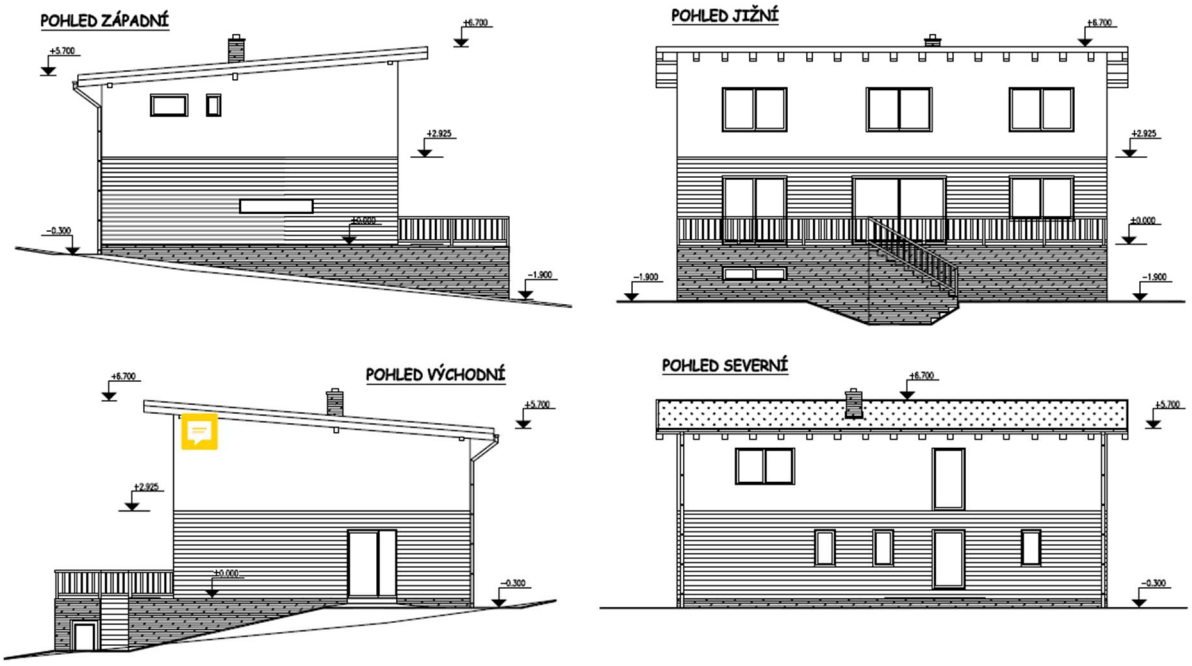
[1] Obrázek utvořen pomocí online softwaru COBOD configurator. Dostupné z: https://cobod.com/configurator/



Obrázek 32 Realizace 6 Unit Apartment Block [viz [1]]

PRAKTICKÁ ČÁST

5. Popis konstrukce



Obrázek 33 Pohledy na konstrukci

Jedná se o objekt s 2 nadzemními podlažími a jedním podlažím, které je ve svahu. Půdorysné rozměry konstrukce jsou 14,5 x 10 m. Objekt je vysoký 6,7 m (uvažováno od projektové nuly, která je v úrovni podlahy 1. NP). Konstrukční systém je stěnový.

Objekt je zastřešen pultovou střechou, která je vytvořena krokvemi uloženými na pozednice. Pozednice je nutné zakotvit ke stěnám. V případě duté struktury bude tedy nutné nad stěnu vybetonovat klasický železobetonový věnec, který bude jednak sloužit k zakotvení pozednice, tak bude ztužovat vytištěné stěny.

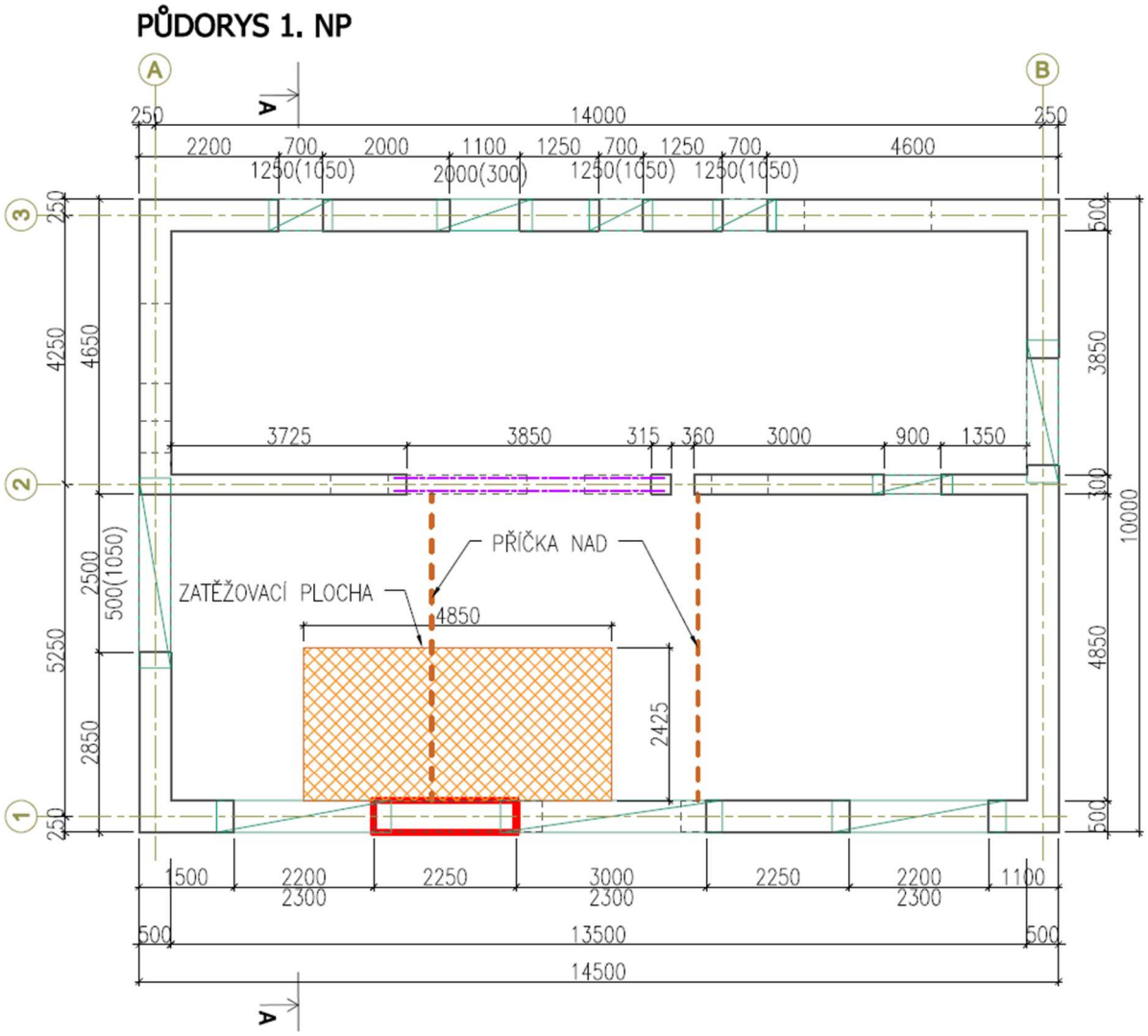
Překlady nad otvory jsou řešeny jako klasické keramické a u střední zdi je využitý ocelový překlad. Při ukládání překladů je nutné dbát na to, aby nedošlo ke zborcení čerstvě vytištěných vrstev, což úzce souvisí se zvolenou tiskovou směsí a rychlostí tisku. Překlady je možné ukládat do ještě čerstvě vytištěné stěny, což je sice rizikové z hlediska borcení vrstev, na druhou stranu však výhodné, protože není nutné využít maltového lože. Naopak pokud bude překlad ukládán na vytvrdlou stěnu je z hlediska vzniku lokálních napětí nutné na dutou stěnu nanést maltové lože, což může být problematické.

Rozteč příčných stěn 14 m znamená, že stěny budou od vodorovného zatížení pnuté svisle do stropní tabule a desky. Od stropů se tedy vyžaduje, aby vytvářely tuhou stropní tabuli. Z tohoto důvodu jsou v našem případě řešené jako vložkové Miako a jsou pnuté v příčném směru na podélné stěny. Kromě vložkových stropů by bylo vhodné použít například klasickou monolitickou stropní desku, která taktéž poskytuje tuhou stropní rovinu. Z hlediska tuhosti konstrukce je vhodnější provést tištěné konstrukce monoliticky pomocí portálového jeřábu jako je na obrázku výše (Obrázek 32 Realizace 6 Unit Apartment Block [viz [1]]). Zastřešení objektu klasickým krovem, které bylo původně zvolené však nezajišťuje požadované ztužení a zdá se býti spíše nevhodné. Aby bylo možné využít zastřešení klasickým krovem, bylo by nutné do roviny krokví

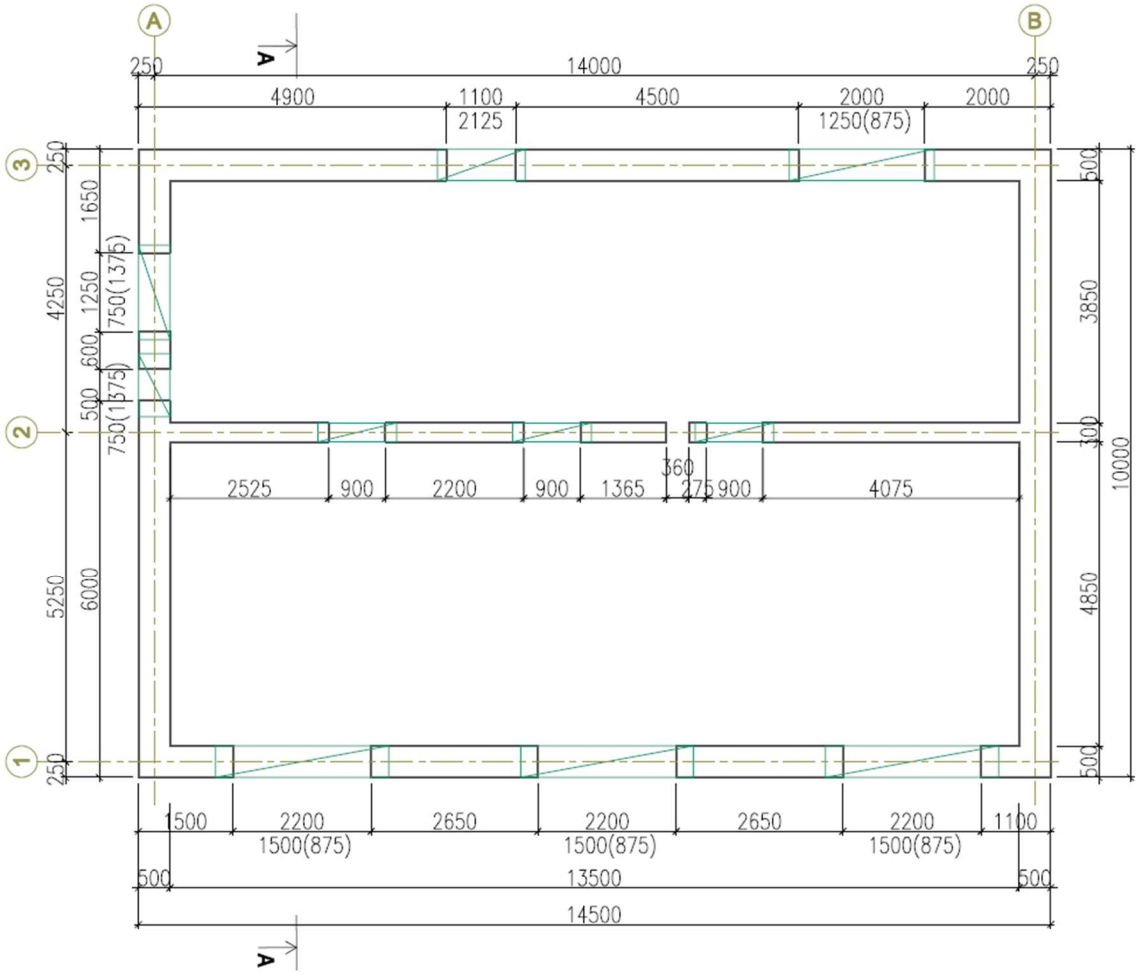
navrhnout podélné ztužidlo nebo podbití. Stěny v 2. NP musí být tedy minimálně opatřeny železobetonovým věncem. Pokud by tištěné stěny byly prefabrikované, tak by význam věnce ještě narostl, protože by jinak nebylo nic, co by bránilo překlopení stěny od účinků vodorovného zatížení. Samozřejmě se zde ihned nabízí otázka, jak se železobetonový věnec (stropní deska) bude betonovat nad dutou stěnovou strukturou.

Objekt je založen na základových pasech, při jejichž návrhu je nutné dbát na to, aby nedocházelo k nerovnoměrnému sedání.

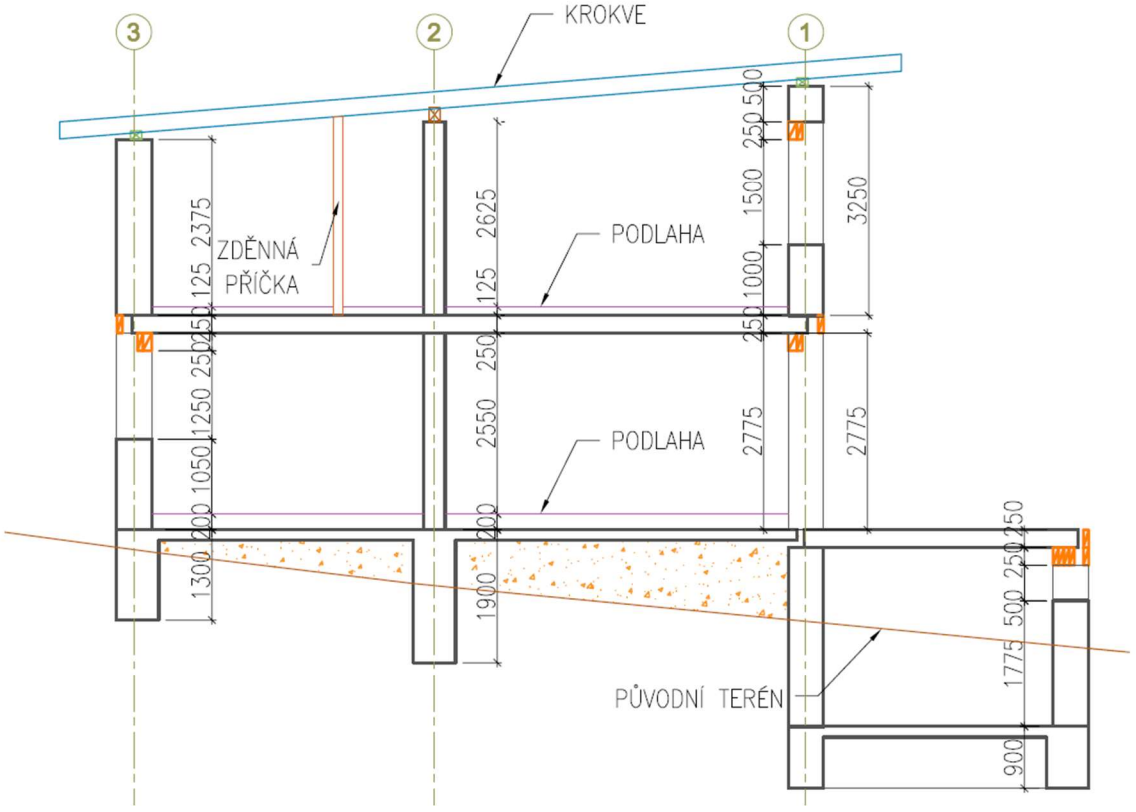
5.1 Konstrukční schémata



PŮDORYS 2. NP

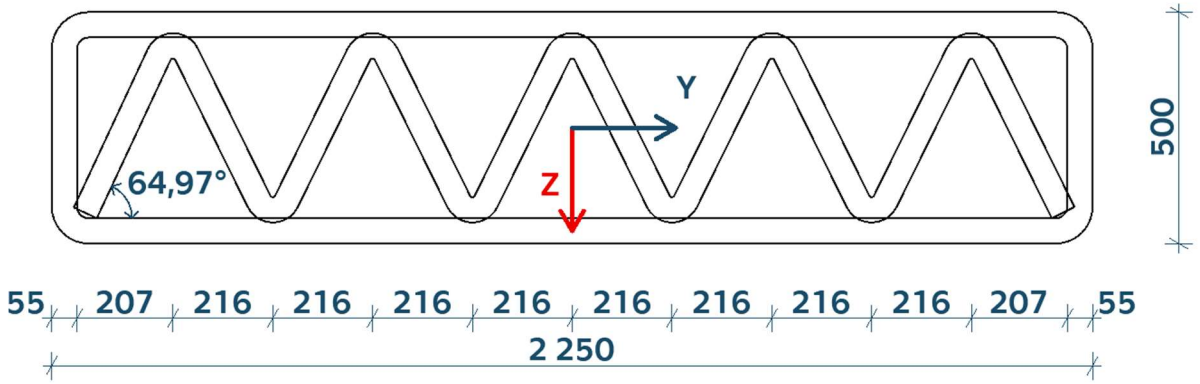


ŘEZ A-A'



5.2 Posuzovaná stěna

Byla vybrána jedna z nejběžnějších dutých stěnových struktur – stěnová struktura s vnitřní příhradovinou. Vnější rozměry stěny jsou 2250x500 mm, tl. filamentů je 55 mm.



Obrázek 34 Stěnová struktura

Průřezové charakteristiky

Plocha průřezu	A =	$5{,}4254 \cdot 10^5$	mm^2
Momenty setrvačnosti	I_y =	$1{,}6560 \cdot 10^{10}$	mm^4
	I_z =	$2{,}5512 \cdot 10^{11}$	mm^4
Poloměry setrvačností	i_y =	175	mm
	i_z =	686	mm

Uvedené průřezové charakteristiky byly vypočteny pomocí softwaru SCIA Engineer 19.1.

5.3 Popis materiálů nosných konstrukcí

Beton: C 40/50 XC4

Aby bylo možné simulovat vliv prodlevy mezi tiskem vrstev byl převzat model ze studie [28], který popisuje závislost pevnosti rozhraní na časové prodlevě. Blíže je tento model popsán v kapitole 7.2.1.

6. Zatížení

6.1 Vodorovné zatížení

SKLADBA VLOŽKOVÉHO STROPU NAD 1. NP

Vrstva	Obj. hmotnost	Tl. vrstvy	$f_{pl,k}$	γ_i	$f_{pl,d}$
	[kg/m^3]	[mm]	[kN/m^2]	[-]	[kN/m^2]
Ker. Dlažba	2600	10	0,26	1,35	0,35
Anhydrit	2100	50	1,05	1,35	1,42
Tvrzený EPS	50	200	0,10	1,35	0,14
Strop PTH 250 mm		250	3,96	1,35	5,35
Omítka	2100	10	0,21	1,35	0,28

$f_{pl,k}$ = 5,58 $f_{pl,d}$ = 7,53

SKLADBA STŘECHY NAD 2. NP

Vrstva	Obj. hmotnost	Tl. vrstvy	$f_{pl,k}$	γ_i	$f_{pl,d}$
	[kg/m^3]	[mm]	[kN/m^2]	[-]	[kN/m^2]
Substrát	1300	80	1,04	1,35	1,40
Prkenný záklop	500	20	0,10	1,35	0,14
Střešní trámy 180/240	700	45,5	0,32	1,35	0,43
Tep. Izolace - min. vlna	150	240	0,36	1,35	0,49
Podhled	50 kg/m2	15	0,50	1,35	0,68
T.i. Na podheldu	150	100	0,15	1,35	0,20
			$f_{pl,k}$ =	**2,47**	**$f_{pl,d}$ =** **3,33**

UŽITNÉ ZATÍŽENÍ

TABULKA UŽITNÝCH ZATÍŽENÍ

KATEGORIE	TYP	q_k [kN/m^2]	Q_k [kN]
KAT A	stropní kce	1,5	2

6.2 Svislé zatížení

VI. tíha příčky v 2. NP – uvažuje se příčka s plošnou hmotností 100 *kg/m²*

Tištěné stěny mají objemovou hmotnost 2500 *kg/m³*

6.3 Zatížení větrem

II VĚTRNNÁ OBLAST				
Výchozí základ. rychlost větru	$v_{b,0}$	=	25	m/s
Součinitel směru	c_{dir}	=	1	/
Součinitel roč. období	c_{season}	=	1	/
Základní rychlost větru	**v_b**	**= $v_{b,0}$ c_{dir} c_{season}**	**25**	**m/s**

Referenční výška	ze	=	7	m
Kategorie terénu IV	z0	=	1	m
	zmin	=	10	m
Intenzita turbulence	$I_v(z)$	= $k_I/(c_{0(z)}\ln(z_e/z_0))$	0,514	/
Součinitel turbulence	k_I	=	1	/
Součinitel orografie	$c_0(z)$	=	1	/
Střední rychlost větru	v_m	= v_b $c_0(z)$ $c_r(z)$	13,49	m/s
Součinitel drsnosti terénu	$c_r(z)$	=$k_r\ln(z_e/z_0)$	0,540	m/s
Součinitel terénu	k_r	=0,19(z_0/0,05)^0,07	0,234	/

Součinitel expozice	c_e	=	2,1	/
Základ. Dynam. Tlak větru	q_b	=0,5*1,25*v_b^2	390,63	Pa
Maximální dynamický tlak	**$q_p(z)$**	=(1+7*$I_v(z)$)*0,5*1,25v_m^2	**522,81**	**Pa**

6.4 Zatížení sněhem

sklon střechy 5%

IV SNĚHOVÁ OBLAST	s_k	=	2	kN/m^2
Tvarový součinitel	μ	=	0,8	/
Součinitel expozice	C_e	=	1	/
Tepelný součinitel	C_t	=	1	/
$s = \mu * C_e * C_t * s_k$	s	$=s_k \mu C_e C_t$	**1,6**	kN/m^2

6.5 Stanovení účinků zatížení na posuzovanou stěnu

NORMÁLOVÁ SÍLA

ZATÍŽENÍ	$f_{pl,k}$	z.šířka	z.délka	F_k	γ_i	F_d
	[kN/m^2]	[m]	[m]	[kN]	[-]	[kN]
SNÍH	1,6	4,09	4,85	31,74	1,50	47,61
SKLADBA STŘECHY NAD 2. NP	2,47	4,09	4,85	48,96	1,35	66,10
UŽITNÉ	1,5	2,425	4,85	17,64	1,50	26,46
SKLADBA STROPU NAD 1. NP	5,58	2,425	4,85	65,63	1,35	88,60

ZATÍŽENÍ	Obj. hm.	$A_{průřezu}$	z.výška	F_k	γ_i	F_d
	[kg/m^3]	[m^2]	[m]	[kN]	[-]	[kN]
VL. TÍHA STĚNY 2.NP	2500	0,54254	3,25	44,08	1,35	59,51
VL. TÍHA STĚNY 1.NP	2500	0,54254	2,775	37,64	1,35	50,81
VL. TÍHA STĚNY NAD OTVORY	2500	0,54254	2,7	36,62	1,35	49,44
STŘÍKANÁ TI. 2.NP	30	0,58246	3,25	0,57	1,35	0,77
STŘÍKANÁ TI. 1.NP	30	0,58246	2,775	0,48	1,35	0,65
STŘÍKANÁ TI. NAD OTVORY	30	0,58246	2,7	0,47	1,35	0,64

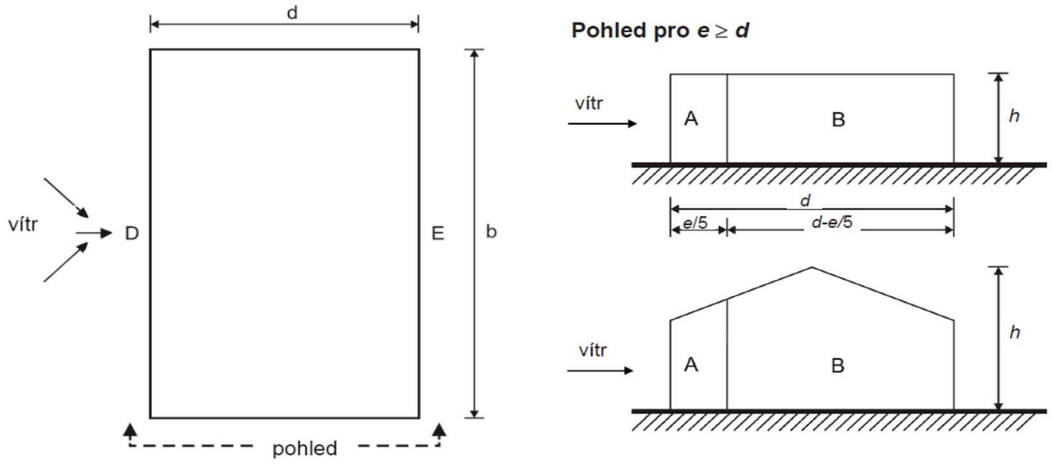
ZATÍŽENÍ	$f_{pl,k,svisle}$	z.výška	z.délka	F_k	γ_i	F_d
	[kg/m^2]	[m^2]	[m]	[kN]	[-]	[kN]
VL. TÍHA PŘÍČKY 2.NP	100	2,625	2,425	6,37	1,35	8,59

F_k = 258,46 **F_d = 399,18**

OHYBOVÝ MOMENT

MOMENT OD ZATÍŽENÍ VĚTREM $M_{vítr}$

			e	14		
z.šířka	4,875	m	b	14,5	m	
Výška stěny $h_{stěna}$	2,775	m	d	10	m	
			h_{budovy}	7	m	
$f_{lin,sání} = z.š. \cdot c_{pe,10,B} \cdot q_p(z)$	-3,57	kN/m				
$f_{lin,tlak} = z.š. \cdot c_{pe,10,D} \cdot q_p(z)$	1,16	kN/m	vítr kolmo na stěnu	$c_{pe,10,A}$	-1,2	sání
				$c_{pe,10,B}$	-1,4	sání
$M_{vítr,sání}$ = 1/8 $f_{lin,sání} h_{stěna}^2$	**-3,43**	kNm	podélně se stěnou	$c_{pe,10,D}$	0,8	tlak
$M_{vítr,tlak}$ = 1/8 $f_{lin,tlak} h_{stěna}^2$	**1,12**	kNm		$c_{pe,10,E}$	-0,5	sání

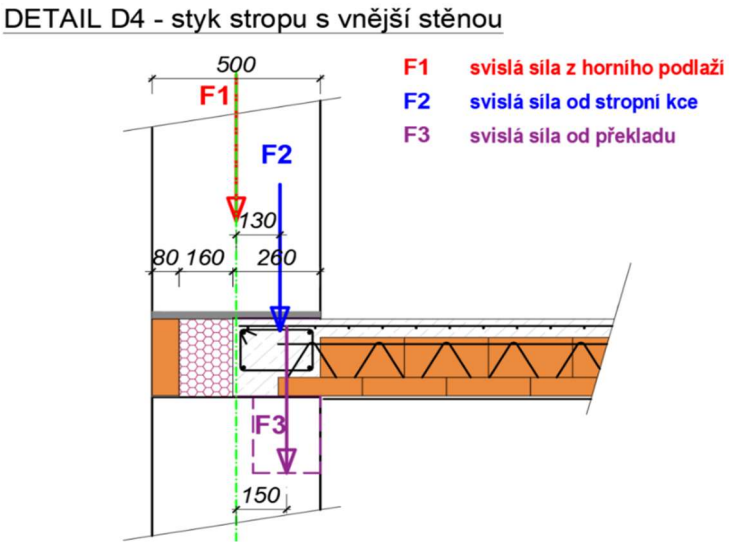


Obrázek 35 Větrnné oblasti

OHYBOVÝ MOMENT PLYNOUCÍ Z DETAILU ULOŽENÍ

e … excentricita z detailu uložení

Med = Ned * e					
F_1 síla z horních podlaží	173,2	kN	e_1	0	mm
F_2 síla od stropní konstrukce	71,46	kN	e_2	130	mm
F_3 síla od překladu	101,6	kN	e_3	150	mm
$N_{Ed} = F_1 + F_2 + F_3$	346,3	kN	$e_{uložení}$	**70,85**	mm
$M_{Ed,uložení} = N_{Ed}\ e_{uložení}$	**24,53**	**kNm**			



Obrázek 36 Znázornění dílčích sil v uložení

OHYBOVÝ MOMENT ZOHLEDŇUJÍCÍ IMPERFEKCI

$\alpha_h = \min(2/(h_{stěny})^{0,5};1)$ 1 $\alpha_m = (0,5*(1+1/m))^{0,5}$ 1 m 1

$e_{imperfekce} = \theta_i\ h_{stěny}/2$ 6,25 $\theta_i = 1/200\ \alpha_h\ \alpha_m$ 0,005

$M_{Ed,imperfekce} = N_{Ed}\ e_{imperfekce}$ = 399,18 x 6,25 x 0,001 = 2,49 kNm

VÝSLEDNÝ OHYBOVÝ MOMENT

$M_{Ed,celkový} = M_{Ed,uložení} + M_{Ed,imperfekce} + [M_{Ed,vítr,tlak}; M_{Ed,vítr,sání}]$ = 24,53 + 2,49 + 1,12 =28,14 kNm

24,53 + 2,49 - 3,43 = 23,59 kNm

Výsledný moment M_{Ed} = 28,14 kNm

7. Výpočet

Beton je materiál s vysokou pevností v tlaku a uplatňuje se tedy (mimo jiné) v prvcích namáhaných normálovou silou, přičemž se hovoří o mimostředném tlaku. Většinou je však průřez namáhaný kombinací normálové síly a ohybového momentu. Nevyztužené konstrukce, mezi které se mimo jiné řadí i ty tištěné, odolávají špatně tahovým namáháním. Z tohoto důvodu je pak nutné navrhovat je tak, aby byly převážně tlačené. To znamená, že normálová síla musí být vůči ohybovému momentu výrazně větší. Beton navržený bez výztuže se chová velmi křehce, což je ještě více umocněno technologií 3D tisku, kdy jsou konstrukce tištěny z betonů s relativně vysokou pevností v tlaku, které jsou málo duktilní. V praxi se tak aplikace prostého betonu objevuje jen zřídka. Nejčastěji se pak jedná o masivní pilíře, klenby, opěrné stěny a základové patky.

7.1 Analýza konstrukce

Jedním z faktorů negativně ovlivňujících únosnost konstrukce jsou geometrické imperfekce, způsobené možnými odchylkami jak v geometrii konstrukce, tak v umístění. Ty mají být dle [N1] uvažovány v mezních stavech únosnosti při trvalých a mimořádných návrhových situacích. Zmíněné imperfekce bývají nejčastěji popsány úhlem odklonu od svislice a pro osamělé prvky lze jejich účinek zohlednit buďto výstředností, nebo zavedením příčné síly v místě, kde vyvodí maximální moment. Pro odchylky odpovídající běžným výrobním tolerancím je možné uvažovat zjednodušeně hodnotu výstřednosti od imperfekce $e_i = l_0/400$.[N1], [29], [30]

Otázka je, zda jsou účinky geometrických imperfekcí stanovené klasickými postupy vhodné i pro aplikaci na tištěné konstrukce. Je totiž nutné si uvědomit, že technologie tisku vnáší do procesu mnoho odchylek. Výrazněji se pak mohou na únosnosti konstrukce projevit odchylky u tištěných konstrukcí prováděných in situ, kde jsou výrobní tolerance posunuté dále než u prefabrikátů.

Při navrhování a dimenzování tlačených prvků je nutné rozlišovat prvky masivní a štíhlé. Masivní prvky jsou obvykle navrhovány dle teorie 1. řádu. To znamená, že účinky zatížení vyšetřujeme na nedeformované konstrukci a uvažujeme geometrické imperfekce. Hlavním rozdílem v dimenzování štíhlých a masivních prvků je to, že u těch štíhlých je zapotřebí zachovat rovnováhu na přetvořené konstrukci. Tam kde je to navíc potřeba, je nutné zohlednit i účinek ohebnosti připojených prvků a základů. Přetvoření by mělo zohledňovat účinky trhlin, nelineárních vlastností materiálu a dotvarování. Štíhlé prvky jsou tedy navrhovány dle tzv. teorie 2. řádu, což znamená že jsou vystaveny dodatečným účinkům vyvolaných deformací konstrukce. Štíhlé osamělé pruty se při zatížení po délce příčně deformují, a tak je nutné přihlédnout ke zvětšení ohybového momentu zapříčiněného touto deformací. Tato deformace bývá označována jako výstřednost 2. řádu. [31], [29]

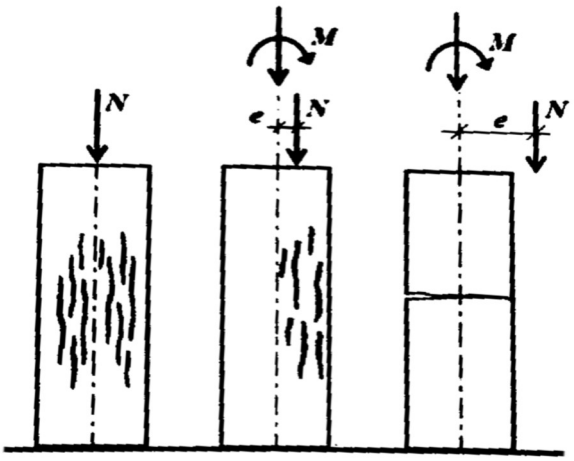
Štíhlost stěn z prostého betonu by neměla přesahovat hodnotu $\lambda = 86$, což odpovídá hodnotě poměru $l_0/h = 25$. Pokud je poměr $l_0/h < 2{,}5$ lze sloup považovat za masivní a lze zanedbat účinky 2. řádu. [29] Masivní sloupy se navrhují tedy pouze na momenty 1. řádu zvětšené o vliv geometrických imperfekcí. Na druhou stranu štíhlé sloupy jsou navrhované na ohybové momenty zohledňující účinky 2. řádu. Ty mohou být stanoveny při použití nelineární analýzy 2. řádu, metodou založenou na jmenovité křivosti, resp. tuhosti. Norma [N1] doporučuje použití metody založené na jmenovité křivosti. Ta ovšem není určena pro nevyztužené průřezy.

7.2 Návrhové postupy

Jak již bylo zmíněno výše, konstrukce nejčastěji navrhujeme na kombinaci normálové síly a ohybového momentu. Účinky ohybového momentu jsou nahrazeny výstředností normálové síly *e*, přičemž platí že $e = M/N$.

Obrázek 37 Výstřednost normálové síly [29]

Rozlišuje se tlakové a tahové porušení průřezu. Tlakové porušení průřezu nastává, pokud působí mimostředný tlak s malou výstředností. Projevuje se drcením betonu u více tlačeného okraje. O únosnosti takového průřezu rozhoduje pevnost betonu v tlaku. Tahové porušení nastává v případě, kdy dochází k mimostřednému tlaku s velkou výstředností. U takto namáhaného průřezu dochází k porušení betonu v tahu za ohybu.



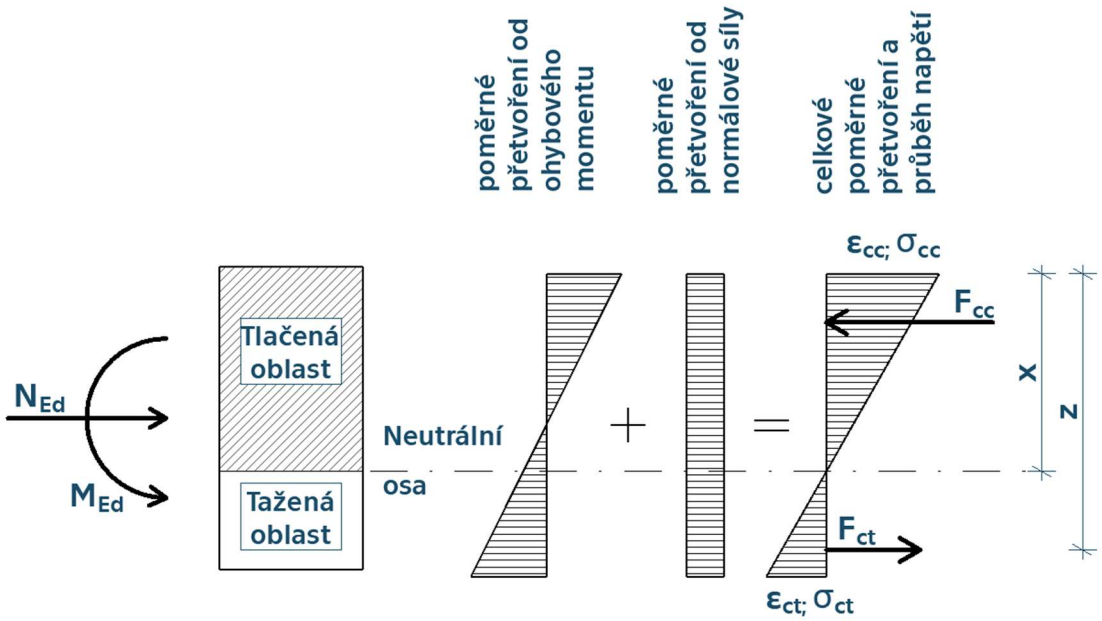
Obrázek 38 Teoretický dostředný tlak (vlevo), tlakové porušení při mimostředném tlaku s malou výstředností (uprostřed) a tahové porušení při dostředném tlaku s velkou výstředností (vpravo)

Řešení a posouzení průřezu se zásadně mění v závislosti na tom, zda se tahové trhliny vylučují, nebo jsou připouštěny. Blíže budou specifika řešení popsána v kapitolách, které se budou zvláště věnovat návrhu a posouzení prvku v závislosti na tom, zdali jsou trhliny připuštěny či nikoli. [32], [29]

Pro průřezy namáhané kombinací zatížení M+N je při posuzování MSÚ nutné splnit 2 podmínky: $N_{Ed} < N_{Rd}$ a $M_{Ed} < M_{Rd}$. Běžně se k posouzení takto namáhaných průřezů používá tzv. interakční diagram vycházející ze zmíněných předpokladů. Interakční diagram zobrazuje čáru únosnosti, která pro dané rozměry průřezu a třídu betonu vyjadřuje kombinaci hodnot N_{Rd} a M_{Rd}. Průřez vyhovuje pokud se bod vyjadřující kombinaci vnějších sil $[N_{Ed};M_{Ed}]$ nachází uvnitř diagramu.

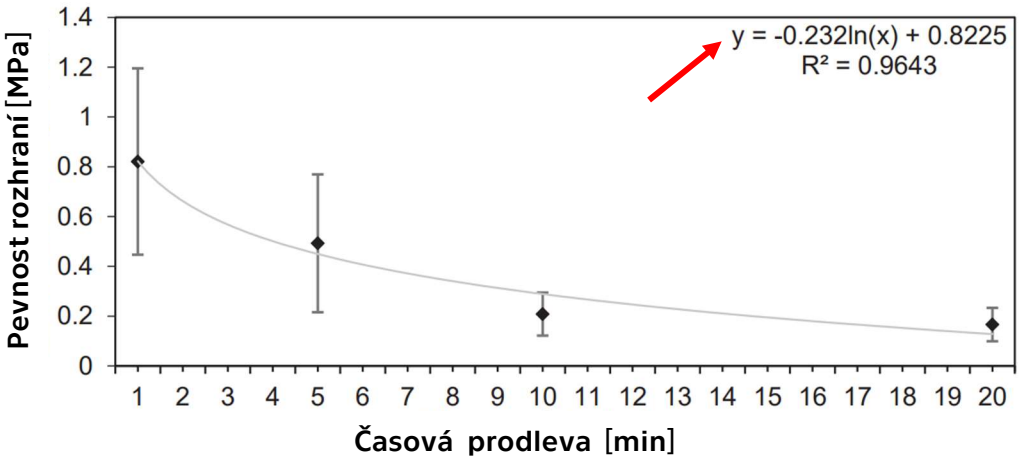
7.2.1 Metoda A – tahové trhliny vyloučeny

V případě, kdy se vznik tahových trhlin vylučuje, lze na základě teorie pružnosti předpokládat lineární průběh napětí a přetvoření po průřezu. Jinými slovy lze říct, že napětí jsou přímo úměrná vzdálenosti od neutrální osy. Na obrázku (viz Obrázek 39) je znázorněna napjatost za předpokladu homogenního ideálně pružného materiálu. Aby trhliny nevznikly, tak nesmí být překročena tahová pevnost betonu σ_{ct}. V případě tištěných konstrukcí nesmí dojít k překročení menší z hodnot tahové pevnosti betonu a tahové pevnosti rozhraní mezi tištěnými vrstvami. Pokud je tento předpoklad splněn, trhliny nevznikají a lze předpokládat pružné působení celého průřezu. O únosnosti průřezu v tomto případě rozhoduje tahová pevnost betonu, resp. tahová pevnost rozhraní. Obecně tahovému porušení lépe odolávají spíše masivní konstrukce. [29]



Obrázek 39 Napjatost nevyztuženého průřezu namáhaného kombinací M+N za předpokladu teorie pružnosti [vlastní]

Dále bylo žádoucí do výpočtu zohlednit, jak se promítne časová prodleva mezi tiskem vrstev, která má zásadní vliv na výslednou pevnost rozhraní. To, jak silné se rozhraní vyvine závisí na mnoha parametrech - směsí počínaje a různými druhy ošetřování konče. Aby byl nastíněn vliv časové prodlevy tisku na únosnost celého prvku, tak byl vybrán jeden modelový případ vycházející ze studie [28], která měřila pevnost rozhraní v závislosti na rostoucí časové prodlevě mezi tiskem přilehlých vrstev. Tato studie také zveřejnila předpis rovnice popisující dané chování, který byl využit pro zautomatizování výpočtu. Nunté dodat, že rovnice aplikovaná do výpočtu pevnosti rozhraní nemůže reprezentovat chování každé tištěné konstrukce a nemůže tak být využita vždy, platí totiž jenom pro danou směs v kombinaci s danými podmínkami ošetřování. Lze však pozorovat jak se mění pevnost rozhraní v závislosti na časové prodlevě a jak se tato oslabení projeví v různých druzích sestavených interakčních diagramů.



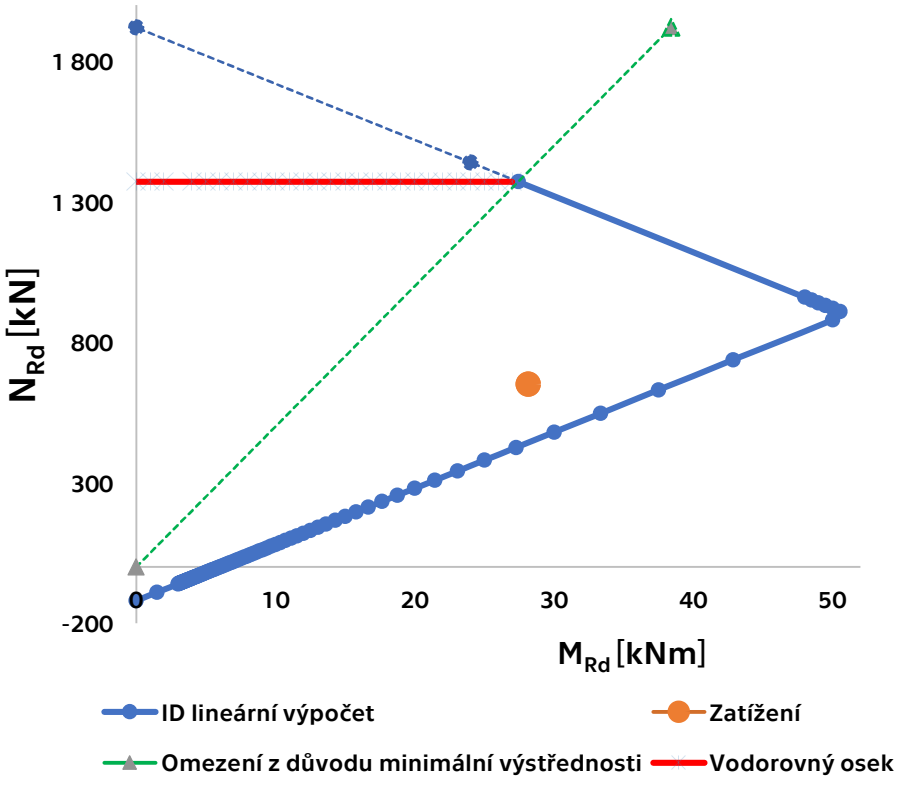
Obrázek 40 Závislost pevnosti rozhraní na časové prodlevě [28]

Pro výpočet napětí po průřezu lze použít základní vztah navržený ve studii [25] lineární mechaniky:

$$\sigma_{Ed} = \frac{N}{A} \pm \frac{M}{I} z, \tag{3}$$

kde *A* je plocha průřezu; *I* je moment setrvačnosti průřezu a *z* je vzdálenost od normálové osy. Tento vztah platí pro homogenní a izotropní objekty.

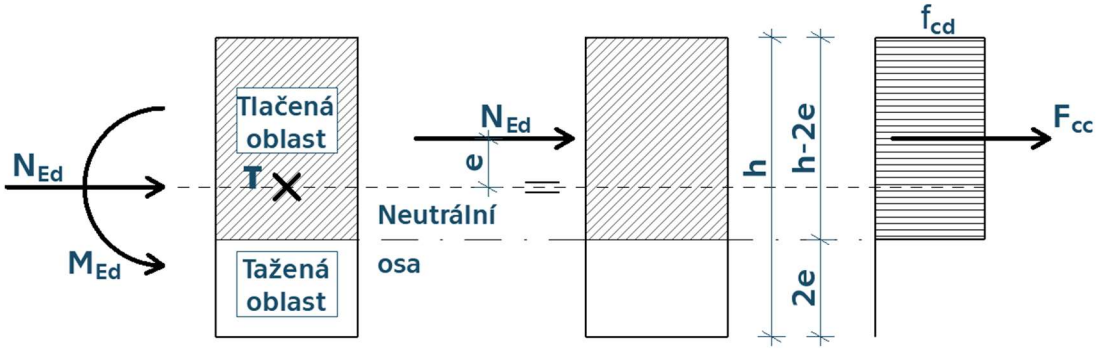
Byl vytvořen interakční diagram vycházející z lineárního chování. Lineární chování průřezu je na první pohled patrné z tvaru interakčního diagramu, který je utvořen ze 2 úseček. Diagram uvažuje tahovou pevnost materiálu a zároveň byl zaimplementován vodorovný osek pramenící z minimální výstřednosti.



Obrázek 41 Interakční diagram pro lineární chování [vlastní]

7.2.2 Metoda B – tahové trhliny připuštěny

Na druhou stranu, pokud se vznik trhlin připouští, lze na základě teorie navrhování dle mezních stavů využít plastického chování betonu na mezi únosnosti, kdy beton v tahu nepůsobí. K porušení dochází překročení tahové pevnosti materiálu a následným drcením betonu. Na rozdíl od předchozí metody v tomto případě rozhoduje o únosnosti tlaková pevnost betonu. [32], [29]



Obrázek 42 Napjatost nevyztuženého průřezu namáhaného kombinací M+N s využitím plastického chování betonu na mezi únosnosti [vlastní]

V praxi se tato metoda běžně používá při dimenzování zděných stěn, pilířů a konstrukcí z prostého betonu. [32], [29], [N1] Pro v praxi nejpoužívanější obdélníkový průřez platí, že výška tlačené oblasti je rovna hodnotě (h-$2e_{Ed}$) a vychází z napjatosti průřezu viz Obrázek 42. Výsledná mezní únosnost může být vyjádřena jako:

$$N_{Rd} = b(h-2e)f_{cd,pl} = \eta f_{cd,pl} bh\phi_{masivní}, \tag{4}$$

kde

$$\phi_{masivní} = \left(1 - 2\frac{e}{h}\right), \tag{5}$$

kde $\eta f_{cd,pl} = \eta \alpha_{cc} f_{ck}/\gamma_m$ je pevnost prostého betonu v tahu a α_{cc} je redukční součinitel zohledňující menší duktilitu zplastizovaného tlačeného betonu. Dle [N1] je vhodné volit $\alpha_{cc} = 0{,}8$; b je šířka a h je výška průřezu; e je excentricita vyvozená vnějším zatížením a může dosahovat maximální dovolené hodnoty $e_{max} = h/3$. Přičemž při překročení mezní exctricity hrozí ztáta stability posuzovaného prvku.

Uvedený vztah (4) pro výpočet normálové únosnosti lze analogicky aplikovat i při výpočtu únosnosti zdi nebo zděného pilíře, přičemž tento vztah se užívá při posouzení v hlavě a patě zdi. U zdí je však nutné posoudit i průřez uprostřed výšky zdi, kdy se zavádí zmenšující součinitel Φ_m, který zohledňuje štíhlost stěny. Právě absence jakéhokoliv zohlednění štíhlosti stěny je nevýhodou vztahu (4). EC 2 [N1] uvádí však ještě jeden vztah určený především pro výpočet normálové únosnosti štíhlých stěn a pilířů, ve kterém zmenšující součinitel zohledňuje štíhlost stěny:

$$N_{Rd} = \eta f_{cd,pl} bh\phi_{štíhlý}, \tag{6}$$

kde

$$\phi_{štíhlý} = 1{,}14\left(1 - 2\frac{e}{h}\right) - 0{,}02\frac{l_0}{h} \leq \left(1 - 2\frac{e}{h}\right), \tag{7}$$

kde

$$l_0 = \beta \cdot l_w, \tag{8}$$

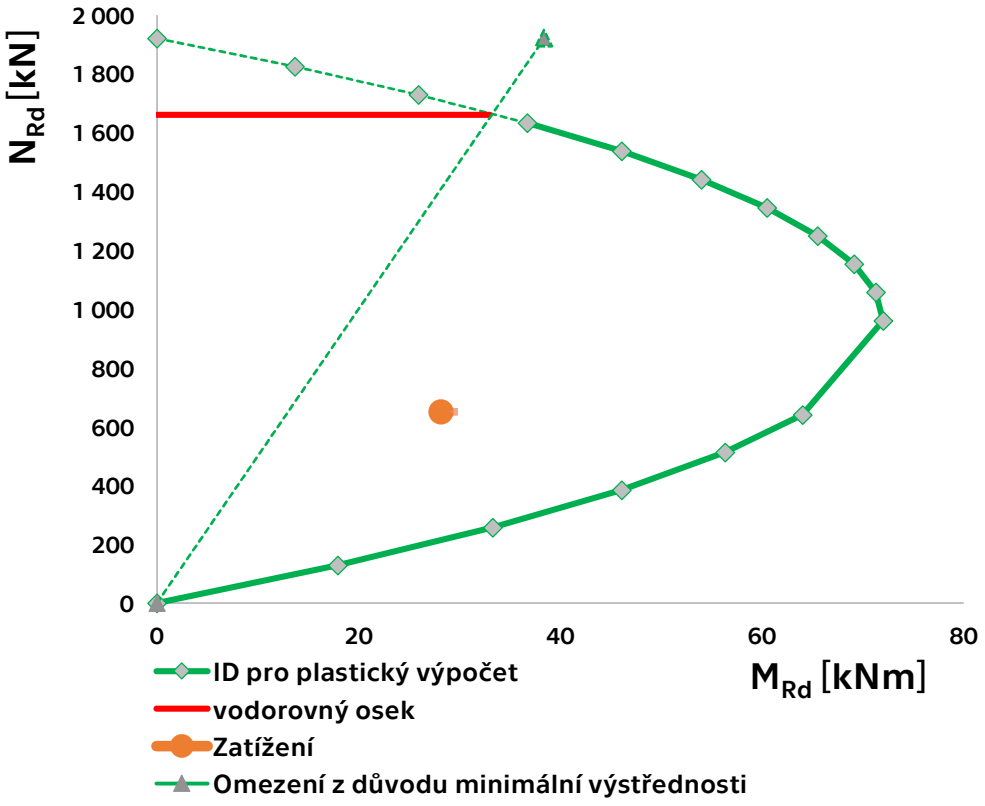
kde l_w je účinná délka průřezu; β je součinitel zohledňující podmínky uložení, který pro stěny a sloupy stojící samostatně (jsou podepřené po 2 stranách) nabývá hodnot $\beta = 1$; l_w je světlá výška stěny.

Studie [17] vytvořila na základě čínské normy následující vztah, který relativně dobře popisuje experimentálně naměřené hodnoty. Znovu však nutno dodat, že studie detailně neprozkoumala, zda je tento vztah vhodný pro všechny stěnové struktury a všechny druhy technologických postupů tisku.

$$N_{3D,Rd} = \alpha_1 \alpha_2 (1 + \gamma\beta) f_{cd,pl} A, \tag{9}$$

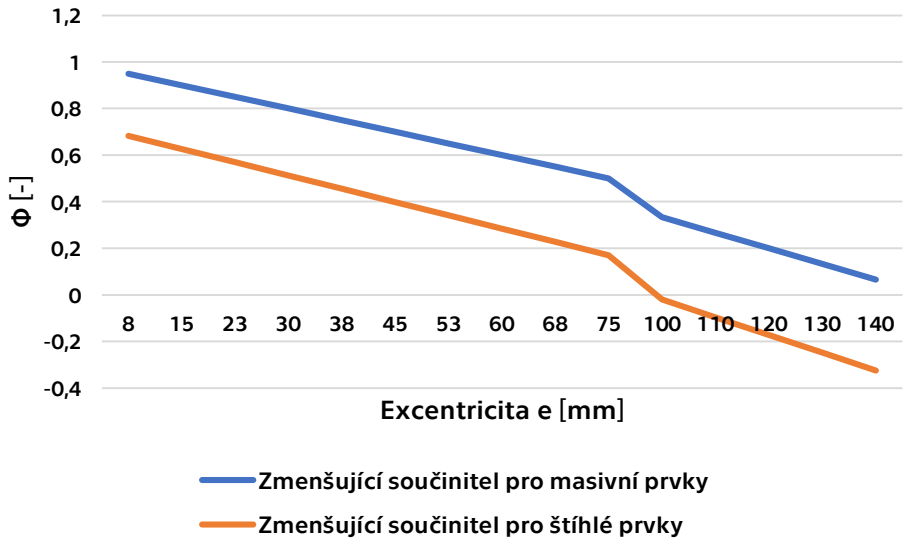
kde α_1 je součinitel zohledňující oslabení pevnosti rozhraní při přidání vodorovné konvenční výztuže. Ve studii se hodnota tohoto součinitele rovnala $\alpha_1 = 0{,}75$. V případě, kdy není vodorovná výztuž aplikována součinitel se má rovnat 1. Součinitel α_2 je redukční součinitel, který zohledňuje imperfekce způsobené tiskem. V studii se hodnota součinitele rovnala $\alpha_2 = 0{,}208$, to se však může zásadně lišit v závislosti na technologii tisku. Součinitel β je poměr mezi výškou a tloušťkou zdi, součinitel γ je na součiniteli β závislý, dále však nebyl ve studii blíže specifikovaný.

Byl vytvořen interakční diagram vycházející z plastického chování betonu na mezi únosnosti. Plastické chování průřezu je na první pohled patrné z tvaru interakčního diagramu, který je zaoblený a je definován rovnicí paraboly. Diagram neuvažuje tahovou pevnost materiálu. Byl zaimplementován vodorovný osek pramenící z minimální výstřednosti. Zároveň je nutné zavést „dolní osek" diagramu, který pramení z maximální dovolené výstřednosti, která je přípustná s ohledem na stabilitu prvku.



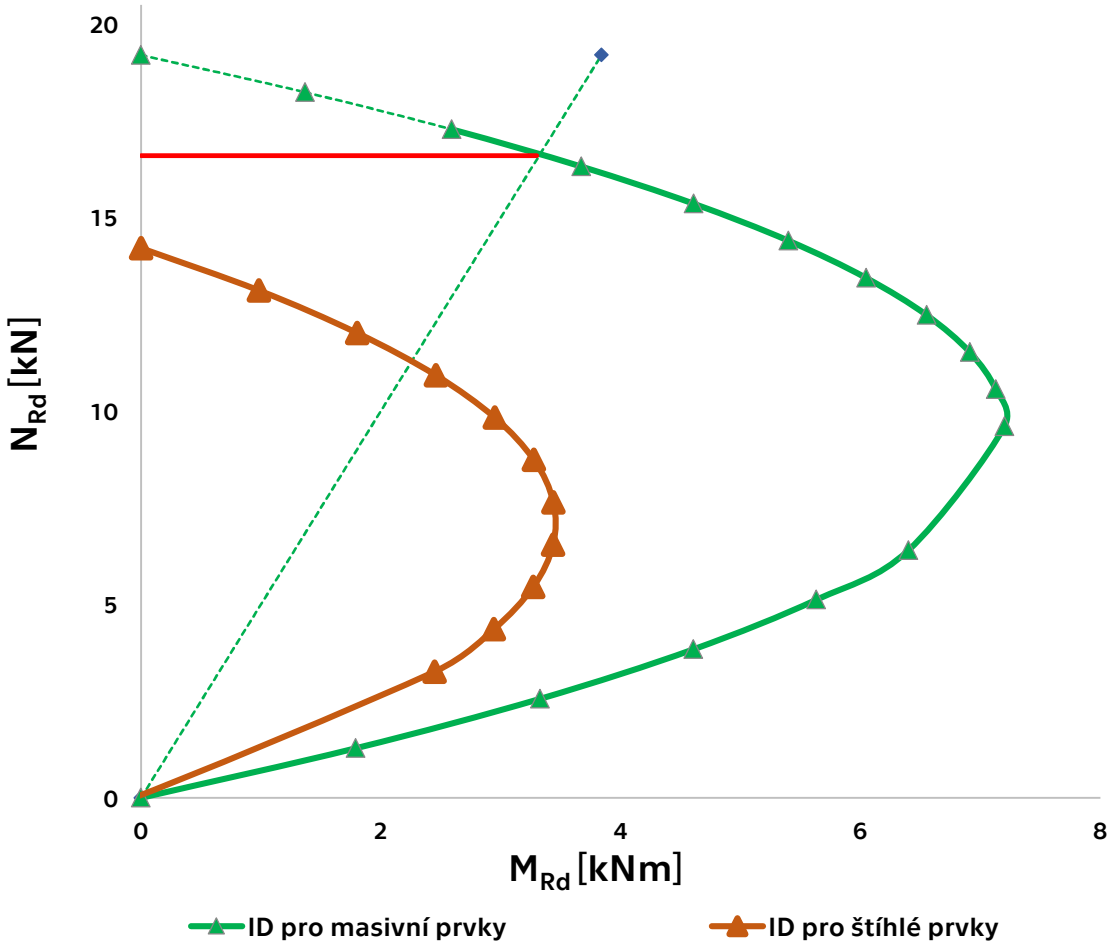
Obrázek 43 Interakční diagram pro plastické chování

Porovnání zmenšujících soušinitelů vypočtených dle rovnic (5) a (7) je patrné z grafu níže. Přičemž hodnoty součinitelů musí být logicky kladné.



Obrázek 44 Porovnání zmenšujících součinitelů

Bylo provedeno porovnání ID sestaveného pro masivní prvky dle rovnice (4) a pro štíhlé prvky dle rovnice (6).

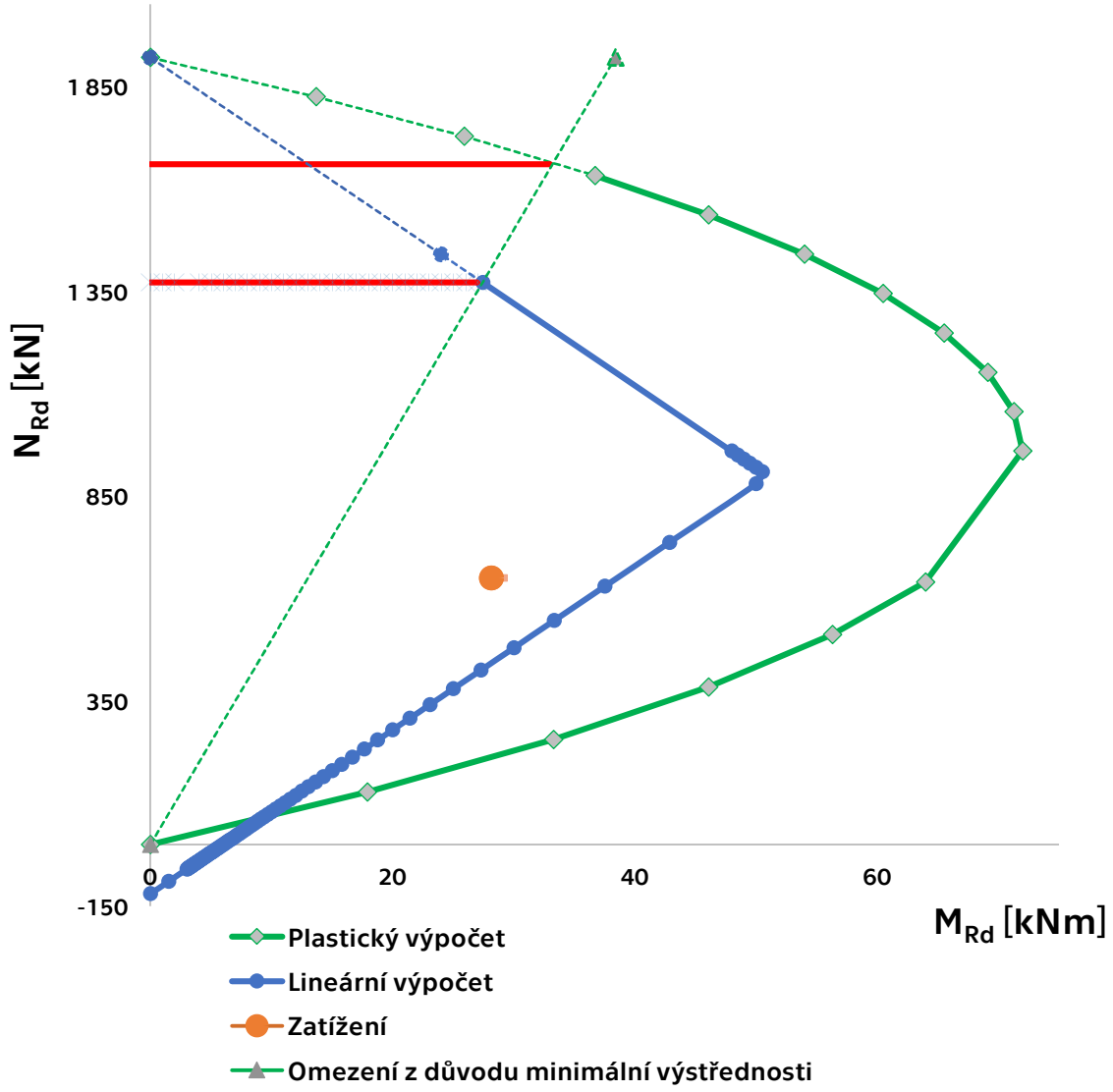


Obrázek 45 Porovnání interakčního diagramu pro štíhlý a masivní prvek

7.2.3 Porovnání metod

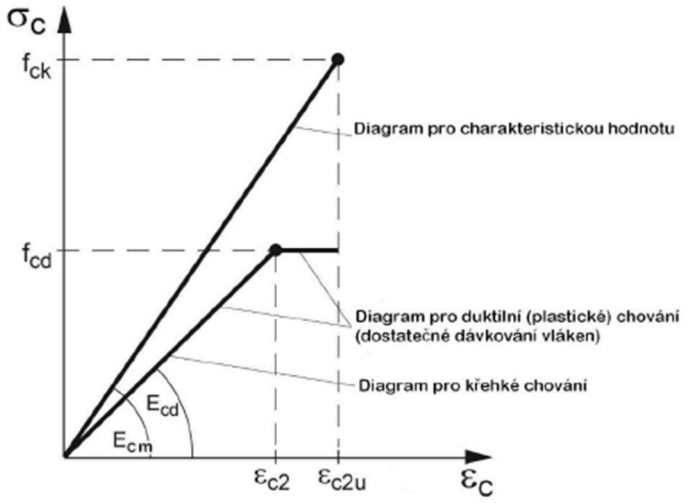
Byly použity dvě metody, které se lišili zejména v přístupu k tahovým trhlinám. V příloze č. 1 je popsáno detailně, jak byly ID vytvořeny, resp. jak byly vypočteny jednotlivé body. Metoda A vylučovala možnost vzniku tahových trhlin, průřez tak selhal buďto při překročení tahového pevnosti rozhraní/materiálu nebo při překročení pevnosti v tlaku. Průřez se do vzniku trhlin chová lineárně. Metoda B připouštěla vznik trhlin a vycházela ze schopnosti betonu zplastizovat na mezi únosnosti. O únosnosti prvku rozhodovala tlaková pevnost materiálu, přičemž s tahovou pevností materiálu/rozhraní nebylo počítáno.

Na první pohled je patrný rozdíl v tvaru a charakteru interakčních diagramů (dále už jen ID). ID vycházející z lineárního výpočtu se skládá ze 2 úseček a nabývá, na rozdíl od druhého ID, jak kladných, tak záporných hodnot. ID vycházející z plastického výpočtu je zaoblený. Křivku je možné popsat rovnicí paraboly. Pro prvek namáhaný tlakem platí, že výpočet založený na zplastizování betonu v tlačené oblasti (Metoda B) poskytuje lepší únosnosti a je tedy méně konzervativní než výpočet nepřipouštějící trhliny (Metoda A).



Obrázek 46 Porovnání lineárního a plastického lineárního diagramu [vlastní]

Nabízí se tu tedy otázka, jaká z návrhových metod je vhodnější pro posouzení tištěných konstrukcí. Většina provedených studií se shoduje na tom, že se tištěné stěny chovají velmi křehce. Dochází u nich k náhlým kolapsům po vzniku prvních trhlin, což poukazuje na jejich nízkou duktilitu a zbytkovou pevnost. Z tohoto důvodu se mi jeví jako vhodné nepřipouštět možnost vzniku tahových trhlin. Tisknuté směsi obecně vykazují kvůli vysokému podílu cementu relativně vysoké pevnosti v tlaku, a tak se mohou řadit do skupiny vysokopevnostních betonů, které jsou v porovnání s klasickými betony křehčí. Proto si myslím, že je vhodné vydat se po směru metodiky návrhu vysokopevnostních betonů [N4], která pro křehké chování navrhuje využití lineárního pracovního diagramu a při dostatečném (vhodném) dávkování rozptýlené výztuže připouští využití bilineárního pracovního diagramu. Do té doby, než bude detailněji prostudován vliv rozptýlené výztuže na chování stěnových prvků, se jeví jako vhodné být konzervativnější a pro posudky uvažovat lineární chování materiálu bez možnosti jakéhokoliv zplastizování v tlačené oblasti.



Obrázek 47 Pracovní diagram UHPC [N4]

Námět pro studii

Jak již bylo zmíněno výše, je vhodné, aby byly tištěné nevyztužené konstrukce namáhány převážně tlakem. To znamená, že poměr normálové síly ku ohybovému momentu je co největší. Jedním z řešení se nabízí být předepnutí stěny. Předepnutím by se do stěny vnesla přídavná normálová síla, která by zvětšila poměr N/M, čímž by zmenšila působící excentricity. Pokud by nastala situace, kdy je stěna namáhána poměrně velkým ohybovým momentem a malou normálovou silou, tak je při pohledu na ID je patrné, že po správném návrhu předepnutí stěny, by bylo možné uznat stěnu za vyhovující, přestože bez předepnutí vyhovující nebyla.

Předepnutí však s sebou přináší hodně otázek vzhledem k realizaci. Nabízí se tu předepnutí pomocí závitových tyčí s matkami a roznášecími destičkami. Závitové tyče by byly zabetonovány do desky (např. základové/stropní) a po vytištění stěny by byly aktivovány pomocí matic. Toto řešení vychází z předpínání nadezdívek, na kterých je usazen krov. Problém, se kterým se toto řešení bude pravděpodobně potýkat, bude v kontaktu roznášecí desky se stěnou. Jak ukázalo již mnoho experimentálních studií, tak při zatěžování zkušebních objektů téměř vždy docházelo více či méně k lokálnímu poškození – otlačení betonu v kontaktu s roznášecí deskou, což je dáno nerovností povrchu.

7.3 Zadání vstupních hodnot do výpočtového programu v MS Excel

Barevná pole slouží k zadávání paramterů do výpočtu.

ROZMĚRY STĚNY	B [mm]	**2250**
	H [mm]	**500**
	h [mm]	**2775**
	β	**1**
	l_0 [mm] = β*h	2775

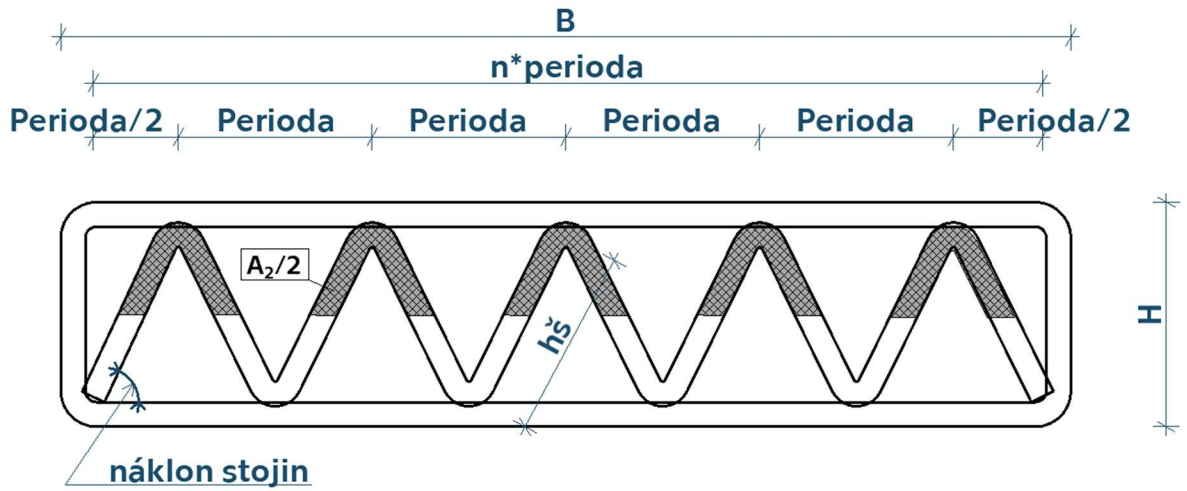
Jak bylo popsáno v 4.3.1.1, je vhodné navrhovat detaily tak, aby byl styk se stěnou vždy kloubový a nevnášelo se do stěny dodatečné momentové namáhání. Pro kloubově uložené stěny je hodnota β = 1.

MATERIÁL	**BETON**	**C 40/50**	**f_{ck} [MPa]**	40,00	**f_{cd} [MPa]**	21,33
	α_{cc}	0,8	**$f_{ctk;0,05}$ [MPa]**	2,50	**f_{ctd} [MPa]**	1,33
	α_{ct}	0,8	**$f_{t,rozhraní}$ [MPa]**	2,50		

$f_{t,rozhraní}$ je vypočtena v závislosti na časové prodlevě mezi tiskem vrstev dle 7.2.1.

O tahové pevnosti stěny rozhoduje zpravidla rozhraní vrstev, z tohoto důvodu je návrhová pevnost v tahu rovna hodnotě $f_{ctd} = \alpha_{ct} f_{t,rozhraní}/1,5$.

STRUKTURA	$A_{c,struktura}$ [mm2]	**542 540**	i_y	**175**	č. prodleva [min]	**10**
	$I_{struktura}$ [mm^4]	**16 560 000 000**	λ	15,9	$h_š$	915,8
	t [mm]	**55**		9,6	$A_2/2$	251855
	náklon stojin [°]	**65**	λ_{lim}	99,6		
	perioda [mm]	**432**	Poměr l_0/H	2,8		
	n	**5**	Max l_0/H	25,0		



Obrázek 48 Legenda struktury

A_2 je plocha vnitřní příhradoviny a společně s šikmou délkou stojiny $h_š$ je automaticky dopočítána na základě geometrie struktury.

Hodnota limitní štíhlosti vypočtena dle:

$$\lambda_{lim} = \frac{20ABC}{\sqrt{n}}, \tag{9}$$

kde součinitel *A* zohledňuje průměr výztuže a součinitel *B* je naopak ovlivněn plochou výztuže. Součinitel C závisí na křivosti r_m a *n* je poměrná normálová síla. Norma [N1] sice nabízí, jaké hodnoty součinitelů *A* a *B* lze uvažovat, pokud nejsou známy parametry pro jejich výpočet, ale je otázkou, zda je relevantní tyto hodnoty využít, vezme-li se v potaz, že tento vzorec je cíleně sestaven pro stanovení limitní štíhlosti železobetonových konstrukcí.

Je na patrné, že tento vzorec se nehodí pro použití u tištěných konstrukcí, které jsou nevyztužené. Jako maximální dovolenou štíhlost použijeme hodnotu $\lambda_{lim} = 86$. [29]

Dle [29] a [30] se u tlačených prvků nemusí zohlednit účinky druhého řádu, pokud poměr $l_0/H < 2{,}5$, což by ku příkladu znamenalo, že stěna výšky 2,5 m by musela být 1 m široká, aby jí bylo možné pokládat za masivní. Proto si myslím, že tato podmínka, kterou jsem v normě nedohledal je pravděpodobně chybná, anebo příliš konzervativní.

V [30] je uveden příklad výpočtu sloupu z prostého betonu o rozměrech průřezu 0,5 x 0,75 m a výšce 5 m. Této geometrii odpovídá štíhlostní poměr $l_0/H = 5/0{,}5 = 10$, což by dle podmínky $l_0/H < 2{,}5$ znamenalo, že je nutné započítat účinky 2. řádu. To se však ve výpočtu neděje a je použit pouze klasický vzorec viz (3).

NÁVRHOVÉ VNITŘNÍ SÍLY	M_{Ed}	=	**28,14**	kNm
	N_{Ed}	=	**399,18**	kN
Napětí v krajních vláknech struktury	$\sigma_{Ed,h}$	=	-1,510	MPa
	$\sigma_{Ed,d}$	=	0,039	MPa

Bylo vypočítáno napětí v krajních vláknech struktury. Jedná se o jakousi zpětnou kontrolu správnosti interakčního diagramu. Nachází-li se bod $[M_{Ed}; N_{Ed}]$ znázorňující zatížení na hraně ID, tak se hodnoty napětí v krajních vláknech budou rovnat pevnosti materiálu v tahu, resp. tlaku.

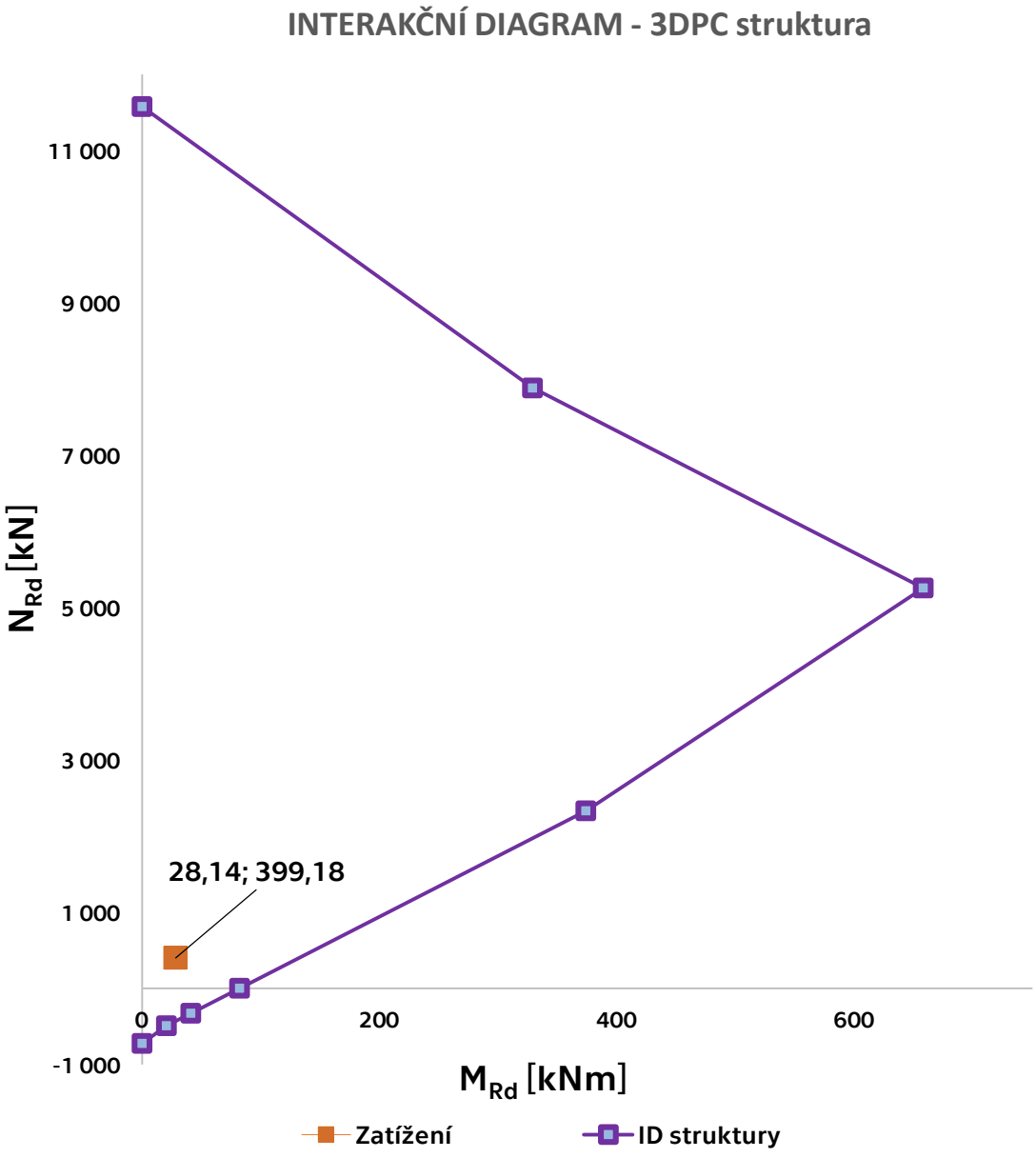
7.4 Posouzení

Pro posouzení stěny bude na základě hypotéz popsaných v kapitole 7.2.3 bude použit spíše konzervativnější ID, který byl sestaven na základě Metody A (7.2.1).

Při pohledu na ID je patrné, že navržená stěna **VYHOVUJE**, přičemž její normálová únosnost není zdaleka vyčerpána. Nejedná se tedy vyloženě o úsporný návrh, který by ladil konstrukci na maximální možnou únosnost.

Obecně lze říci, že většina dutých stěnových struktur s vnitřním ztužením (například s vnitřní příhradovinou), která bude zevnitř plněna stříkanou (popřípadě sypanou nebo jinou) tepelnou izolací, bude mít kvůli tepelněizolačním požadavkům dostatečnou tloušťku. Tyto struktury budou mít zároveň kvůli tisknutelnosti dostatečnou šířku filamentů – tedy relativně velkou plochu průřezu. Pro rodinné domy, na jejichž výstavbě se technologie 3D tisku rozmáhá jako první, to znamená, že budou konstrukce mnohdy předimenzované a velmi odolné. Dle rozhovoru s majitelem nejmenované společnosti

z USA (dostupné z [21]) je robustnost velkou výhodou v oblastech, které se potýkají s hurikány. Nabízí se tu však ihned otázka, zda je relativně křehké tištěné konstrukce vhodné stavět v seismických oblastech.



Obrázek 49 Interakční diagram posuzované stěny

8. Závěr

Cílem teoretické části bylo shrnout dosavadní poznatky z oblasti 3D tisku se zaměřením na stěnové prvky, jejich chování a provádění. Při zpracování bylo pro mě výzvou pracovat s anglicky psanou odbornou literaturou, která tvoří drtivou většinu podkladů pro teoretickou část. Dále pak nebylo jednoduché provedení rešerše, protože neexistuje velké množství dostupných knižních zdrojů a bylo nutné se probrat velkým množstvím studií.

Prvním z problémů bylo, že studie často vykazovaly odlišné nebo protichůdné výsledky, což je dle mého názoru dáno opravdu velkým množství variabilních faktorů, které ovlivňují sledované parametry. Příkladem je nejednotnost výsledků zkoušek 3D tištěných vzorků v tlaku, kdy některé studie prezentovaly jako nejúnosnější směr zatěžování směr X a některé směr Y. Důvod, proč se studie neshodují, jaký směr vykazuje nejvyšší pevnosti v tlaku, není zcela jasný. Dle popsaných hypotéz se maximální hodnota tlakové pevnosti odvíjí od toho, které z rozhraní (filament-filament; vrstva vrstva) disponuje větší pevností. O výsledné pevnosti rozhraní však rozhoduje mnoho vlivů, mezi které patří povrchová vlhkost nebo přitížení vrchními vrstvami. Lze se tedy domnívat, že rozdílnost výsledků pramení právě v tom, jaké rozhraní v dané studii bylo pevnější. Do budoucna je žádoucí provést další zkoušky a studie, které by detailněji objasnili různé faktory jako je vliv povrchové vlhkosti na pevnost rozhraní, vliv rozptýlené výztuže, vliv vložené konvenční vodorovné výztuže a další.

Dalším poznatkem, který pramení z pochopení vlastností tištěných konstrukcí je požadavek na stykování. Jak bylo výše detailněji popsáno, tištěné konstrukce špatně odolávají tahovým napětím. Z tohoto důvodu se jeví jako žádoucí konstruovat styky tak, aby se daly považovat za kloubové a nevznikaly tak ve stěnách dodatečné ohybové momenty, jako by tomu bylo u rámových rohů. Z hlediska teplotní roztažnosti se pak jeví jako vhodné konstruovat objekty jako staticky určité, protože u staticky určitých konstrukcí nevzniká při teplotní roztažnosti dodatečné namáhání. Proto se jako vhodné zdá být užití prefabrikovaných konstrukcí, které jsou většinou staticky určité. Užití tištěných konstrukcí by se také mělo projevit v oblasti zakládání staveb. Jako kritické se zdá být nerovnoměrné sedání, které může nevyztuženou tištěnou konstrukci zásadně poškodit. Z tohoto důvodu si myslím, že by se mělo k navrhování základů přistupovat konzervativněji než u železobetonových konstrukcí a měly by se ideálně navrhovat základy, které nejsou tak náchylné k nerovnoměrnému sedání – tedy například založení objektu na základové desce. Základy musí být dostatečně tuhé, aby nepřenášely vliv nerovnoměrného sedání do vrchní stavby. Samotná základové desky, ale i stropní desky musí z technologických důvodů splňovat přísnější požadavky na rovinnost povrchu.

Práce se také věnuje nepravým (řízeným) sparám v tištěných stěnách, které úzce souvisí se smršťováním tištěných konstrukcí. To je ve srovnání s konvenčně prováděnými železobetonovými konstrukcemi mnohem větší, což je dáno zejména vysokým obsahem cementu ve směsi a použitím kameniva malých frakcí. Z tohoto důvodu je žádoucí tištěné konstrukce řádně ošetřovat. Z hlediska ošetřování se jeví jako vhodné vyrábět konstrukce jako prefabrikované, protože prostředí továrny nabízí lepší podmínky pro ošetřování. O praktickém řešení nepravých spar tištěných konstrukcí však neexistuje žádná literatura. Řešení, která jsou v práci popsána na zhotovených vizualizacích jsou převzaty z dostupných zdrojů a pozorování. Nutno dodat, že tato

řešení jsou převzata z malých projektů rozsahu rodinných domů, a tak se nemusí být vhodná pro využití u větších staveb.

Do budoucna by se vývoj měl zaměřit na oblast spojů a styků, s důrazem na propojení klasických stavebních systémů s 3D tiskem betonových konstrukcí. Další oblastí, která nutně potřebuje další vývoj jsou úchyty prefabrikovaných konstrukcí nebo vývoj stěnových struktur. Pokud se má 3D tisk rozšířit po celém světě, tak je nutné vyvíjet struktury, které budou splňovat stavebně fyzikální a statické požadavky tak, aby bylo možné je uplatnit u malých i velkých projektů a splňovali pasivní energetický standard.

Druhá, praktická část představuje komentovaným statickým výpočet tištěné stěny. Cílem práce bylo ověřit použitelnost stávajících platných norem. V současnosti neexistuje žádná metodika návrhu tištěných konstrukcí, a tak jedním z cílů bylo pokusit se ji vytvořit.

V popisu objektu je taky okomentováno, jaké stropní a střešní konstrukce je vhodné zvolit. Z hlediska přenosu vodorovného zatížení ze stěn je žádoucí, aby stropní a střešní konstrukce poskytovaly stěnám oporu. Tuhá stropní tabule je vhodná, protože proti překlopení stěny působí pouze vlastní tíha stěny. V určitých situacích by se tak kritickým mezním stavem mohla stát celková ztráta stability překlopením.

Stanovení účinků zatížení se v podstatě od klasických postupů nelišilo. Ve výpočtu byly zohledněny geometrické imperfekce dle stávající normy (výpočet dle odklonu od střednice). Zda je užití standardního výpočtu účinků imperfekce relevantní odhalí pouze další výzkum. V budoucnu bude tedy nutné vliv geometrických imperfekcí tištěných konstrukcí detailněji prozkoumat. A to zejména kvůli tomu, že při tisku dochází k více výrobním odchylkám než například u konvenčně vyráběných železobetonových konstrukcí. Další zásadní nejasností je určení štíhlosti prvku, která rozhoduje o tom, zda je nutné zohlednit účinky 2. řádu. Standardní vzorec pro limitní štíhlost (rovnice (9)) zohledňuje ve svých součinitelích konvenční žebírkovou výztuž. Je otázka, zda je možné limitní štíhlost vypočíst z normou doporučených hodnot (tj. hodnoty, které norma doporučuje, pokud není možné vypočíst součinitele přesně). Lze se domnívat, že vztah pro limitní štíhlost, který byl sestaven pro železobetonové konstrukce společně s doporučenými hodnotami součinitelů, není možné u nevyztužených tištěných konstrukcí využít. V literatuře lze také dohledat vztah pro prvky z prostého betonu, který stanovuje hranici mezi štíhlým a masivními prvky pomocí poměru $l_0/h < 2{,}5$. Hodnota 2,5 se však zdá být buďto nepřesná a nebo příliš konzervativní.

Byly nastíněny 2 metodiky, které se lišili v tom, zdali připouští vznik trhlin. První, Metoda A vycházela z lineárního chování materiálu a trhliny nepřipouštěla. Druhá, Metoda B trhliny připouštěla a uvažovala se zplastizováním betonu na mezi únosnosti. V práci je popsán rozdíl mezi metodami a je zde vysvětleno, z jakého důvodu si myslím, že je lepší pro návrh volit právě Metodiku A. Do výpočtu obou metod byl zaimplementován výpočet pevnosti rozhraní v závislosti na časové prodlevě tisku. Sestavené interakční diagramy sloužící pro posudek platily pouze pro plný průřez, což je v praxi málo použitelné, jelikož trend 3D tisku směřuje spíše k využívání lehkých dutých stěnových struktur. V odborné literatuře i z pozorování jiných zdrojů lze vypozorovat mnoho stěnových struktur. Tyto stěnové struktury mají komplexní tvar a je tak těžké spočítat jejich průřezové charakteristiky. Z tohoto důvodu by bylo poměrně složité sestrojit výpočetní program, který by dokázal posoudit univerzálně jakoukoliv

stěnu. Proto byl sestaven jeden interakční diagram, který odpovídá únosnosti typické stěnové struktury, té s vnitřní příhradovinou. Tento interakční diagram byl sestaven pomocí konzervativnější metody, tedy Metody A, která nepřipouští vznik trhlin. Nevýhodou sestavené aplikace je to, že je do ní nutné zadat průřezové charakteristiky (nepočítá je automaticky). Jako vylepšení, například v rámci diplomové práce, se zde nabízí utvořit software, který by dokázal spočítat průřezové charakteristiky struktury.

Práce tedy prezentuje první návrhovou metodiku tištěných konstrukcí. Pokud se však má prokázat, že navržené metodiky poskytují bezpečný a správný návrh konstrukcí s vyženou mírou bezpečnosti, bude nutné provést další zkoušky (ideálně na stěnách v plném měřítku) a případně doupravit dílčí kroky návrhu. V neposlení řadě bude nutné odpovědět na otázku, zda současně používané redukční materiálové součinitele lze využít i pro tištěné konstrukce.

Seznam použité literatury

[1] PERROT, Arnaud, ed. 3D Printing of Concrete: State of the Art and Challenges of the Digital Construction Revolution [online]. 1. Velká Británice a USA: ISTE Ltd a John Wiley, 2019 [cit. 2022-03-19]. ISBN 978-1-78630-341-7. Dostupné z: https://1lib.cz/book/5411517/60ff7a

[2] BOS, Freek, Rob WOLFS, Zeeshan AHMED, Theo SALET a David HUI. Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing. *Virtual and Physical Prototyping* [online]. 2016, 13.2., 11(3), 209-225 [cit. 2022-03-09]. ISSN 1745-2759. Dostupné z: doi:10.1080/17452759.2016.1209867

[3] NGO, Tuan D., Alireza KASHANI, Gabriele IMBALZANO, Kate T.Q. NGUYEN a David HUI. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Science direct* [online]. 2018, 13.2. [cit. 2022-03-09]. ISSN 1359-8368. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012

[4] FENG, Peng, Xinmiao MENG, Jian-Fei CHEN a Lieping YE. Mechanical properties of structures 3D printed with cementitious powders. *Construction and Building Materials* [online]. 2015, 93, 486-497 [cit. 2022-03-09]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.05.132

[5] WU, Peng, Jun WANG a Xiangyu WANG. A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry. *Automation in Construction* [online]. 2016, 68, 21-31 [cit. 2022-03-09]. ISSN 09265805. Dostupné z: doi:10.1016/j.autcon.2016.04.005

[6] SRIVATSAN, T. S. a T. S. SUDARSHAN, ed. ADDITIVE MANUFACTURING: Innovations, Advances, and Applications [online]. Boca Raton: CRC Press, 2016 [cit. 2022-03-19]. ISBN 978-1-4987-1478-5. Dostupné z: https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/b19360/additive-manufacturing-srivatsan-sudarshan

[7] LIU, Chao, Rongfei ZHANG, Huawei LIU, et al. Analysis of the mechanical performance and damage mechanism for 3D printed concrete based on pore structure [online]. Xi'an, Shaanxi 710055, PR China, 2021 [cit. 2022-03-06].

[8] SINGH, Amardeep, Qiong LIU, Jianzhuang XIAO a Qifeng LYU. Mechanical and macrostructural properties of 3D printed concrete dosed with steel fibers under different loading direction. *Construction and Building Materials* [online]. 2022, 323 [cit. 2022-03-12]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2022.126616

[9] SANJAYAN, Jay G., Behzad NEMATOLLAHI, Ming XIA a Taylor MARCHMENT. Effect of surface moisture on inter-layer strength of 3D printed concrete. *Construction and Building Materials* [online]. 2018, 172, 468-475 [cit. 2022-03-12]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.03.232

[10] DING, Tao, Fei QIN, Jianzhuang XIAO, Xiaoming CHEN a Zibo ZUO. Experimental study on the bond behaviour between steel bars and 3D printed concrete. *Journal of Building Engineering* [online]. 2022, 49 [cit. 2022-03-12]. ISSN 23527102. Dostupné z: doi:10.1016/j.jobe.2022.104105

[11] XIAO, Jianzhuang, Zhenyuan LV, Zhenhua DUAN a Shaodan HOU. Study on preparation and mechanical properties of 3D printed concrete with different aggregate combinations. *Journal of Building Engineering* [online]. 2022 [cit. 2022-03-13]. ISSN 23527102. Dostupné z: doi:10.1016/j.jobe.2022.1042823

[12] XIAO, Jianzhuang, Haoran LIU a Tao DING. Finite element analysis on the anisotropic behavior of 3D printed concrete under compression and flexure. *Additive Manufacturing* [online]. 2021, 39 [cit. 2022-03-13]. ISSN 22148604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2020.101712

[13] YANG, Shutong, Tian LAN, Zhongke SUN, Mingqi XU, Mingxin WANG a Yaodong FENG. A predictive model to determine tensile strength and fracture toughness of 3D printed fiber reinforced concrete loaded in different directions. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* [online]. 2022, 119 [cit. 2022-03-15]. ISSN 01678442. Dostupné z: doi:10.1016/j.tafmec.2022.103309

[14] Bílé vany. *Schomburg* [online]. Březen 2014, 7-15 [cit. 2022-04-10]. Dostupné z: https://1url.cz/jK7Nr

[15] doc. Ing. Jiří Pazderka, Ph.D. *Dilatace nosných konstrukcí* [online]. In: . [cit. 2022-04-09]. Dostupné z: https://docplayer.cz/105710551-Dilatace-nosnych-konstrukci.html

[16] doc. Ing. Ladislav Čírtek, CSc. *Betonové konstrukce I: Modul CS1 Betonové konstrukce prutové* [online]. In: . Brno, 2005, s. 69-76 [cit. 2022-04-10]. Dostupné z: http://lences.cz/domains/lences.cz/skola/subory/Skripta/BL05-Betonove%20konstrukce%20I/CS1-Betonove%20konstrukce%20prutove.pdf

[17] HAN, Xiaoyu, Jiachuan YAN, Mingjian LIU, Liang HUO a Junlin LI. Experimental study on large-scale 3D printed concrete walls under axial compression. *Automation in Construction* [online]. 2022, 133 [cit. 2022-04-09]. ISSN 09265805. Dostupné z: doi:10.1016/j.autcon.2021.103993

[18] HASS, Lauri a Freek BOS. Bending and Pull-Out Tests on a Novel Screw Type Reinforcement for Extrusion-Based 3D Printed Concrete. *Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2020, 2020-07-08, 632-645 [cit. 2022-04-19]. RILEM Bookseries. ISBN 978-3-030-49915-0. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-030-49916-7_64

[19] *EBETON: Smršťování betonu* [online]. [cit. 2022-04-10]. Dostupné z: https://www.ebeton.cz/pojmy/smrstovani-betonu/

[20] MERUŇKA, Milan. *VÝVOJ SPECIÁLNÍCH VYSOKOPEVNOSTNÍCH BETONŮ S NÍZKÝMI OBJEMOVÝMI ZMĚNAMI*. Brno, 2018. Bakalářská práce. VUT v Brně. Vedoucí práce Prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.

[21] *GROSS, Jarett, YouTube kanál. Dostupné z: https://www.youtube.com/channel/UCqjRIH8FII9jpTy74hv-r8w.*

[22] ZICH, Miloš a Zdeněk P. BAŽANT. *Montované betonové konstrukce*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2018. ISBN 978-80-7204-983-7.

[23] ROUSSEL, Nicolas. Rheological requirements for printable concretes. *Science direct: Cement and concrete research* [online]. 3. 5. 2018, 2018 [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2018.04.005

[24] JIRAMAROOTAPONG, Patiphat, Lapyote PRASITTISOPIN, Chalermwut SNGUANYAT, Ganchai TANAPORNRAWEEKIT a Somnuk TANGTERMSIRIKUL. Load Carrying Capacity and Failure Mode of 3D Printing Mortar Wall Panel Under Axial Compression Loading. *Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2020, 2020-07-08, 646-657 [cit. 2022-04-09]. RILEM Bookseries. ISBN 978-3-030-49915-0. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-030-49916-7_65

[25] LICCIARDELLO, Lucia, Adriano REGGIA, Giovanni METELLI a Giovanni A. PLIZZARI. Investigation of the Structural and Thermal Behaviour of 3D Printed Concrete Walls. *ResearchGate* [online]. 2021 [cit. 2022-04-09].

[26] DAUNGWILAILUK, Totsawat, Phoonsak PHEINSUSOM a Withit PANSUK. Uniaxial load testing of large-scale 3D-printed concrete wall and finite-element model analysis. *Construction and Building Materials* [online]. 2021, 275 [cit. 2022-04-09]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.122039

[27] WANG, Li, Hailong JIANG, Zhijian LI a Guowei MA. Mechanical behaviors of 3D printed lightweight concrete structure with hollow section. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* [online]. 2020, 20(1) [cit. 2022-04-19]. ISSN 1644-9665. Dostupné z: doi:10.1007/s43452-020-00017-1

[28] TAY, Yi Wei Daniel, Guan Heng Andrew TING, Ye QIAN, Biranchi PANDA, Lewei HE a Ming Jen TAN. Time gap effect on bond strength of 3D-printed concrete. *Virtual and Physical Prototyping* [online]. 2018, 14(1), 104-113 [cit. 2022-05-02]. ISSN 1745-2759. Dostupné z: doi:10.1080/17452759.2018.1500420

[29] HANZLOVÁ, Hana a Jiří ŠMEJKAL. *Betonové a zděné konstrukce 1: základy navrhování betonových konstrukcí*. 2. přepracované vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2018. ISBN 978-80-01-06508-2.

[30] PROCHÁZKA, Jaroslav. *Navrhování betonových konstrukcí: příručka k ČSN EN 1992-1-1 a ČSN EN 1992-1-2*. Praha: Pro Ministerstvo pro místní rozvoj a Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo

[31] KOŠATKA, Pavel, Karel LORENZ a Jitka VAŠKOVÁ. *Zděné konstrukce 1*. Dotisk prvního vydání. Praha: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-80-01-03463-7.

Použité normy a předpisy

[N1] **Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby**

[N2] **Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1 - 4: Obecná zatížení – Zatížení větrem**

[N3] **Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-1: Obecná zatížení – Objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení pozemních staveb**

[N4] **Technická pravidla ČBS 07 – Ultra-vysokohodnotný beton UHPC**

Seznam obrázků

Obrázek 1 Souřadný systém 17
Obrázek 2 Průměrné hodnoty krychelné pevnosti stanovené v různých směrech 17
Obrázek 3 Pohledy na krychli zatěžovanou ve směru osy Z 18
Obrázek 4 Pohledy na krychli zatěžovanou ve směru osy X 18
Obrázek 5 Pohled na vzorek zatížený ve směru osy X a Z, červená šrafa = odtržená oblast, klikatá čára = diagonální trhliny 19
Obrázek 6 Naznačení mezery vzniklé špatně navrženým technologickým postupem . 20
Obrázek 7 Trámek (vlevo) a vzorek tvaru krychle (vpravo) 20
Obrázek 8 Hodnoty pevností stanovených na krychlích a trámcích 20
Obrázek 9 Hodnoty krychelných pevností stanovených na různých směsích a v různých směrech 21
Obrázek 10 Pohled na zkušební vzorky (vlevo) a hodnoty únosnosti vzorků v tlaku v závislosti na prodlevě výtisku 2. vrstvy (vpravo) 21
Obrázek 11 Závislost povrchové vlhkosti na čase (vlevo) a závislost pevnosti rozhraní vrstev na čase (vpravo) 22
Obrázek 12 Pevnosti v tlaku rozdílně vyztužených vzorků namáhaných v různých směrech (vlevo) a relativní pevnosti v tlaku rodílně vyztužených vzorků namáhaných v různých směrech (vpravo) 23
Obrázek 13 Ohybová pevnost v závislosti na směru zatěžování studie č. 1 (vlevo) a studie č. 2 (vpravo) 24
Obrázek 14 Porovnání pracovních diagramů vzorků s rozptýlenou výztuží zatěžovaných v různých směrech 25
Obrázek 15 Příklad dělících trhlin ve stěnách: charakter trhlin nízké stěny (nahoře) a charakter trhlin vysoké stěny (dole) 30
Obrázek 16 Vznik trhlin nad otvorem 30
Obrázek 17 Pohled na stěnu 1 a řezy 31
Obrázek 18 Znázornění teplotního namáhání 32
Obrázek 19 Příklad realizované stěny s „U" záhyby 32
Obrázek 20 Pohled na stěnu 2 a řez stěnou 2 33
Obrázek 21 Příklad realizované stěny se zatmelenou spárou 33
Obrázek 22 Příklad vylehčené stěnové struktury tvaru příhrady 38
Obrázek 23 Naznačení tahových trhlin při spodní straně filamentu vzniklých při extruzi 38
Obrázek 24 Trhliny vzniklé pohybem tiskové hlavy po obloukové trajektorii s malým poloměrem (vlevo) a trhliny vzniklé špatnou konzistencí směsi (vpravo) 39
Obrázek 25 Deformace ve směru os X (vlevo nahoře), Y (vpravo nahoře) a Z (vlevo dole) a axonometrický pohled na stěnu (vpravo dole) 40
Obrázek 26 Plná stěna se šroubovicovou výztuží 41
Obrázek 27 Prostá dutá stěna – axonometrický pohled (vlevo) a řez s naznačenými sponami (vpravo) 41
Obrázek 28 Stěnová struktura s vnitřní příhradovinou 42
Obrázek 29 Stěnová struktura s vnitřními ŽB sloupy 42
Obrázek 30 Axonometrický pohled na kombinovanou stěnu 42
Obrázek 31 Organická struktura inspirovaná skořápkou durianu (ovoce; nahoře) a struktura inspirovaná tradičními Thajskými ručními pracemi (dole) 43
Obrázek 32 Realizace 6 Unit Apartment Block 44
Obrázek 33 Pohledy na konstrukci 46

Obrázek 34 Stěnová struktura 49
Obrázek 35 Větrnné oblasti 52
Obrázek 36 Znázornění dílčích sil v uložení 52
Obrázek 37 Výstřednost normálové síly 54
Obrázek 38 Teoretický dostředný tlak (vlevo), tlakové porušení při mimostředném tlaku s malou výstředností (uprostřed) a tahové porušení při dostředném tlaku s velkou výstředností (vpravo) 54
Obrázek 39 Napjatost nevyztuženého průřezu namáhaného kombinací M+N za předpokladu teorie pružnosti 55
Obrázek 40 Závislost pevnosti rozhraní na časové prodlevě 56
Obrázek 41 Interakční diagram pro lineární chování 56
Obrázek 42 Napjatost nevyztuženého průřezu namáhaného kombinací M+N s využitím plastického chování betonu na mezi únosnosti 57
Obrázek 43 Interakční diagram pro plastické chování 58
Obrázek 44 Porovnání zmenšujících součinitelů 59
Obrázek 45 Porovnání interakčního diagramu pro štíhlý a masivní prvek 59
Obrázek 46 Porovnání lineárního a plastického lineárního diagramu 60
Obrázek 47 Pracovní diagram UHPC 61
Obrázek 48 Legenda struktury 62
Obrázek 49 Interakční diagram posuzované stěny 64

Seznam příloh

Příloha 1 - Výpočet interakčních diagramů

Použitý software

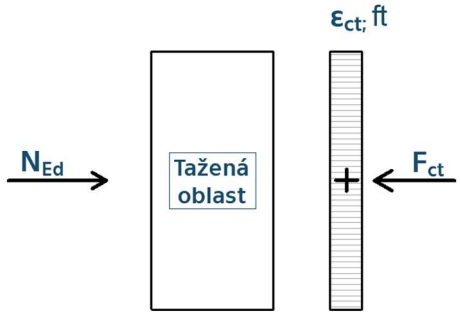
MS Word, MS Excel, SCIA Engineer, Autodesk AutoCAD 2019, Archicad 22

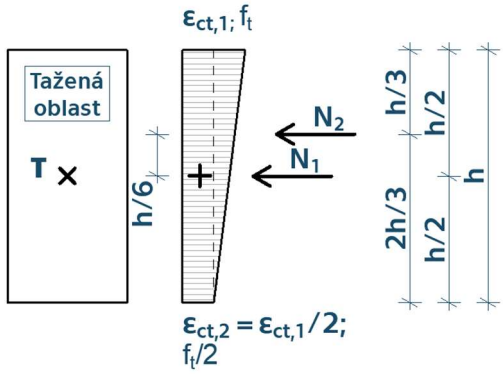
PŘÍLOHA Č.1
VÝPOČET INTERAKČNÍCH DIAGRAMŮ

Seznam značek

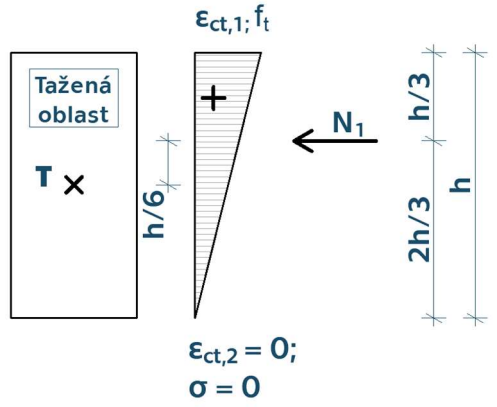
b	šířka průřezu
h	výška průřezu
A	plocha průřezu, $A = bh$
f_t	menší z návrhových hodnot tahové pevnosti betonu a tahové pevnosti rozhraní
f_c	návrhová hodnota pevnosti betonu v tlaku
x	výška tlačené oblasti
z_i	rameno vnitřních sil
σ_{cc}	napětí v krajních tlačených vláknech
σ_{ct}	napětí v krajních tažených vláknech
A_{st}	plocha struktury
A_2	plocha šikmých stojin
t	šířka tištěného filamentu
σ_i	pomocná napětí (pro výpočet)

1. Interakční diagram – lineární chování

Prostý tah		
	$N_{Rd} = A \cdot f_t$	$M_{Rd} = 0$

Lichoběžník tah		
	$N_{Rd} = N_1 + N_2 =$ $= \frac{Af_t}{2} + \frac{f_t}{2} \cdot \frac{A}{2} =$ $= \frac{3}{4} Af_t$	$M_{Rd} = N_2 \cdot \frac{h}{6} = \frac{h}{6} \cdot \frac{f_t}{2} \cdot \frac{A}{2} =$ $= \frac{Af_t h}{24}$

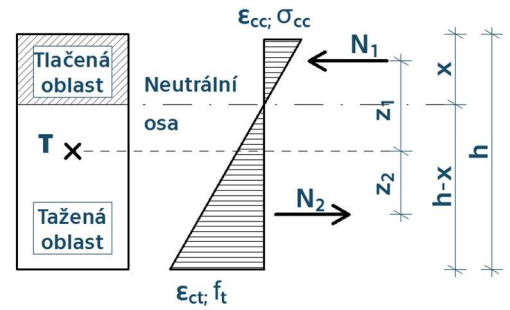
Trojúhelník tah



$$N_{Rd} = N_1 = \frac{f_t}{2} \cdot A$$

$$M_{Rd} = N_1 \cdot \frac{h}{6} = \frac{h}{6} \cdot \frac{f_t}{2} \cdot A = \frac{A f_t h}{12}$$

Stav kdy se neutrální osy pohybuje mezi x = 0 (celý průřez v tahu) až x= h/2 (prostý ohyb)



$$N_{Rd} = N_1 + N_2 = \frac{\sigma_c}{2} bx + b(h-x)\frac{f_t}{2}$$

$$\sigma_c = \frac{x}{h-x} f_t$$

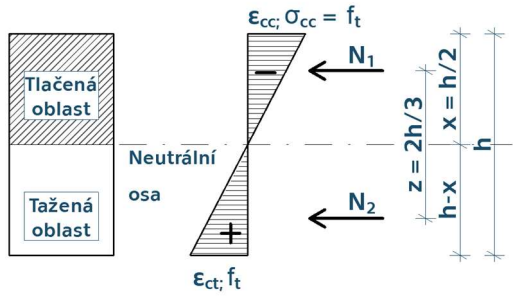
$$M_{Rd} = N_1 z_1 + N_2 z_2$$

$$N_1 = \frac{\sigma_c}{2} bx$$

$$N_2 = b(-x)\frac{f_t}{2}$$

$$z_1 = \frac{h}{2} - \frac{x}{3}; \quad z_2 = \frac{x}{3} + \frac{h}{6}$$

Prostý ohyb



$$N_{Rd} = 0$$

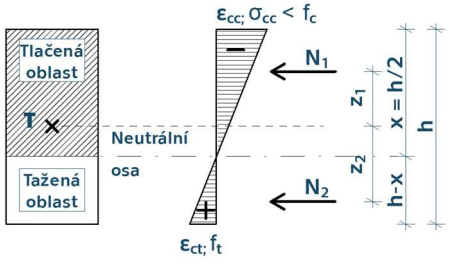
$$M_{Rd} = N_2 z = \frac{A f_t h}{6}$$

$$z = \frac{2h}{3}$$

Stav kdy se neutrální osy pohybuje mezi x= h/2 (prostý ohyb) až x = h (celý průřez v tlaku)

Porušení tahem

$$\sigma_{cc} = \frac{x}{h-x} f_t \leq f_c$$



$$N_{Rd} = N_1 + N_2$$

$$N_1 = \frac{\sigma_{cc}}{2} bx$$

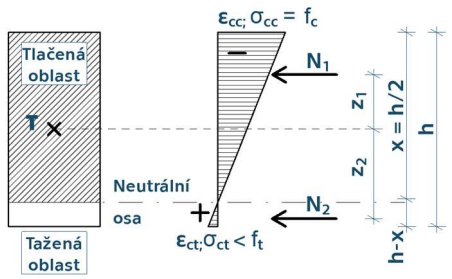
$$N_2 = b(-x)\frac{f_t}{2}$$

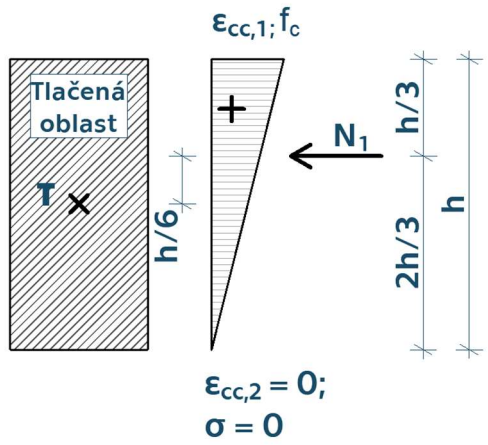
$$\sigma_{cc} = \frac{x}{h-x} f_t$$

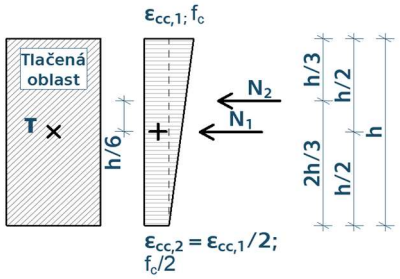
$$M_{Rd} = N_1 z_1 + N_2 z_2$$

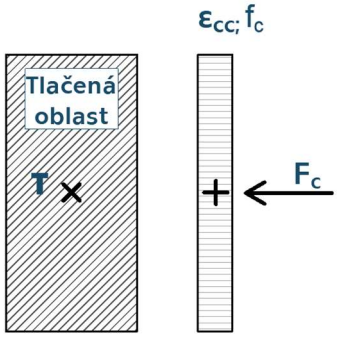
$$z_1 = \frac{h}{2} - \frac{x}{3}$$

$$z_2 = \frac{x}{3} + \frac{h}{6}$$

Porušení tlakem $\sigma_{cc} = \frac{x}{h-x} f_t \geq f_c$		$N_{Rd} = N_1 + N_2$ $N_1 = \frac{f_c}{2} bx$ $N_2 = b(h-x)\frac{f_t}{2}$ $f_t = f_c \frac{h-x}{x}$	$M_{Rd} = N_1 z_1 + N_2 z_2$ $z_1 = \frac{h}{2} - \frac{x}{3}$ $z_2 = \frac{x}{3} + \frac{h}{6}$

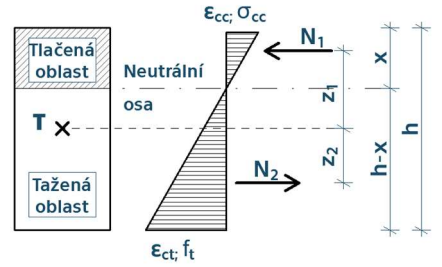
Trojúhelník tlak		
	$N_{Rd} = N_1 = \frac{f_c}{2} \cdot A$	$M_{Rd} = N_1 \cdot \frac{h}{6} = \frac{h}{6} \cdot \frac{f_c}{2} \cdot A$ $= \frac{A f_c h}{12}$

Lichoběžník tlak		
	$N_{Rd} = N_1 + N_2 =$ $= \frac{A f_c}{2} + \frac{f_c}{2} \cdot \frac{A}{2} =$ $= \frac{3}{4} A f_c$	$M_{Rd} = N_2 \cdot \frac{h}{6} = \frac{h}{6} \cdot \frac{f_c}{2} \cdot \frac{A}{2}$ $= \frac{A f_c h}{24}$

Dostředný tlak		
	$N_{Rd} = A \cdot f_c$	$M_{Rd} = 0$

2. Interakční diagram – plastické chování

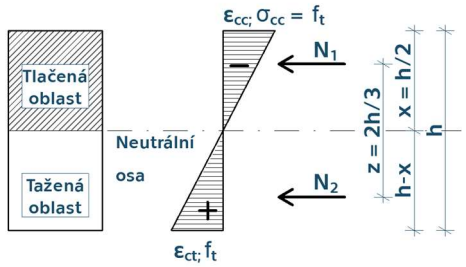
Teoreticky pro e = h/2



$N_{Rd} = 0$

$M_{Rd} = 0$

Maximální ohybová únosnost pro e_{Ed} = h/4



$N_{Rd} = \frac{1}{2} * N_{Rd,0}$

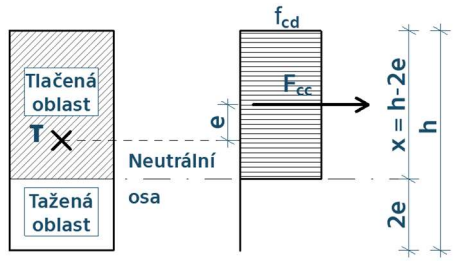
$N_{Rd,0} = bhf_c$

$M_{Rd,max} = \frac{1}{2} * N_{Rd,0} e_{Ed} = \frac{1}{2} bhf_c \frac{h}{4} =$

$= \frac{1}{8} bh^2 f_c$

$e_{Ed} = \frac{h}{4}$

Stav, kdy excentricita nabývá hodnot od e_{Ed} = 0 až $e_{Ed,max}$ = h/3



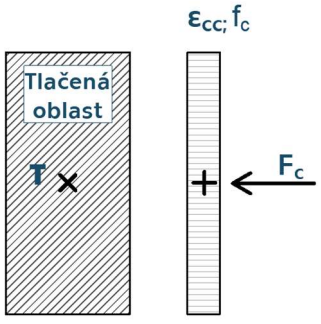
$N_{Rd} = b(h - 2e_{Ed})f_c$

$M_{Rd} = N_{Rd} e_{Ed} =$

$= b(h - 2e_{Ed})f_c e_{Ed}$

(rovnice paraboly)

Dostředný tlak pro e_{Ed} = 0

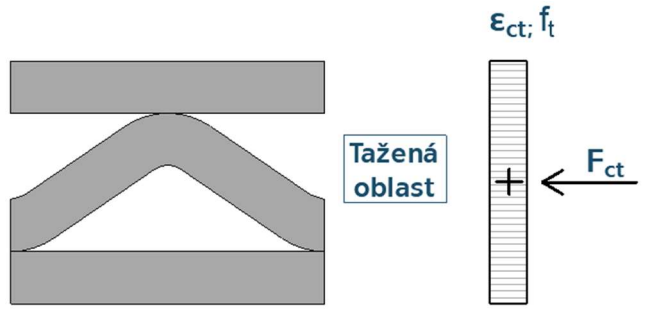


$N_{Rd,0} = A \cdot f_c$

$M_{Rd} = 0$

3. Interakční diagram – struktura

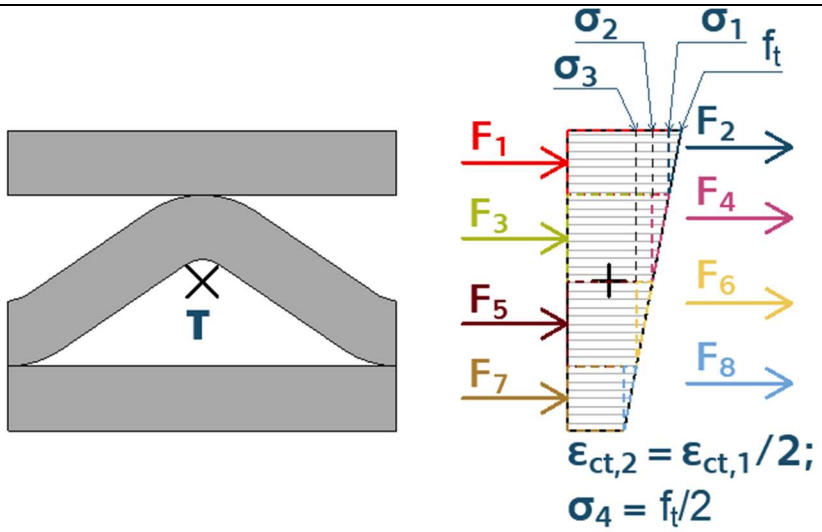
Prostý tah



$N_{Rd} = A_{st} f_t$

$M_{Rd} = 0$

Lichoběžník tah



$$\sigma_1 = \frac{2h - t}{2h} f_t$$

$$\sigma_2 = \frac{f_t}{2}$$

$$\sigma_3 = \frac{h + t}{2h} f_t$$

$$\sigma_4 = \frac{f_t}{2}$$

$$F_1 = bt\sigma_1$$

$$F_2 = \frac{bt(f_t - \sigma_1)}{2}$$

$$F_3 = \frac{A_2 \sigma_2}{2}$$

$$F_4 = \frac{A_2(\sigma_1 - \sigma_2)}{4}$$

$$F_5 = \frac{A_2 \sigma_3}{2}$$

$$F_6 = \frac{A_2(\sigma_2 - \sigma_3)}{4}$$

$$F_7 = \frac{bt f_t}{2}$$

$$F_8 = \frac{bt(\sigma_3 - \sigma_4)}{2}$$

$$z_1 = \frac{h}{2} - \frac{t}{2}$$

$$z_2 = \frac{h}{2} - \frac{t}{3}$$

$$z_3 = \frac{\frac{h}{2} - t}{2}$$

$$z_4 = \frac{\left(\frac{h}{2} - t\right) 2}{3}$$

$$z_5 = -z_3$$

$$z_6 = -\frac{\left(\frac{h}{2} - t\right)}{3}$$

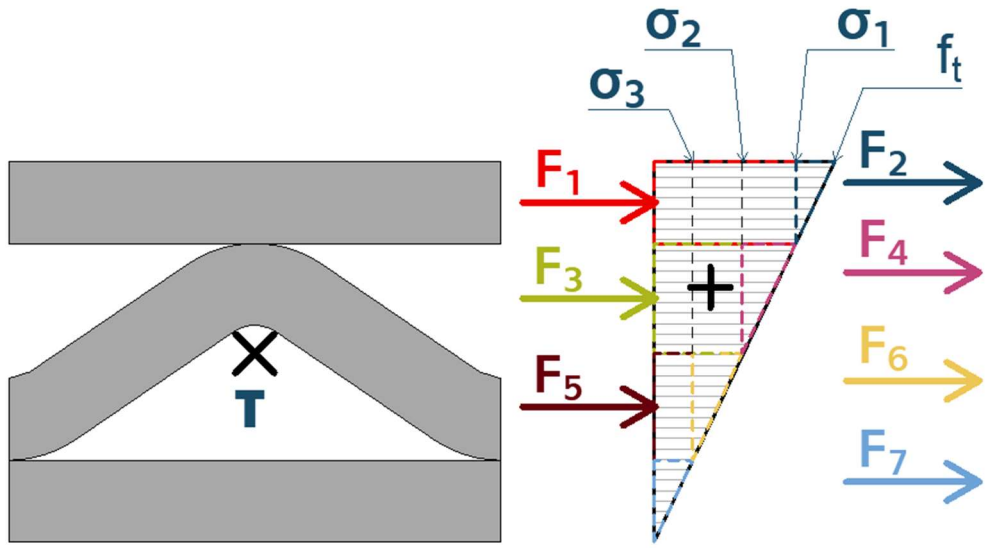
$$z_7 = -z_1$$

$$z_8 = -\left(\frac{h}{2} - \frac{2t}{3}\right)$$

$N_{Rd} = \sum F_i$

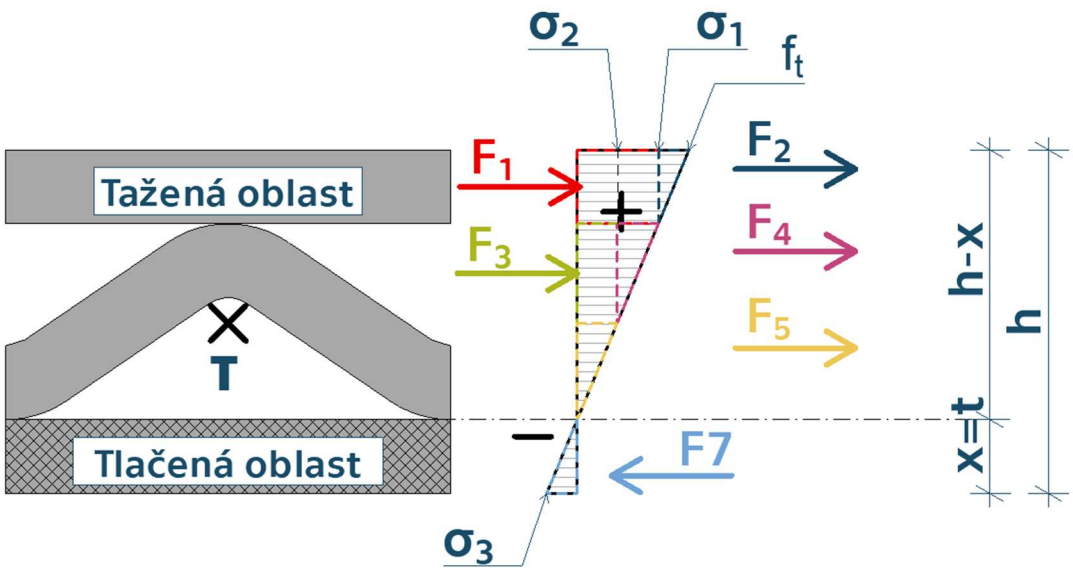
$M_{Rd} = \sum F_i z_i$

Trojúhelník tah



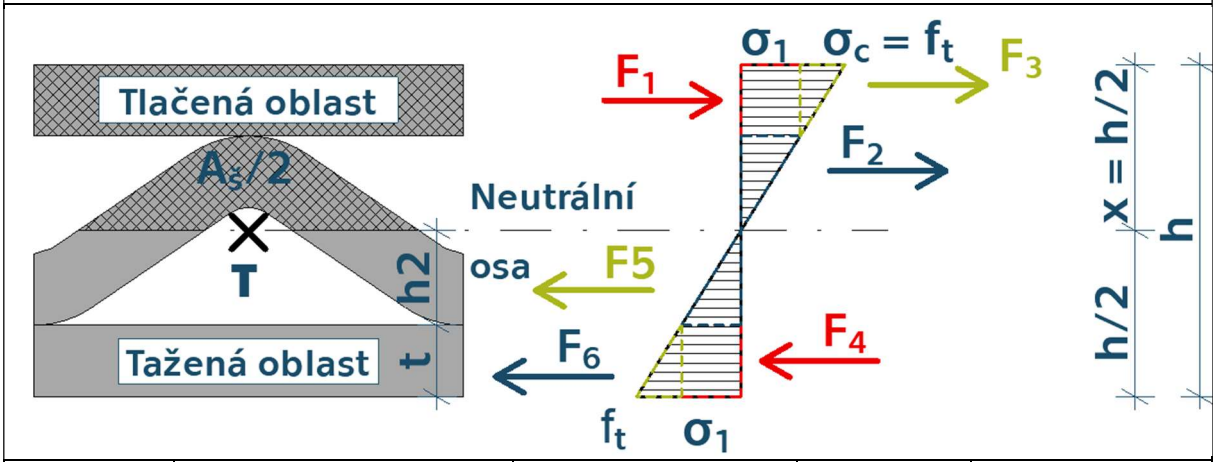
$\sigma_1 = \frac{h-t}{h} f_t$ $\sigma_2 = \frac{f_t}{2}$ $\sigma_3 = \frac{t}{h} f_t$	$F_1 = bt\sigma_1$ $F_2 = \frac{bt(f_t - \sigma_1)}{2}$ $F_3 = \frac{A_2\sigma_2}{2}$ $F_4 = \frac{A_2(\sigma_1 - \sigma_2)}{4}$ $F_5 = \frac{A_2\sigma_3}{2}$ $F_6 = \frac{A_2(\sigma_2 - \sigma_3)}{4}$ $F_7 = \frac{bt\sigma_3}{2}$	$z_1 = \frac{h}{2} - \frac{t}{2}$ $z_2 = \frac{h}{2} - \frac{t}{3}$ $z_3 = \frac{\frac{h}{2} - t}{2}$ $z_4 = \frac{\left(\frac{h}{2} - t\right)2}{3}$ $z_5 = -z_3$ $z_6 = -\frac{\left(\frac{h}{2} - t\right)}{3}$ $z_7 = -\left(\frac{h}{2} - \frac{2t}{3}\right)$	$N_{Rd} = \sum F_i$	$M_{Rd} = \sum F_i z_i$

Stav, kdy x=t



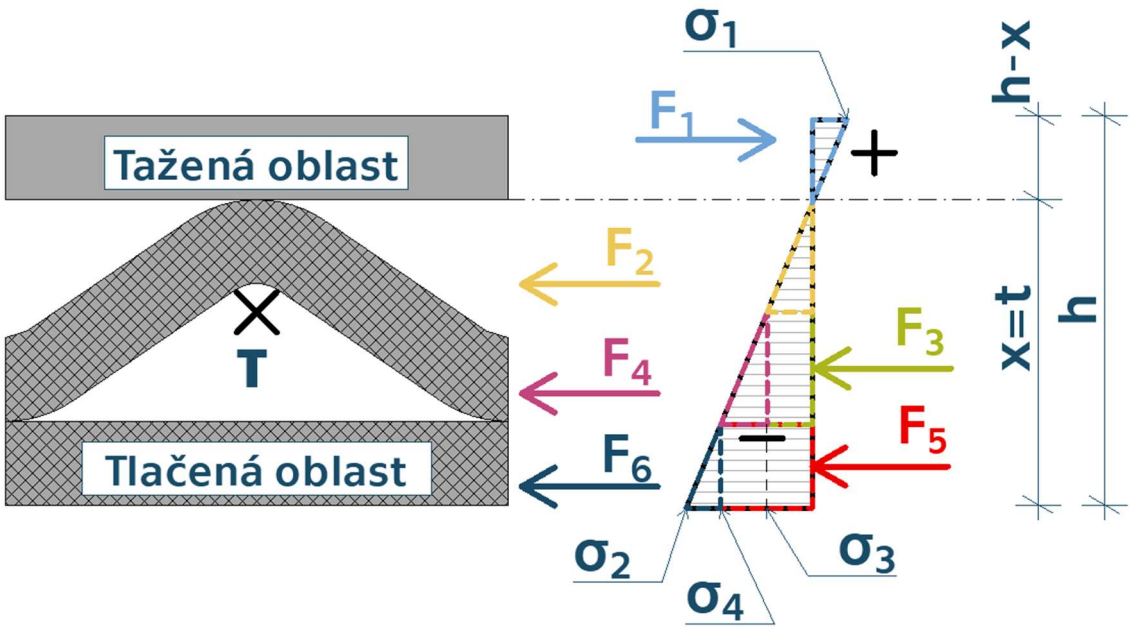
$\sigma_1 = \frac{h-2t}{h-t} f_t$ $\sigma_2 = \frac{\frac{h}{2}-t}{h-t} f_t$ $\sigma_3 = \frac{t}{h-t} f_t$	$F_1 = bt\sigma_1$ $F_2 = \frac{bt(f_t-\sigma_1)}{2}$ $F_3 = \frac{A_2\sigma_2}{2}$ $F_4 = \frac{A_2(\sigma_1-\sigma_2)}{4}$ $F_5 = \frac{A_2\sigma_2}{4}$ $F_6 = -bt\sigma_3$	$z_1 = \frac{h}{2}-\frac{t}{2}$ $z_2 = \frac{h}{2}-\frac{t}{3}$ $z_3 = \frac{\frac{h}{2}-t}{2}$ $z_4 = \frac{\left(\frac{h}{2}-t\right)2}{3}$ $z_5 = -\frac{\left(\frac{h}{2}-t\right)}{3}$ $z_5 = -\left(\frac{h}{2}-\frac{t}{3}\right)$	$N_{Rd} = \sum F_i$	$M_{Rd} = \sum F_i z_i$

Prostý ohyb



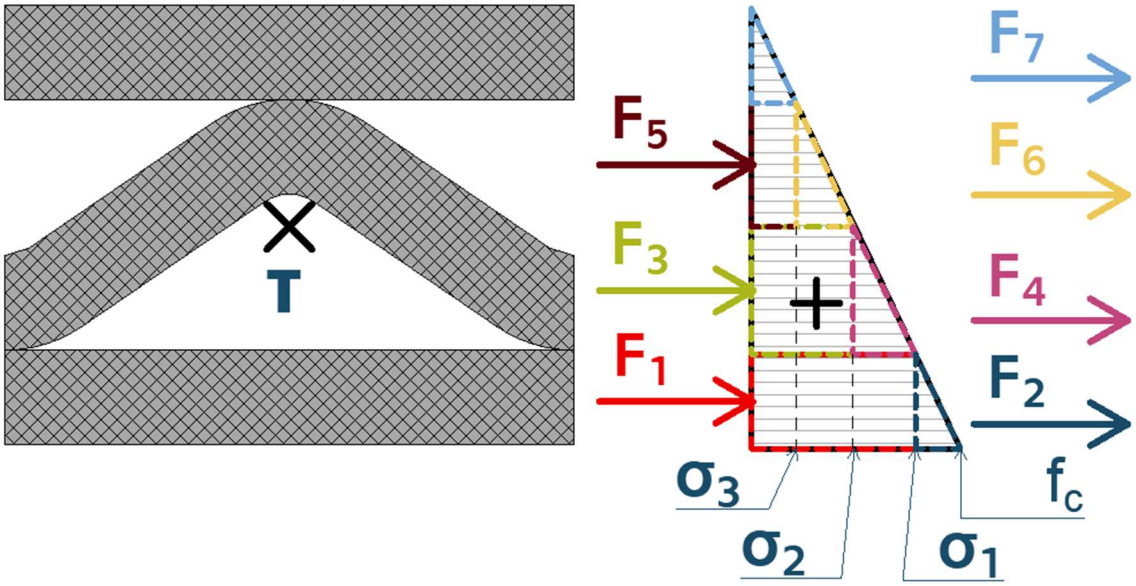
$\sigma_1 = \frac{h_2 f_t}{h/2}$	$F_1 = tb\sigma_1 = -F_4$ $F_2 = \frac{A_2\sigma_1}{4} = -F_5$ $F_3 = \frac{tb(f_t - \sigma_1)}{2} = -F_6$	$z_1 = h_2 + \frac{t}{2} = -z_4$ $z_2 = \frac{2h_2}{3} = -z_5$ $z_3 = h_2 + \frac{2t}{3} = -z_6$	$N_{Rd} = \sum F_i$	$M_{Rd} = \sum F_i z_i$

Stav, kdy $x = h - t$



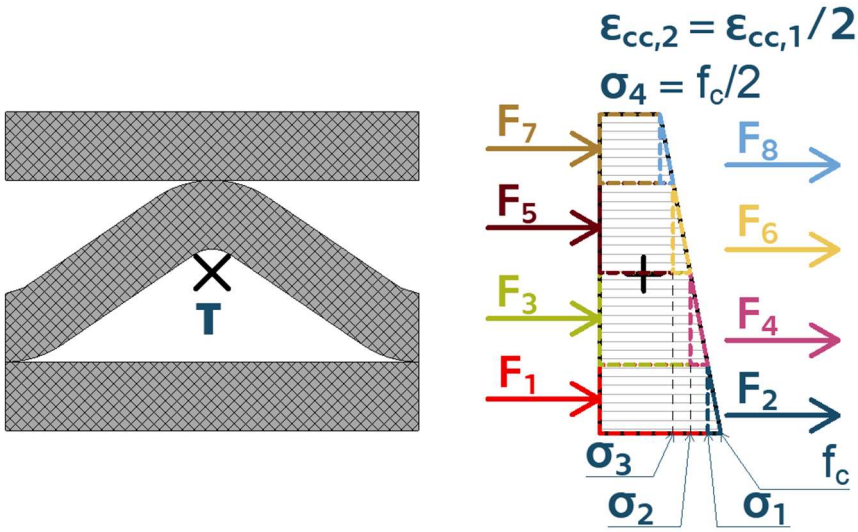
Porušení tahem $\sigma_2 < f_c$	$\sigma_1 = f_t$ $\sigma_2 = \frac{h-t}{t} f_t$ $\sigma_3 = \frac{\frac{h}{2}-t}{t} f_t$ $\sigma_4 = \frac{h-2t}{t} f_t$	$F_1 = \frac{bt\sigma_1}{2}$ $F_2 = -\frac{A_2\sigma_3}{4}$ $F_3 = -\frac{A_2\sigma_3}{2}$ $F_4 = -\frac{A_2(\sigma_4-\sigma_3)}{4}$ $F_5 = -bt\sigma_4$ $F_6 = -bt\frac{(\sigma_2-\sigma_4)}{2}$	$z_1 = \frac{h}{2} - \frac{t}{3}$ $z_2 = \frac{\frac{h}{2}-t}{3}$ $z_3 = -\frac{\frac{h}{2}-t}{2}$ $z_4 = -\frac{\left(\frac{h}{2}-t\right)2}{3}$ $z_5 = -\left(\frac{h}{2}-\frac{t}{3}\right)$ $z_6 = -z_1$	$N_{Rd} = \sum F_i$	$M_{Rd} = \sum F_i z_i$
Porušení tlakem $\sigma_2 > f_c$	$\sigma_1 = \frac{t}{h-t} f_c$ $\sigma_2 = f_c$ $\sigma_3 = \frac{\frac{h}{2}-t}{h-t} f_c$ $\sigma_4 = \frac{h-2t}{h-t} f_c$	$F_1 = \frac{bt\sigma_1}{2}$ $F_2 = -\frac{A_2\sigma_3}{4}$ $F_3 = -\frac{A_2\sigma_3}{2}$ $F_4 = -\frac{A_2(\sigma_4-\sigma_3)}{4}$ $F_5 = -bt\sigma_4$ $F_6 = -bt\frac{(\sigma_2-\sigma_4)}{2}$	$z_1 = \frac{h}{2} - \frac{t}{3}$ $z_2 = \frac{\frac{h}{2}-t}{3}$ $z_3 = -\frac{\frac{h}{2}-t}{2}$ $z_4 = -\frac{\left(\frac{h}{2}-t\right)2}{3}$ $z_5 = -\left(\frac{h}{2}-\frac{t}{3}\right)$ $z_6 = -z_1$	$N_{Rd} = \sum F_i$	$M_{Rd} = \sum F_i z_i$

Trojúhelník tlak



$\sigma_1 = \frac{h-t}{h} f_c$ $\sigma_2 = \frac{f_c}{2}$ $\sigma_3 = \frac{t}{h} f_c$	$F_1 = -bt\sigma_1$ $F_2 = -\frac{bt(f_c - \sigma_1)}{2}$ $F_3 = -\frac{A_2\sigma_2}{2}$ $F_4 = -\frac{A_2(\sigma_1 - \sigma_2)}{4}$ $F_5 = -\frac{A_2\sigma_3}{2}$ $F_6 = -\frac{A_2(\sigma_2 - \sigma_3)}{4}$ $F_7 = -\frac{bt\sigma_3}{2}$	$z_1 = \frac{h}{2} - \frac{t}{2}$ $z_2 = \frac{h}{2} - \frac{t}{3}$ $z_3 = \frac{\frac{h}{2} - t}{2}$ $z_4 = \frac{\left(\frac{h}{2} - t\right) 2}{3}$ $z_5 = -z_3$ $z_6 = -\frac{\left(\frac{h}{2} - t\right)}{3}$ $z_7 = -\left(\frac{h}{2} - \frac{2t}{3}\right)$	$N_{Rd} = \sum F_i$	$M_{Rd} = \sum F_i z_i$

Lichoběžník tlak



$\sigma_1 = \frac{2h-t}{2h} f_c$ $\sigma_2 = \frac{f_c}{2}$ $\sigma_3 = \frac{h+t}{2h} f_c$ $\sigma_4 = \frac{f_c}{2}$	$F_1 = bt\sigma_1$ $F_2 = \frac{bt(f_c-\sigma_1)}{2}$ $F_3 = \frac{A_2\sigma_2}{2}$ $F_4 = \frac{A_2(\sigma_1-\sigma_2)}{4}$ $F_5 = \frac{A_2\sigma_3}{2}$ $F_6 = \frac{A_2(\sigma_2-\sigma_3)}{4}$ $F_7 = \frac{btf_c}{2}$ $F_8 = \frac{bt(\sigma_3-\sigma_4)}{2}$	$z_1 = \frac{h}{2} - \frac{t}{2}$ $z_2 = \frac{h}{2} - \frac{t}{3}$ $z_3 = \frac{\frac{h}{2}-t}{2}$ $z_4 = \frac{\left(\frac{h}{2}-t\right)2}{3}$ $z_5 = -z_3$ $z_6 = -\frac{\left(\frac{h}{2}-t\right)}{3}$ $z_7 = -z_1$ $z_8 = -\left(\frac{h}{2}-\frac{2t}{3}\right)$	$N_{Rd} = \sum F_i$	$M_{Rd} = \sum F_i z_i$