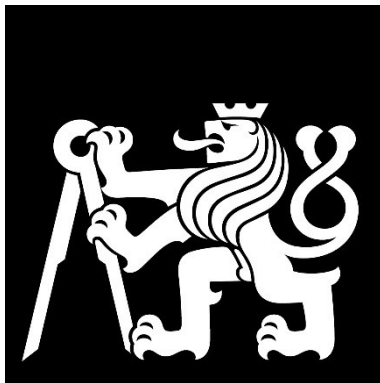


*ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE*

*FAKULTA STAVEBNÍ*



*Katedra konstrukcí pozemních staveb*

*Petr Hájek*

*Vyztužování betonu technickými textiliemi se zaměřením na zvýšení  
duktility*

*Diplomová práce*

2021

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení:	Hájek	Jméno:	Petr	Osobní číslo:	460451
Zadávací katedra:	Katedra konstrukcí pozemních staveb				
Studijní program:	Stavební inženýrství				
Studijní obor:	Konstrukce pozemních staveb				

### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:	Textilní beton se zaměřením na duktilitu				
Název diplomové práce anglicky:	Textile reinforced concrete with a focus on ductility				
Pokyny pro vypracování:	<p>Rešerše stávajícího stavu, porovnání technologie lití a stříkání textilních betonů. Úprava stávající směsi vysokohodnotného betonu pro aplikaci stříkáním. Porovnání ohybových únosností betonových vzorků vyztužených uhlíkovými textiliemi impregnovanými, bez impregnace a jejich vzájemné kombinace se zaměřením na vysokou ohybovou únosnost při zachování dostatečné duktility. Vyhodnocení výsledků.</p>				
Seznam doporučené literatury:	BRAMESHUBER, Wolfgang (ed.). Report 36: textile reinforced concrete-state-of-the-art report of RILEM TC 201-TRC. RILEM publications, 2006.				
Jméno vedoucího diplomové práce:	Ing. Tomáš Vlach				
Datum zadání diplomové práce:	29. 9. 2020	Termín odevzdání diplomové práce:	3. 1. 2021		
			<i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>		
	Podpis vedoucího práce		Podpis vedoucího katedry		

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

<i>Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.</i>	
29.9.2020	
Datum převzetí zadání	Podpis studenta(ky)

# *Prohlášení*

*Prohlašuji, že jsem předloženou diplomovou práci vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.*

*V Praze dne 2.1.2021*

.....

*podpis*

## *Poděkování*

*Především bych chtěl poděkovat svému vedoucímu diplomové práce Ing. Tomáši Vlachovi, za jeho velice vstřícný přístup při experimentech a konzultacích. Velké díky patří mé matce, která mě za všech okolností podporovala. Dále mé poděkování patří mému nejlepšímu příteli Ing. Radimu Dvořákovi za jeho okamžité rady při práci v MS Excel. Za korekturu této práce děkuji Ing. Janu Dvořákovi, Ph.D.*

*Název diplomové práce: Vyztužování betonu technickými textiliemi se zaměřením na zvýšení  
duktility*

*Název diplomové práce anglicky: Textile reinforced concrete with a focus on ductility*

## *Abstrakt*

Vysokohodnotný beton je materiál vhodný pro tvorbu subtilních prvků díky svým vysokým pevnostem, jemnozrnnému kamenivu a dobré zpracovatelnosti. Klasické vyztužení betonářskou ocelí je pro takový beton poněkud zastaralé, neboť potřebuje větší krycí vrstvu, přičemž již samotná výztuž má také jistou nezanedbatelnou tloušťku. Využití technických textilií jako výztuže do vysokohodnotného betonu je tak na místě. Nejenže je taková karbonová síť tenčí než síť ocelová, zároveň nepodléhá korozi, a tudíž nepotřebuje krycí vrstvu ke své pasivaci. V této diplomové práci je zkoumáno chování betonových vzorků v podobě tenkých destiček, vyztužených karbonovými textiliemi (a to ve dvou úpravách – jednak jako nasycené epoxidovou pryskyřicí, jednak bez nasycení). Tyto destičky pak byly vystaveny namáhání čtyřbodovým ohybem. Beton vyztužený technickými textiliemi je nazýván textilní beton. Práce vychází z receptury vysokohodnotného betonu, která po 28 dnech dosahuje tlakové pevnosti přes 130 MPa. Čerstvý beton, namíchaný dle této receptury, je kromě toho samozhutnitelný. Nicméně karbonová síť bez nasycení pryskyřicí snadno ztrácí svůj tvar a nelze ji zafixovat v bedně, do kterého se následně nalije beton, což lze považovat za zásadní nevýhodu takového postupu. Proto se pro vrstvení takto vyztuženého vzorku použije stříkaný beton. Ten zajistí tenkou krycí vrstvu, která stačí i na dobré spolupůsobení s textilní výztuží. Po úpravě receptury byly mezi sebou porovnány vzorky vyztužené nasycenou karbonovou tkaninou, tkaninou bez úpravy a jejich vzájemné kombinace. Práce ukázala výhodné spolupůsobení impregnované a neimpregnované sítě s ohledem na únosnost a duktilitu. Takto vyztužený vzorek měl velkou únosnost před první trhlinou a také byl schopen přenášet část zatížení i po vzniku trhliny.

## *Klíčová slova*

Karbonová textilie, stříkaný beton, duktilita, konzistence, zpracovatelnost, jemnozrnný beton, textilní beton

## *Abstract*

High performance concrete is a material used for the creation of subtle elements due to its high strength, fine grained aggregate and good workability. The traditional steel reinforcement is not such suitable material as a reinforcement. Steel needs larger cover and also the reinforcement itself diameter is not negligible. The use of technical textiles as reinforcement in high performance concrete is thus appropriate. A carbon textile is thinner than a steel reinforcing mesh and it is also not subject to corrosion, so it doesn't need a cover layer for its passivation. This thesis examines the behavior of concrete samples in the form of thin slabs. These slabs are reinforced using carbon fabrics (with two treatments - saturated with epoxy resin and without saturation). These plates were then loaded using four-point bending test. Concrete reinforced with technical textiles is called textile reinforced concrete. The thesis is based on the previous developer recipe of high performance concrete, which reaches a compressive strength of over 130 MPa after 28 days. In addition, fresh concrete mixed according to this recipe is self-compacting. However, the carbon textile without resin saturation easily loses its shape and cannot be fixed in the formwork while the concrete is subsequently poured, which can be considered as a major disadvantage of this process. Therefore, shotcrete is used to lay the sample thus reinforced. This ensures a thin cover layer, which is sufficient for good cooperation with the textile reinforcement. After adjusting the recipe, samples reinforced with saturated carbon fabric, untreated fabric, and their combinations were compared. The thesis showed an advantageous interaction of impregnated and non-impregnated network with respect to load-bearing capacity and ductility. The reinforced sample had a high load-bearing capacity before the first crack appears and was also able to transfer part of the load even after the crack occurred.

## *Keywords*

Carbon textile, shotcrete, ductility, consistency, workability, fine grained concrete, textile reinforced concrete

## *Obsah*

Obsah.....	7
Seznam použitých zkratek a symbolů .....	8
1 Úvod.....	9
1.1 Motivace.....	11
2 Vysvětlení základních použitých pojmů .....	11
3 Úprava stávající receptury .....	14
3.1 Jednotlivé vzorky receptur .....	15
3.2 Shrnutí výsledků provedených zkoušek betonu .....	19
4 Příprava bednění .....	22
5 Příprava textilní výztuže .....	22
6 Technologie stříkání.....	25
6.1 Jednotlivé pokusy .....	25
6.2 Shrnutí postupu nanášení betonu stříkáním .....	27
6.3 Časový rozvrh míchání.....	28
6.4 Spad.....	29
7 Teorie ohýbání betonu .....	29
8 Zkoušení vzorků.....	30
9 Výsledné vzorky .....	34
10 Výsledky a diskuse.....	36
11 Přibližná cena stříkaného textilního betonu .....	41
12 Závěr.....	41



## *Seznam použitých zkratk a symbolů*

Zkratky pro technické pojmy:

- SZB samozhutnitelný beton
- STTB stříkaný tenkovrstvý textilní beton
- PCE polykarboxylát, základ superplastifikátoru
- TRC textile reinforced concrete (textilní beton)
- HPC high performance concrete (vysokohodnotný beton)
- LTD laminovaná dřevotřísková deska
- OSB Oriented strand board (deska ze slepených dřevěných třísek – slisovaná)

Použité zkratky pro varianty vzorků:

- PHJ označení vzorků při optimalizaci receptury
- L vzorek betonovaný formou lití
- S vzorek betonovaný stříkáním betonu
- LS vzorek betonovaný kombinací lití a stříkání
- N neimpregnovaná karbonová síť
- I impregnovaná karbonová síť
- K kombinace impregnované a neimpregnované karbonové sítě
- SK skleněná výztužná vložka

## 1 Úvod

Klasické vyztužení betonu je dnes všeobecně rozšířené jako účinný a spolehlivý technologický postup, známý nejméně 150 let z doby, kdy Joseph Monier, patentoval vyztužení betonu železným drátem 1867 [1].

Beton, z latinského *betunium* (kamenná malta), byl však znám mnohem dříve [2]. Archeologický nález na území starověké Palestiny - dnešního Izraele objevil povrchovou úpravu podlah vápencovým betonem již 7 000 let př.n.l. [3]. S jistotou však víme, že zpracováním tohoto materiálu vynikali stavitelé římského impéria, kdy vkládáním malty mezi dvě kamenné lícové zdi v podstatě zavedli ztracené bednění [4]. Vrcholné stavitelské umění té doby představuje snad nejznámější chrám Pantheon v Římě z období kolem roku 125 n.l. [5]. Pád římské říše znamenal pro technologii betonu značný útlum poměrně na dlouhou dobu.

Monierův patent nastartoval vlnu zájmu o beton koncem 19. století. Předtím mohl být používán pouze jako tlačný prvek v konstrukci, protože nesnesl tahové namáhání. Pro náročnější a honosnější konstrukce se do té doby používalo železo a slitiny z něj vyrobené – litinový Křišťálový palác v Londýně [6]. Počátkem 20. století byl prováděn další výzkum s četnými experimenty. Významným experimentem v druhé polovině 20. století bylo přidání odpadního materiálu – popílku z elektráren a spaloven [7] a [8]. Popílek umožnil ovlivňovat konzistenci betonu jinak než pouhým přidáním vody, která zároveň snižuje pevnost betonu [9]. Popílek kromě zpracovatelnosti ovlivnil i dobu tuhnutí, resp. oddálil tuhnutí samo. Tím vznikla možnost dopravovat beton ze vzdálené betonárny na stavbu. Míchání betonu odborníky v betonárně nepochybně pozvedlo kvalitu, nadto byly vyvinuty nové přísady a příměsi (plastifikátory a mikrosilika). Díky popisu hydratace cementu [10], znalosti tranzitní zóny [11] a využití přísad a příměsí se z běžného betonu vyvíjí beton vysokohodnotný [12].

Po dopravě betonu na stavbu se beton ukládá do připravené formy – bednění. Aby nevznikaly nežádoucí vzduchové mezery neboli póry, je nutné beton správně zpracovat - zhutnit. Beton můžeme zpracovat těmito způsoby: litím a následným hutněním (vibrací, vpichy), litím velmi tekuté konzistence (SZB) [13] a **stříkáním**. Stříkaný beton je hutněn dopadem na nastříkávaný povrch [14].

Společně s vývojem receptury betonu se modernizuje hutní zpracování železa a začíná se používat betonářská ocel. Obecně známé konstrukční zásady jsou vštěpovány žákům již na střední odborné škole [9]. Na vyztužení jsou používány kromě variant betonářské oceli (sítě, tyče, třmínky) i další vložky: rozptýlená vlákna (ocelová, polypropylenová) [15], celkem nové je vyztužování **technickými textiliemi**, na obrázku 1 vpravo [16].

Technická textilie (karbonová, aramidová či skleněná) [16] oproti klasické betonářské oceli nemůže korodovat. To je její hlavní výhoda.



Obrázek 1: Karbonová síť (bez prosycení) pro vyztužení betonu, plošná hmotnost 255 g/m<sup>2</sup>

Vysokohodnotné betony jsou vyplněny jemným kamenivem. Obecně platí: čím pevnější materiál, tím tenčí prvek z něj může být vytvořen. To je případ těchto druhů betonu. Nicméně vyztužení betonářskou ocelí může být kontraproduktivní. Potřebuje totiž krycí vrstvu, přičemž již samotný výztužný prvek má značnou tloušťku. Proto je výhodné betonovat prvky vyztužené betonářskou ocelí třídy betonů s tlakovou pevností pohybující se kolem 40 MPa.

Aby mohla být využita přednost vysokohodnotných betonů, tj. jejich subtilnost, musí se vyztužovat jinými prvky než dosavadní betonářskou výztuží. Právě vložením tenké technické textilie a odstraněním krycí vrstvy vznikne subtilní konstrukce. Podobně vyztužený vysokohodnotný beton byl použit v diplomové práci před půl rokem [23], která pojednává o schodišti z tenkých stupnic a podstupnic vyztužených nasycenou karbonovou textilií.

Úkolem mé diplomové práce je sledování a vyhodnocení ohybové únosnosti tenkých betonových destiček vyztužených uhlíkovými textiliemi. K vyztužení vzorků se použijí dvě formy uhlíkové sítě: jednak předem prosycené polymerní matricí (epoxidová pryskyřice), jednak bez prosycení [17]. Dále budou pro tyto dvě formy technických textilií v textu používány názvy impregnované a bez impregnace. Karbonové sítě bez impregnace nemohou být vkládány do bednění předem a následně zality betonem. Je to způsobené tím, že nedrží tvar a lehce se bortí. Tím by vznikla nestejná úroveň uložení. Budou porovnány vzorky vyztužené jednotlivými variantami uhlíkových textilií. Následně se tyto varianty textilie zkombinují a bude pozorována ohybová únosnost společně s duktilitou.

Vzorky v podobě tenkých destiček budou betonovány metodou stříkáním. Hlavním důvodem je výše popsané chování neimpregnované karbonové textilie, ale také snaha dosáhnout velmi tenké vrstvy betonu. Kombinací stříkaného betonu s textilní výztuží je možné aplikovat rovnoměrně do průřezu i větší množství výztuže v porovnání s vrstvením betonu hladítkem, případně pouhým litím. Pracovně byl nazván stříkaný tenkovrstvý textilní beton – STTB. Ke zhotovení takového betonu se použije, v laboratorních podmínkách dostupná, omítkářská pistole. Z obrázku použité pistole (obrázek 2 vpravo) je patrná jediná možná poloha bednění pro stříkání – svislá, tj. kolmá nebo s mírným náklonem. Při pokusu o ukládání čerstvého betonu stříkáním na bednění ve vodorovné poloze totiž vytéká beton ze zásobníku – na obrázku modře.



Obrázek 2: Použitá pistole na omítky firmy Storch [24]

Aby bylo možné začít zpracovávat beton stříkáním, bude od vedoucího této diplomové práce převzata receptura samozhutnitelného vysokohodnotného jemnozrnného betonu, navržená na základě jeho předchozích výzkumů a určená výhradně pro lití [17]. V dalším textu o ní bude psáno jako o původní receptuře. Jedná se o recepturu pro vysokohodnotný beton, ve stáří 28 dní dosahuje tlakové pevnosti běžně přes 130 MPa (zkoušeno na krychlích o délce hrany 100 mm).

Aby mohl být beton vrstven, musí se nejdříve upravit převzatá původní receptura na lehce tekutější konzistenci. Při zkoušení stříkání vzorku čerstvého betonu z původní receptury se totiž beton buď odrážel, nebo po chvíli z bednění spadl. Od úpravy se požaduje lepší průtok plnicím hrdlem a dobrá přídržnost po nástřiku. Příliš tekutá konzistence bude snadno stékat a o výsledné pevnosti takto tekutého betonu ani nemluvě.

Cílem této práce je kombinací dvou forem uhlíkových textilií a tenkou krycí vrstvou dosáhnout u zkoumaných betonových destiček značné ohybové únosnosti spolu s výraznou duktilitou.

## 1.1 Motivace

Vývoj textilního betonu znamená nové možnosti v architektuře. Její vývoj směřuje více k subtilnějším prvkům, které vyjadřují lehkost a zajišťují dostatečnou pevnost. Doby masivních konstrukcí jsou minulostí. Vyztužení nasycenou textilií vytváří odolný, avšak stále křehký prvek. Tudíž nejsou okem viditelné trhliny před porušením, jako to bývá u klasického železobetonu. Přidáním karbonové textilie se sleduje vytvoření rezervy únosnosti po porušení prvku. Nasycená bude mít zřejmě vynikající únosnost. Od nenasyčené se očekává nižší únosnost v porovnání s nasycenou, ale mnohem lepší duktilní chování, podobnou vlákenné vyztuži. Proto se nabízí kombinace vyztuží, která mě zajímá pro svůj aplikační potenciál.

## 2 Vysvětlení základních použitých pojmů

**Vysokohodnotný beton (HPC)** je specifický tím, že některá z jeho vlastností je oproti běžnému betonu upravena, vylepšena. Nejčastěji to bývá právě zvýšená pevnost, nicméně u betonu lze upravit mnoho dalších vlastností. Jmenovitě se může jednat třeba o pevnost v tahu za ohybu, odolnost vůči agresivnímu prostředí. Zlepšení vlastností se docílí užitím lepších složek (zároveň dražších), zmenšením tranzitní zóny (mezi kamenivem a cementovým kamenem) [11], a přísnější technologické kázně, než je tomu u běžného betonu. Velmi důležitý je proces ošetřování takového betonu [12].

**Jemnozrný beton** – tento pojem může být v rozporu se zažitou praxí. Nicméně betony, v nichž je použité maximální zrno kameniva menší než 2 mm, splňují požadavky vysokohodnotného betonu [18]. Tento beton je navíc míchán převážně v laboratořích, zatím není v praxi natolik rozšířen, aby mohl být připraven dělníky na stavbách. Malta se od takového betonu liší zejména užitím a přípravou, tj.:

- Používá se pro spojení prefabrikovaných dílů na stavbě (cihly, panely)
- Velmi často bývá vyrobena přímo na stavbě

Jemnozrný beton má v porovnání s betonem běžným homogennější strukturu, způsobené zejména menší tranzitní vrstvou [11]. Tím se lépe docílí vyšších pevností.

V této diplomové práci byl použit právě **jemnozrný** beton. Dále o něm je psáno pouze jako o betonu.

**Segregace** je přirozený jev po zamíchání různých směsí. Když smícháme jednotlivé složky, vytvoříme homogenní směs (víceméně rovnoměrně rozdělené složky). Po skončení míchání nastává segregace neboli usazování/sedimentace. Tento proces skončí, až se jednotlivé složky (vlivem rozdílné objemové hmotnosti) rozdělí. Prakticky to znamená usazení kameniva v řídkém betonu ve spodní části nádoby a cementové mléko se bude držet při povrchu.

Tomuto procesu lze zabránit převozu betonu v autodomíchávacích, které čerstvý beton neustále promíchávají po dobu přepravy. Zdatní matematici jsou schopni rychlost sedimentace spočítat. Odporovou sílu, která zabraňuje sedimentaci, definoval Stokes svým vztahem, kde jsme schopni ovlivnit pouze poloměr částice. Prakticky to znamená přidat do betonu jemné částice.

**Přísada** se dávkuje v malém množství, cca do 5 % hmotnosti cementu. Výrazně upravuje vlastnosti, zapojuje se do procesu hydratace. Jedná se o plastifikátory, zpomalovače nebo urychlovače tuhnutí. [19]

**Příměs** má v receptuře značně větší obsah oproti přísadám (10 až 30% hmotnosti cementu). Spíše se nezapojuje do hydratace cementu. Hojně se používají pro lepší hutnost a zabránění segregace. Typickým příkladem může být popílek nebo mikrosilika. [19]

Název **stříkaný beton** použijeme tehdy, když je ukládán pomocí proudu stlačeného vzduchu tryskou. [14]

**Betonovou směsí** nazýváme složky betonu v procesu míchání, které nejsou zcela homogenizovány.

**Čerstvý beton** je ten, jehož složky jsou mícháním zcela homogenizovány.

**Čerstvý beton** po opuštění trysky před dopadem na podklad se nazývá **čerstvý stříkaný beton**. Po dopadu na podklad se jedná o ztuhlý čerstvý stříkaný beton. Následujících 24 hodin stáří ho nazýváme mladý stříkaný beton. Poté již hovoříme o nezralém stříkaném betonu. Po 28 dnech od okamžiku nástřiku se beton stává zralým stříkaným betonem. [14]

**Operátor trysky** je pracovník, který obsluhuje trysku a stříká beton. Může ji obsluhovat ručně, nebo automaticky pomocí manipulátoru. Na tuto obsluhu jsou kladeny vysoké požadavky, které se ověřují písemnými a praktickými testy. [14]

**Spad** je část objemu neztuhlého čerstvého stříkaného betonu. Zpravidla se na podkladu neudrží větší zrna kameniva nebo ocelová vlákna. [14]

Druhy stříkaného betonu dle **technologie nanášení**:

Historicky prvním způsobem byl **suchý** způsob nástřiku, též zvaný jako suchá cesta. Voda se přidává k betonové směsi v prostoru komory před tryskou. Společně s vodou se přidává i urychlovač. Suchá směs se dopravuje hadicemi proudem stlačeného vzduchu k trysce. Množství vody je pod kontrolou operátorem trysky. Tento způsob má údajně vyšší spad (cca dvojnásobný), oproti níže uvedenému způsobu nanášení. Má své uplatnění při menších betonovaných objemech (opravy) a při značně dlouhé dopravě ke spotřebišti. [14]

Dalším a současně častěji využívaným je **mokrý** způsob nástřiku neboli mokrá cesta. Důvodem je přesné dávkování množství vody a tím i záruka výsledných vlastností čerstvého i zralého stříkaného betonu. Suchá betonová směs se mísí s vodou před umístěním do čerpadla, které následně směs dopraví hadicí do trysky. Urychlující přísada je do směsi přidávána až v prostoru komory před tryskou. [19] Jelikož se tato diplomová práce zabývá vysokohodnotným betonem, který lze namíchat jen při přísném dodržení receptury, byl mokrý způsob nástřiku jedinou volbou. Výše popsaný způsob dopravy použit nebyl, namíchaný čerstvý beton byl umístěn do zásobníku, který je součástí omítkářské pistole.

Stříkaný beton se dostal do povědomí již na počátku 20. století. V České republice byl tento beton použit při opravě cihelné klenby v tunelu Krasíkov (1931-1932). Rozvoj využití nastal pak kolem roku 1970. [14]

**Duktilitu** neboli houževnatost mají materiály či vzorky, které jsou před dosažením pevnosti schopny značného přetváření, ideálním příkladem takového materiálu je dřevo. U takových vzorků při průběhu zatěžování můžeme pozorovat velký průhyb nebo trhliny před jejich destrukcí. Opakem duktility je **křehké porušení**, jako je tomu například u skla.

### **Složení stříkaného betonu**

Používá se cement vyšší pevnosti, např. CEM I 42,5 R. Množství se pohybuje mezi 400 až 450 kg/m<sup>3</sup>. [14]

Kamenivo je pro stříkaný beton jemnější, aby se minimalizoval spad a aby větší zrna nepoškozovala již nanesenou vrstvu. Proto je doporučený maximální obsah zrn velikosti nad 8 mm do 10 % celkového objemu. U konstrukčního stříkaného betonu je maximální velikost zrna kameniva stanovena hodnotou mezi 10 a 12 mm. [14]

### Voda

Vodní součinitel se pohybuje v rozmezí 0,4 – 0,5. Je to dáno tím, že při nízkém vodním součiniteli se zvýší prašnost a zároveň vyšší vodní součinitel způsobuje stékání betonu po povrchu. [14]

### Přísady

Urychlovače tuhnutí se používají v drtivé většině případů. Dovolují betonovat vrstvy o mocnosti nad 10 cm, umožňují rychlejší výkonnost způsobenou menší technologickou přestávkou. Častější jsou nealkalické urychlovače, které při obvyklém dávkování nezpůsobují výrazné snížení konečné pevnosti. V České republice se hojně používá dávkování tekutých urychlovačů v trysce. Doporučená dávka je 5,5 až 8 % hmotnosti cementu. Toto množství se dále upraví dle teploty směsi, vzduchu a tloušťky vrstvy. Vodní sklo zlepšuje lepivost a vaznost, jeho použití je však značně omezeno tím, že výrazně snižuje konečné pevnosti. U každé přísady musí být ověřena „snášlivost“ s cementem, a to zkouškami nárůstu pevnosti, případně dalšími. Jako referenční vzorek je receptura bez přísady. [14]

### Příměsi

Mikrosilika se dávkuje v rozmezí 2 až 8% hmotnosti cementu. Zvyšuje lepivost a hutnost. [14]

### **Textilní beton (TRC)**

Vyztužování betonu železnými vložkami má v dnešní době jednu zásadní nevýhodu – poměrně velkou tloušťku konstrukce, která je nutná z důvodu ochrany železné výztuže proti korozi. Koncem devadesátých let v německých univerzitních centrech vznikl beton vyztužený technickými textiliemi, které nepodléhají korozi. To zmenší tloušťku betonové konstrukce o minimálně 20 mm (při velmi dobrých podmínkách betonáže). Dnes je světově rozšířen jako kombinace technických textilií a jemnozrnného vysokohodnotného betonu. [16]

Jako technické textilie jsou používána skleněná, uhlíková a aramidová vlákna, která mohou být následně impregnována epoxidovou pryskyřicí. Ta zvýší pevnost i křehkost. Poměrně starší podobnou výztuží jsou rozptýlená krátká vlákna – vláknobeton. Ta mají zásadní nevýhodu v nahodilé orientaci takové výztuže. Textilní beton používá vlákna delší a orientovaná do směru namáhání daného prvku. Tím docílí lepšího využití a s tím úzce související vyšší pevnosti. [16]

Pokud jsou na stříkaný beton kladeny požadavky na trvanlivost, je dobré jej vyztužovat ocelovými vlákny. **Vyztužení sítěmi** a příhradovými rámy **podporuje vznik dutin**, které je možné vhodným způsobem nástřikem minimalizovat (náklon trysky), nelze je však zcela vyloučit. [14]

### 3 Úprava stávající receptury

Převzatá původní receptura od vedoucího mé diplomové práce neumožňovala nanášení stříkáním omítkářskou pistolí. Z velké části se odrážela a nelepila na bednění. Abych lépe pochopil chování čerstvého betonu při absenci jednotlivých příměsí, rozhodl jsem se několik směrů namíchat a kompletně vynechat jednotlivé složky receptury. Původní receptura obsahuje:

Složka	m [kg] – 4,5 L	m [kg] – 1 m <sup>3</sup>
cement (CEM I 42,5 R Mokrá)	3,060	680
technický písek ST 01/06	2,592	576
technický písek ST 06/12	1,728	384
mikrosilika BASF 940 U-S	0,788	175
mikromletá křemenná moučka ST 6	1,463	325
superplastifikátor na bázi PCE	0,131	29,1
voda	0,768	170,6

Tabulka 1: Původní receptura

Receptura je rozdělena do dvou sloupců, první sloupec slouží pro praktické zkoušky v laboratoři na malou záměs. Druhý sloupec ukazuje, kolik je potřeba materiálu na jeden m<sup>3</sup>. Technický písek je označen v desetinách mm, tj. číslo 12 znamená 1,2 mm – největší zrno. Původně používaný plastifikátor byl od firmy BASF MasterGlenium ACE 300.



Obrázek 3: Zkouška tekutosti

Postupně byly odebrány tyto příměsi: bez mikrosiliky, bez křemenné moučky, bez křemenné moučky a mikrosiliky. Aby bylo možné přibližně určit rychlost průtoku čerstvého betonu v číslech, byl použit trychtýř a měřilo se množství protečeného čerstvého betonu za určitý časový úsek. Zmíněné úseky byly dva, po 30 s a 60 s. Pracovně jsem tento postup pojmenoval jako zkouška **tekutosti** čerstvého betonu. Jak je dále popsáno, tato jednoduchá pomocná zkouška byla nápomocná pro úpravu receptury stříkaného tenkovrstvého betonu. Znázorněna je na obrázku 3, vlevo. Probíhá následovně: Z naplněného trychtýře (zde zelený) protéká určité množství betonu do nádoby, která je umístěná na váze. Odečet množství betonu v nádobě probíhá po 30 a 60 sekundách.

### 3.1 Jednotlivé vzorky receptur

Označení vzorků vychází ze jména osoby provádějící betonáž a následnou zkoušku, shoduje se s jménem autora této práce. Ze všech receptur byly vybetonovány stejné sady vzorků, vždy 3 trámečky s rozměry 160 x 40 x 40 mm a také 3 krychle s rozměry 100 x 100 x 100 mm. Na trámečkách byla sledována pevnost v tahu za ohybu již ve stáří 7 dní dle platné ČSN [26]. Na úlomcích byly následně změřeny také orientační tlakové pevnosti, podle ČSN [25]. Časový interval 7 dní byl zvolen z důvodu omezeného času na realizaci a sepsání diplomové práce, aby mohlo být odzkoušeno a navrženo více směsí i s ohledem na průběžné výsledky pevností. Krychle byly určeny již pro klasické zkoušky pevnosti betonu v tlaku po 28 dnech od betonáže podle ČSN [26].

**PHJ\_1:** První vzorek čerstvého betonu byl namíchán bez přidání mikrosiliky. Velmi výrazně se zde projevila segregace a na první pohled bylo zřejmé, že takto namíchaný beton nebude možné zpracovat.

**PHJ\_2:** Pro porovnání tekutosti byl namíchán vzorek reprezentující původní recepturu. Při dodržení převzaté receptury vykazoval druhou nejhorší tekutost.

**PHJ\_3:** Tento vzorek byl ochuzen o křemennou moučku i mikrosiliku. Zde byl zjištěn velký vliv křemenné moučky na tekutost čerstvého betonu. Ve vysokohodnotných betonech se tato moučka započítává do vodního součinitele, stejně tak mikrosilika. Výsledek byl podobný jako u prvního vzorku, tj. značná segregace, ovšem s tím rozdílem, že byla umocněna tekutost. Ta byla tak značná, že jako v jediném případě nebylo možné změřit množství protečené směsi za druhý časový úsek. Takový beton opět nelze použít.

**PHJ\_4:** Poslední odebranou příměsí byla křemenná moučka samostatně. Zde se opět v důsledku velkého měrného povrchu křemenné moučky výrazně zvýšila tekutost. Také se prokázala účinnost mikrosiliky proti segregaci, jelikož tento vzorek čerstvého betonu prakticky nesegregoval. Nicméně pro stříkání na svislé bednění byl čerstvý beton příliš tekutý. Tyto první čtyři sady vzorků jsou zobrazeny na obrázku 4.



Obrázek 4: První čtyři sady vzorků



**PHJ\_5:** Dalším nápadem pro změnu konzistence čerstvého betonu bylo přidání vody na 0,9 kg. Ta skutečně pomohla konzistenci být více tekutá. V tu chvíli se však toto množství přidané vody zdálo malé, i když tekutost byla v porovnání s ostatními vzorky dobrá.

**PHJ\_6:** Bez zkoušky stříkání na provizorní bednění byl namíchán ještě jeden vzorek. Tentokrát bylo sníženo množství křemenné moučky (1,2 kg) a zvýšila se hmotnost přidaného plastifikátoru (0,155 kg). To konzistenci pomohlo jen nevýrazně. Bylo zřejmé, že takto razantní přidání plastifikátoru neprospívá. Další dvě vybetonované sady vzorků ukazuje obrázek 5.



Obrázek 5: Pohled na další dvě sady vzorků

**PHJ\_7:** První zkoušené stříkání se uskutečnilo s recepturou, kde byl výrazně zvýšen vodní součinitel. Celková hmotnost vody byla 1 kg. Tryska se tentokrát neucpávala, jako při původní receptuře. Avšak značná tekutost způsobila stékání betonu z bednění.

**PHJ\_8:** Pro další zkoušku stříkání bylo rozhodnuto výrazně snížit vodu na 0,82 kg. Výsledkem byla silnější vrstva stříkaného betonu. Přes nejnižší tekutost však stále stékala z povrchu bednění. Po této zkoušce bylo nutné pracovat s dalšími přísadami.

**PHJ\_9:** Zde bylo množství vody lehce zvýšeno na 0,9 kg a sníženo množství moučky na 1,2 kg pro jednu záměs. Změřená tekutost byla vyšší, to se projevilo i po nastříkání na bednění. Beton stále stékal z bednění.

**PHJ\_10:** U tohoto vzorku byla oproti předchozímu ubrána část vody (0,86 kg). Podobné zmenšení hmotnosti se dočkala i křemenná moučka (1,1 kg). Snížen byl i obsah plastifikátoru na 0,11 kg. Tekutost byla lehce lepší než u prvních vzorků. Při nástřiku bylo pozorováno, že směs nestéká dolu po bednění. Přes tento klad je nutné zmínit i zápor. Ten spočíval v nadměrném spadu.

**PHJ\_11:** V následující receptuře bylo nepatrně zvýšeno množství plastifikátoru na 0,13 kg. Zbytek receptury byl identický s předchozí směsí. Tekutost byla o něco lepší, stejně jako lepivost. Výsledná nastříkaná vrstva byla tenčí. I zde byl výrazný spad. Nicméně takto upravená receptura postačila na vybetonování prvních dvou sad vzorků s aplikovanou uhlíkovou výztuží bez impregnace pro ověření realizovatelnosti. Konzistence betonu není vhodná pro lití mocnějších vrstev, jelikož vytváří značné póry. To můžeme vidět při pohledu na obrázek 6.



Obrázek 6: Póry v trámečcích pro zkoušku ohybem způsobené změnou konzistence pro stříkaný beton, vzorky PHJ\_11

## PHJ\_12

Závěrečnou úpravou receptury byla změna plastifikátoru. Nyní byl použit STACHEMENT 951 (FM) od firmy Stachema s.r.o. Se změnou plastifikátoru bylo nutné snížit množství vody na 0,81 kg. Výsledná tekutost a následná nastříkaná vrstva byla bezvadná. Vrstva byla tenká, nestékala a lépe držela na bedně než předchozí receptura. Pohledem na vybetonované vzorky na obrázku 7 se můžeme přesvědčit o malém úbytku pórů, než u předchozího vzorku na obrázku 6.



Obrázek 7: Zmenšení pórovitosti vzorků změnou plastifikátoru u poslední varianty receptury, vzorky PHJ\_12

Jednotlivé úpravy přehledně zobrazuje tabulka 2 níže. Byla nápomocná pro úpravu originální receptury. Ukázala zejména vliv mikrosiliky a křemenné moučky na tekutost čerstvého betonu. To způsobuje především jejich velký měrný povrch. Zároveň potvrdila celkem známou zkušenost, že zvýšené množství plastifikátoru nemusí zlepšovat zpracovatelnost, v našem případě tekutost. V tabulce označené číslem 3 je seskupené množství jednotlivých složek dílčích receptur.

Receptura	Rozdíl oproti originální receptuře	Množství protečeného betonu [g] za	
		30 s	60 s
PHJ 1	bez mikrosiliky	150	400
PHJ 2	-	130	260
PHJ 3	bez křemenné moučky a mikrosiliky	1150	-
PHJ 4	bez křemenné moučky	750	1300
PHJ 5	voda 0,9 kg	400	800
PHJ 6	plastifikátor (0,155 kg), křemenná moučka (1,2 kg)	250	470
PHJ 7	voda 1 kg	700	1320
PHJ 8	voda 0,82 kg	120	240
PHJ 9	voda 0,9 kg, křemenná moučka 1,2 kg	590	1100
PHJ 10	voda 0,86 kg, plastifikátor 0,11 kg, k. moučka 1,1 kg	200	390
PHJ 11	voda 0,86 kg, plastifikátor 0,13 kg, k. moučka 1,1 kg	250	500
PHJ 12	voda 0,81 kg, plastifikátor 0,13 kg, k. moučka 1,1 kg	470	900

Tabulka 2: Tabulka tekutosti

Receptura	mikrosilika BASF 940 U-S	mikroml. křemenná moučka ST 6	Super- plasti- fikátor na bázi PCE	voda	cement CEM I 42,5 R Mokrá	technický písek	
						ST 01/06	ST 06/12
Original	0,788	1,463	0,131	0,768	3,060	2,592	1,728
PHJ 1	-	1,463	0,131	0,768			
PHJ 2	0,788	1,463	0,131	0,768			
PHJ 3	-	-	0,131	0,768			
PHJ 4	0,788	-	0,131	0,768			
PHJ 5	0,788	1,463	0,131	0,900			
PHJ 6	0,788	1,200	0,155	0,768			
PHJ 7	0,788	1,463	0,131	1,000			
PHJ 8	0,788	1,463	0,131	0,820			
PHJ 9	0,788	1,200	0,131	0,900			
PHJ 10	0,788	1,100	0,110	0,860			
PHJ 11	0,788	1,100	0,130	0,860			
PHJ 12	0,788	1,100	0,130	0,810			

Tabulka 3: Hmotnost jednotlivých složek v kg pro záměs o velikost 4,5 L u dílčích receptur

### 3.2 Shrnutí výsledků provedených zkoušek betonu

Je známo, že mikrosilika způsobuje tzv. medovou konzistenci betonu. Z výše uvedených zkoušek se jednoznačně ukázal obrovský přínos mikrosiliky proti segregaci betonu. Křemenná moučka výrazně snižuje vodní součinitel a tím má velký vliv na konzistenci. To je zapříčiněno jejím velkým měrným povrchem.

Prvním krokem bylo snížení jejího obsahu. Poté následovalo opatrné zvýšení množství vody. Konečnou úpravou receptury byla změna dodavatele plastifikátoru. Z původní receptury betonu, který se odrážel a ucpával trysku omítkařské pistole, byla receptura upravená tak, aby snadno prošla tryskou a ulpěla na povrchu bednění. Je na místě se zmínit o velké části spadu neboli spadlého betonu, který se vždy odrazí nebo nedoletí na povrch bednění. Při vážení různých složek betonu je dobré nejdříve navážít kamenivo a mikrosiliky a nechat přibližně 5 minut promísit. To je vhodné z důvodu shluků u mikrosiliky, které se tímto rozbijí. Při stříkání by to způsobovalo v lepším případě vypadávání větších kusů z trysky, v tom horším případě se tryska ucpe. Tuto závadu lze odstranit opakovaným stisknutím spouště, nicméně to práci při stříkání dost ztěžuje. Fotografie níže, obrázky 8 a 9, zobrazují průběžný boj se stékáním čerstvého betonu a také jeho optimální tloušťku po nastříkání. Graficky jsou na obrázcích označeny použité receptury pro možnost porovnání. Pod fotkami jsou umístěny 2 tabulky (s číslem 4 a 5). Tabulka 4 slouží pro porovnání originální a upravené receptury. Tabulka 5 následně ukazuje průměrné pevnosti dílčích receptur, které vedly k výsledné upravené receptuře.



Obrázek 8: Pohled na zkušební bednění



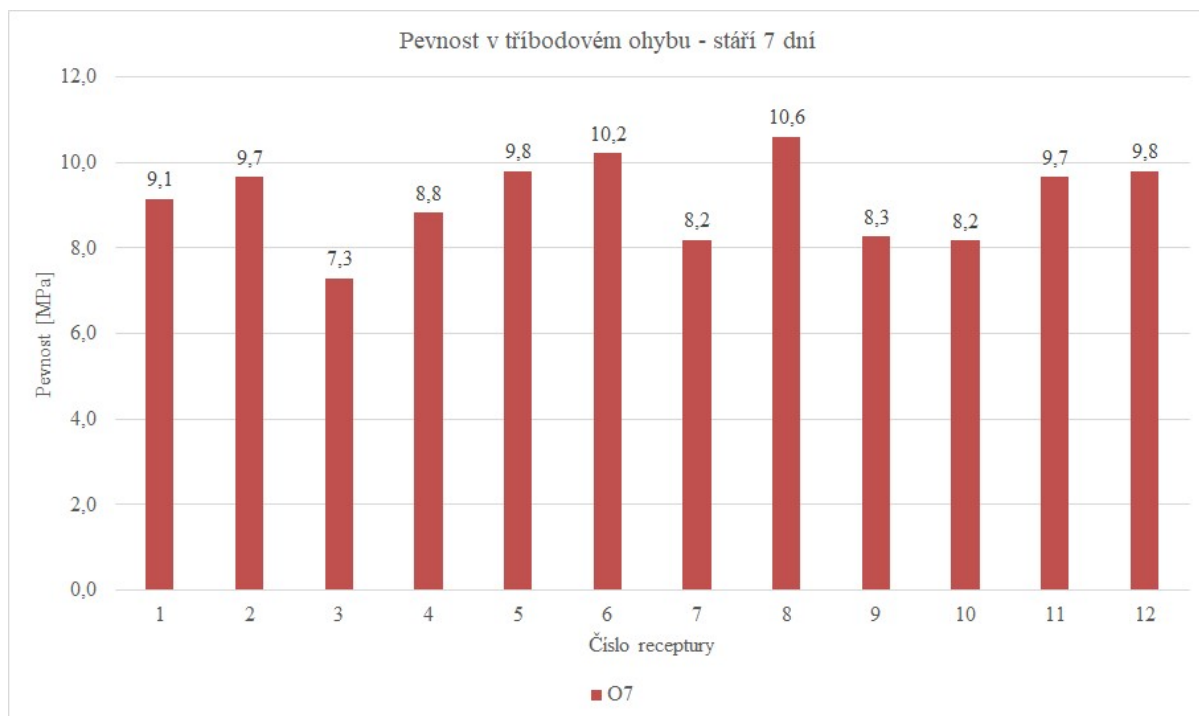
Obrázek 9: Profil zkušební bednění

Složka	m [kg] – 4,5 L		m [kg] – 1 m <sup>3</sup>	
	PHJ 12	Původní	PHJ 12	Původní
cement (CEM I 42,5 R Mokrý)	3,060	3,060	680	680
technický písek ST 01/06	2,6	2,592	578	576
technický písek ST 06/12	1,73	1,728	384	384
mikrosilika BASF 940 U-S	0,788	0,788	175	175
mikromletá křemenná moučka ST 6	1,1	1,463	244	325
superplastifikátor na bázi PCE	0,13	0,131	28,9	29,1
voda	0,81	0,768	180	170,6

Tabulka 4: Upravená receptura

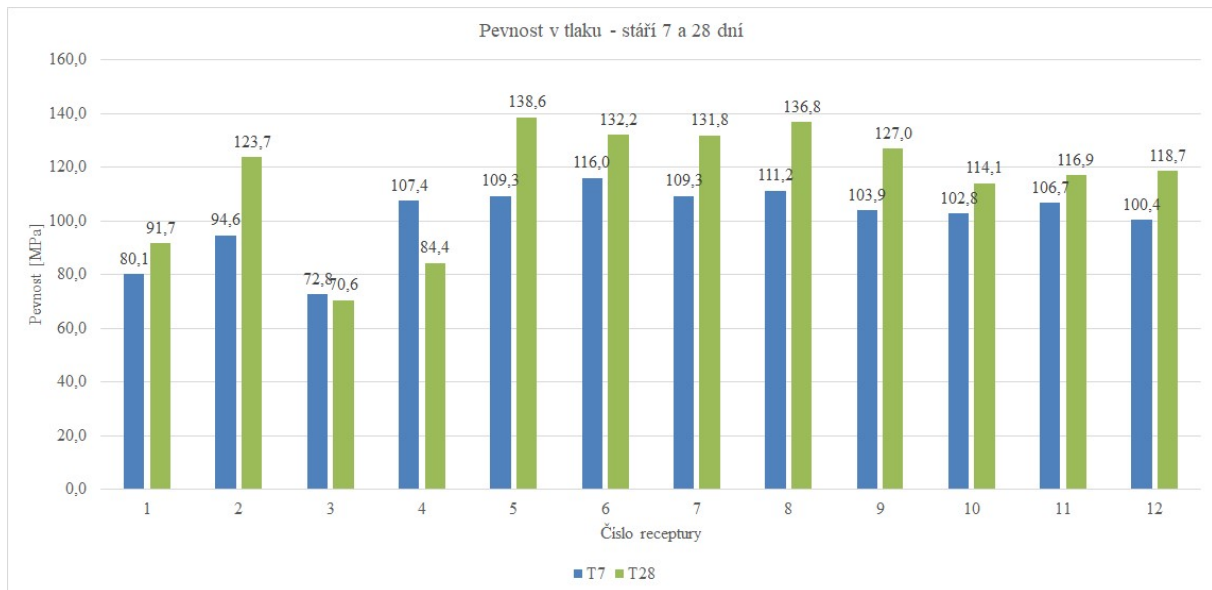
Receptura	Pevnost [MPa]		
	Tříbodový ohyb – 7 dní	Tlak – 7 dní	Tlak – 28 dní
PHJ 1	9,15	80,09	91,71
PHJ 2	9,67	94,91	123,71
PHJ 3	7,30	72,77	70,57
PHJ 4	8,82	107,45	84,39
PHJ 5	9,79	109,29	138,61
PHJ 6	10,21	116,02	132,20
PHJ 7	8,19	109,34	131,81
PHJ 8	10,61	111,23	136,83
PHJ 9	8,27	103,89	127,05
PHJ 10	8,17	102,83	114,08
PHJ 11	9,67	106,65	116,91
PHJ 12	9,80	100,40	118,71

Tabulka 5: Pevnosti vzorků zkušebních receptur



Obrázek 10: Graf pevností v tahu za ohybu po 7 dnech od betonáže na trámečcích 40 x 40 x 160 mm

Jak je prezentováno na obrázku 10, pevnost v tahu za ohybu - tříbodovým ohybem na trámečcích 40 x 40 x 160 mm je poměrně vysoká. Lze najít podobnost trendu s grafem tlakových pevností níže. Tuto pevnost nepochybně ovlivňuje přítomnost křemenné moučky.



Obrázek 11: Graf průměrných tlakových pevností po 7 dnech (modře) a 28 dnech (zeleně) od betonáže. Sedmidenní pevnost měřena na zlomcích trámečků, dvacetiosmidenní pevnost měřena na krychlich o délce hrany 100 mm.

Průměrná tlaková pevnost původní receptury byla 130 MPa, upravená receptura dosahuje s jistotou průměrné pevnosti minimálně 110 MPa. Z grafu prezentovaného na obrázku 11 výše lze vyčíst, že pevnost třetí a čtvrté receptury ve stáří 28 dní je menší, než na mladších vzorcích (7 dní starých). To je způsobeno absencí křemenné moučky, která má rozhodující vliv na vodní součinitel. Krychle byly betonovány až po trámečcích, avšak z jedné namíchané záměsi. Kombinace nerovnoměrnosti zbylého čerstvého betonu a vyššího vodního součinitele sráží právě tuto měsíční pevnost.

## 4 Příprava bednění



Obrázek 12: Zalepené bednění z LTD pro stříkaný beton

Bednění na stříkaný beton bylo vytvořeno z laminovaných desek (LTD). Sestaví se nejdříve kratší části – pro spojení se základní deskou byly použity vruty a následně se přidrží vnější kusy, tím se zajistí minimální mezera mezi dílci. Dále se otvory s hlavami šroubů zalepí páskou. Těsně po betonáži je vhodné je opět odlepit. To se ukázalo jako nejméně pracné. Po povolení vrutů se přes hranu stolu do desky zapruží v obou směrech a tím se „odlepí vzorek“. V žádném případě nelze použít lžíci – tím se zničí vnější hrana vzorku. Po odstranění vybetonovaného vzorku se deska proškrábne lžící a na závěr se navlhčeným hadrem umyje. Nakonec se usuší, zejména u otvorů pro šrouby, kvůli případnému bobtnání dřeva. Forma se složí a je připravena na další betonáž. Obrázek 12 ukazuje formu s vnitřními rozměry 420 x 360 x 18 mm. Z této vybetonované desky se následně nařezou úhlovou bruskou s diamantovým kotoučem vzorky v podobě destiček s rozměry 100 x 360 x 18 mm. Velká rezerva v podélném směru této formy vznikla vyjmutím příčných lišt – forma původně sloužila pro 3 lité destičky shodných rozměrů.

## 5 Příprava textilní výztuže

Textilní betony se vyztužují různými druhy technických textilií.

Vlákno – základní prvek pramene v textilií může být:

- Organické [18]
- Syntetické polymery [18]
  - Aramid
  - Uhlík
  - Akrylát
  - Polyetylen, Polypropylen, Polyvinyl alkohol

Tkanina – plošná textilní struktura vyrobena z vláken. Sestavená může být splétáním, tkaním, pletením, všíváním, plstěním nebo lepením pásy. [18]

Roving (pramenec) – kondenzovaný pramen vláken, který byl zkroucen do spirály. [18]

Pro vyztužení vzorků, byla použita karbonová síť – Carbon 48K (běžný uhlík) bez povrchové úpravy (často bývá síť popískovaná). Výrobce je česká firma Frisiverto s.r.o. Hustota tohoto uhlíku je 1,78 g/cm<sup>3</sup>. Průřez této výztuže je ve slabším směru (podélném) 71 mm<sup>2</sup>. Tahová pevnost je 2531 MPa, z čehož vychází možné zatížení 179,7 kN [20].

Prakticky se jedná o svazky jednotlivých tenkých uhlíkových vláken, fibril. Pro představu jsou tenčí než vlasy. Ty jsou spletené do pramenů. Spojovací nití se obmotá jeden směr pramenů a oky se provlékne kolmo druhý směr pramenů, tak se vytvoří síť – technická textilie, nikoliv tkanina. Pro tuto diplomovou práci byla zvolena oka sítě o velikosti 21 x 21 mm. Neobmotaný směr je nosným směrem, vzorky (v podobě destiček 100 x 360 x 18 mm) byly vyztuženy kolmo k němu s ohledem na následnou mechanickou zatěžovací zkoušku. Po rozbalení je takováto síť poddajná, snadno se zachytává o ostré hrany a rozplétá se – není úplně ideální na manipulaci v betonářské laboratoři UCEEB, kde byl omezený prostor. Pro řezání je vhodné použít nový vylamovací nůž, hodně ostrý. Pracovní stůl v betonářské laboratoři by byl lehce poničen bez použití podložky z OSB desky, která posloužila jako podkladní deska pod síť. K řezání je vhodné použít ještě další dvě prkna – jedno vede nůž a přitlačuje síť z jedné strany řezu a druhé prkno přitlačuje síť na straně druhé. Bez takto opatrného řezání se neprosycená síť velmi snadno bortí a její narovnání je zbytečně pracné a zdouhavé. Pro snazší přípravu vzorků z výše popsaných důvodů byly sítě nařezány na kusy, z nichž byla vybetonovaná jedna větší deska s rozměry 420 x 360 x 18 mm. Z té se poté diamantovým kotoučem na úhlové brusce nařezaly jednotlivé vzorky – celkem 3 destičky s rozměry 100 x 360 x 18 mm. Ty byly po 7 dnech (z časových důvodů) podrobeny zatěžovací zkouškou v tahu za ohybu na lisu se zařízením pro čtyřbodový ohyb dle ČSN [26]. Obrázky 13 a 14 zobrazují poddajné chování neimpregnované karbonové sítě a její následné přezkoušení rozměrů vložením do formy.



Obrázek 13: Poddajná neimpregnovaná karbonová textilie



Obrázek 14: Výztuž záměrně menší než bednění z důvodu zachytávání betonu na okrajích bednění

Karbonová síť se může impregnovat epoxidovou pryskyřicí. Ta zajistí značnou pevnost a spolupůsobení jednotlivých fibril, ale i křehkost, protože uhlík nemá plastickou část pracovního diagramu. Společně s tím se odstraní poddajné chování neimpregnované karbonové textilie. Sítě s impregnací byly použity do několika vzorků pro vzájemné porovnání výsledků.

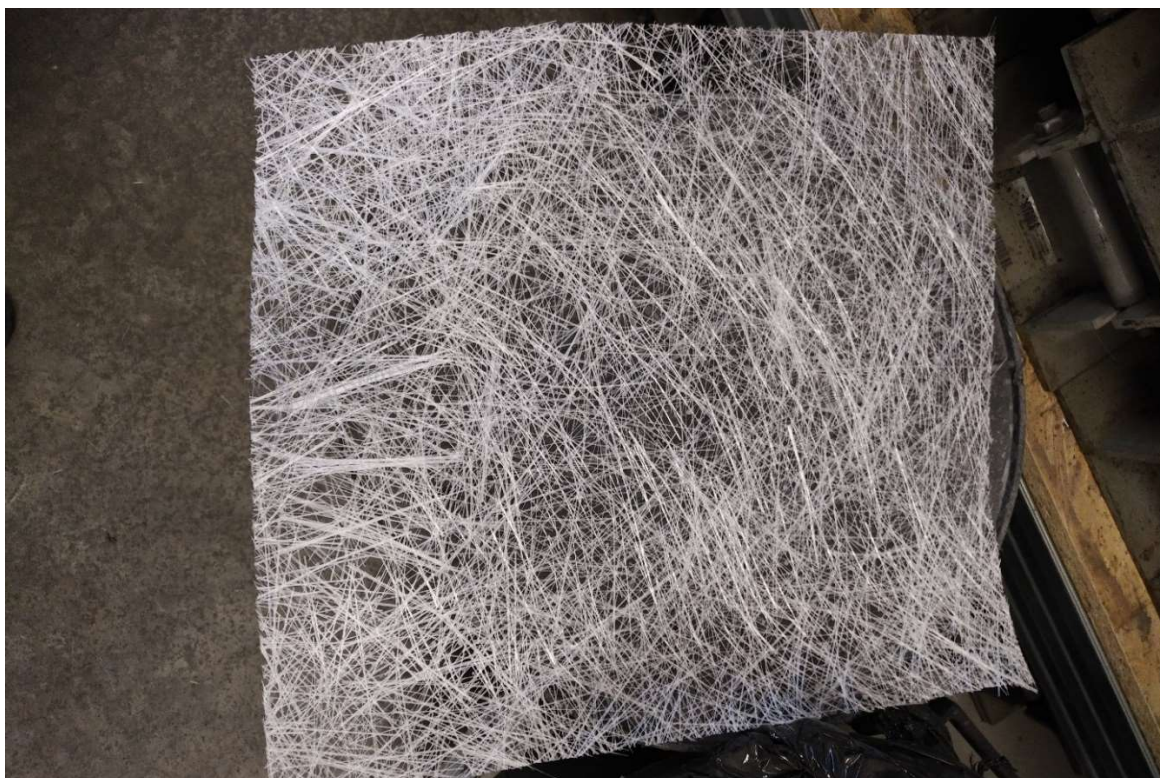


Nasycení sítě jsem prováděl potíráním válečkem, který je namočen v roztoku s epoxidovou pryskyřicí (Sikafloor®-150). Textilie se napřed navleče na vhodný rám, prakticky byl použitý kovový obdélník. Po navlečení se textilie napne a zajistí, například elektrikařskou lepicí páskou či jinou podobnou, případně mechanicky. Poté se namíchá roztok s epoxidovou pryskyřicí v poměru 3:1 (pryskyřice : tužidlo) dle pokynů výrobce v technickém listu [21], váleček se namočí a několik minut se potírá textilie, dokud se pryskyřice nevpije. Lze to poznat pohledem, neboť vznikne lehce sklovitý povrch. Závěrečnou úpravou je pískový posyp, který musí být proveden těsně po nanesení roztoku. Do příštího dne pryskyřice tvrdne, pak už stačí síť odříznout a nechat položenou na rovném podkladu do úplného vytvrdnutí pryskyřice. Za další dva dny pryskyřice vytvrdne a síť je pevná, nebortí se, připravena k betonáži. Plošná hmotnost nasycené textilie dosahuje 295 g/m<sup>2</sup>. Obrázek 15 ukazuje pomocné nástroje pro impregnaci karbonové textilie pryskyřicí.



Obrázek 15: Impregnace karbonové textilie pryskyřicí a popískování

Poslední druh použité výztuže pro porovnání výsledků byla rohož z pramenů skleněných vláken. Vyrábí se ze sekaných alkalivzdorných pramenů, prameny jsou následně slepeny lepidlem [22]. Řezání je obdobné jako u karbonové sítě. Skleněná síť se však nebortí a není třeba přitlačovat obě strany od řezu. Postačí vodící prkno. Příprava této vložky je značně jednodušší a rychlejší. Její tloušťka je v porovnání s karbonovou sítí podstatně menší. Plošná hmotnost dosahuje 120 g/m<sup>2</sup>, což je o něco méně než použitá neimpregnovaná karbonová textilie s plošnou hmotností 255 g/m<sup>2</sup> [22]. Použitá výztužná síť je vyobrazena na obrázku 16.



Obrázek 16: Rohož z pramenů skleněných vláken

## 6 Technologie stříkání

Na řadu přichází samotná betonáž – stříkání betonu. Již v druhé kapitole bylo zmíněno varování při použití vyztužení sítěmi. Při stříkání větší vrstvy skutečně vznikají nežádoucí dutiny. I při stříkání tenké vrstvy betonu bylo obtížné se těmito dutinám vyhnout, zvláště při prvních aplikacích.

### 6.1 Jednotlivé pokusy

První a druhý pokus – receptura PHJ\_11

U prvního stříkání betonu na podklad nebyla dodržena správná vzdálenost pistole. Ta byla příliš blízko bedně, což způsobovalo vyfoukávání už nastříkané vrstvy betonu. Při nastříkané větší vrstvě stékal beton dolů. Z toho vzniklo improvizované otáčení bedně – spodní a horní části. S betonem sjížděla dolů i vyztužná síť. Stříkání probíhalo ve dvou etapách. Síť nebyla dobře probetonovaná, obsahovala velké dutiny v okách. To způsobilo velké póry ve výsledném vzorku. Také bylo zjištěno, že z menšího otvoru lépe stříká stejná konzistence. Tím pádem není třeba „zlepšovat“ konzistenci přidanou vodou. Je nutno zmínit pozůstatek nezhydratované směsi ve spodní části nádoby, kterou samozřejmě nelze použít, a tím zbytečně roste podíl odpadu. K uvedenému jevu dochází při míchání objemu 4,5 l. První sada vzorků je zobrazena na obrázcích 17 a 18.



Obrázek 17: První sada stříkaných vzorků – 3 vzorky vlevo. Napravo od nich se nachází litá varianta z jiné práce



Obrázek 18: Boční pohled na první sadu stříkaných vzorků

Třetí pokus – receptura PHJ\_12 (dále v DP se používá jako jediná)

Při tomto stříkání byl použit nový plastifikátor STACHEMENT 951 (FM). Ten má lepší přídržnost na podkladu. Také byla zvolena správná vzdálenost trysky od povrchu bednění, která činí 30 až 40 cm. Tímto způsobem byly bez problému navrstveny 3 výztužné vložky karbonových sítí z jednoho namíchaného čerstvého betonu. Další vrstva by mohla z důvodu tloušťky sjíždět dolů. Bylo dbáno na navrstvení betonu v okách sítí. To znamená, že celková tloušťka jedné stříkané vrstvy je maximálně o největší zrno kameniva větší, než je tloušťka karbonové sítě. Ve spodní části nádoby zůstává část nepromíseného betonu i přes přestávku a s ručním zásahem v polovině doby míchání. Na vzorcích jsou patrné mezery, kde technická textilie nebyla řádně probetonována – obrázek 19.

Čtvrtý pokus

Zde bylo zjištěno, že postačí míchání menšího objemu na jednu etapu stříkání. Konkrétně 1,9 l případně 2,3 l. Bylo dbáno na dobré promísení směsi ručním zásahem v polovině míchání. Tento objem na stříkání jednotlivých etap postačuje. Navíc se lépe promísí než výše zmíněný větší objem. Při dalších vrstvách (které by beztak sjely dolů) je beton ztuhlý a tryska se začíná ucpávat. V nouzi lze tento stav změnit ještě jedním promícháním v míchačce (asi 2 minuty). V dalších sadách vzorků nebyl tento „trik“ použit.



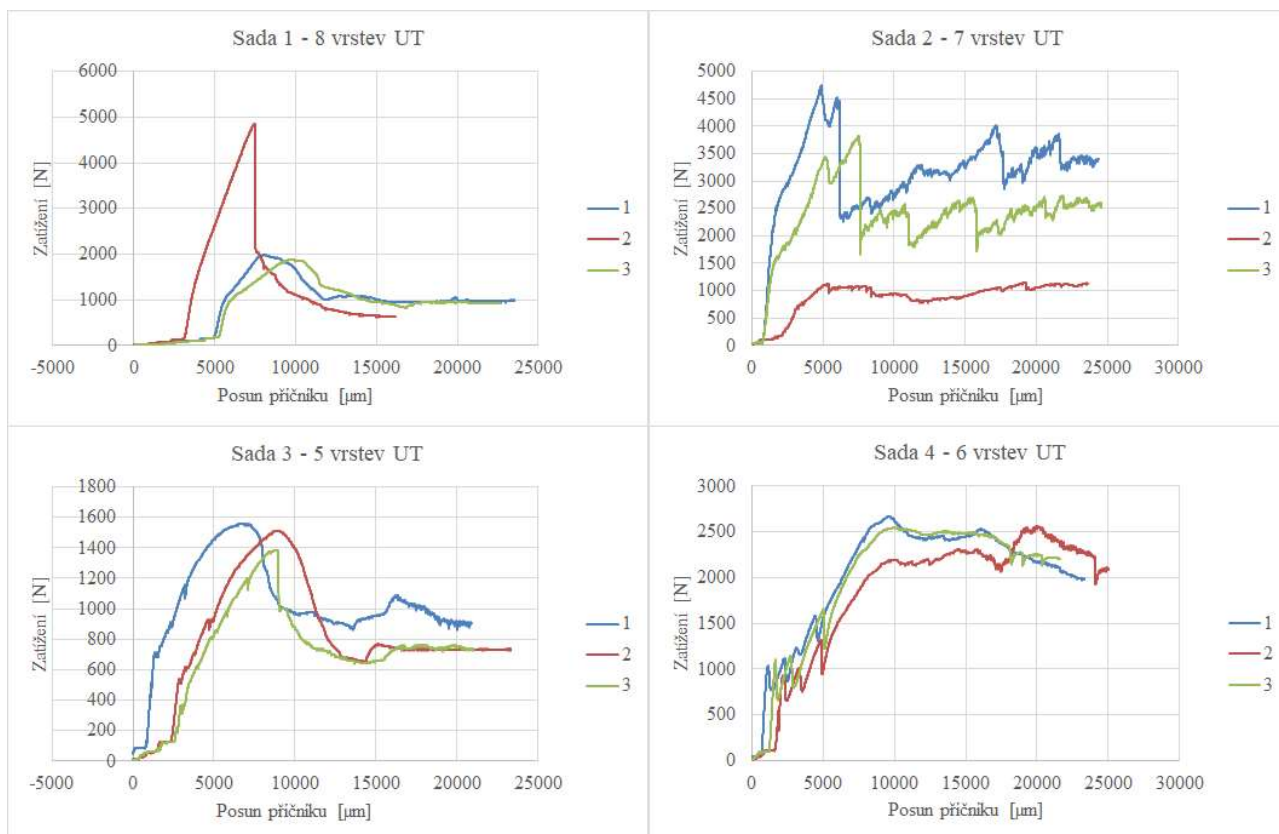
Obrázek 19: Stále značné dutiny ve vzorcích ze třetí sady

#### Pátý pokus – skleněná výztuž

Tentokrát byla jako výztuž použita skleněná vložka, kterou tvoří náhodně rozmístěná skleněná vlákna. Je o poznání tenčí než předtím použitá karbonová síť. Bylo snadné vizuálně poznat, kde chybí vrstva betonu. Nastříkaná vrstva je o poznání tenčí než při použití karbonové sítě, jelikož se skleněná vložka pokryje stříkaným betonem za kratší dobu a na ní se „nalepí“ další vrstva. Snadná proveditelnost první etáže zajistila 7 vrstev těchto sekaných skleněných vláken. Zde se vyplatí použití menších vložek, jelikož na spodní lištu bednění se zachytává nejvíce betonu a vložka uříznutá přesně do bednění přečnává.

### 6.2 *Shrnutí postupu nanášení betonu stříkáním*

Před pokládkou první karbonové sítě se nastříká tenká vrstva o tloušťce přibližně 1,3 mm. Omítkářská pistole je od podkladu vzdálena 30 až 40 cm a míří kolmo k němu. Poté se položí síť a stříká se do té doby, dokud není rovnoměrně pokryta vrstvou betonu. Dbá se na řádné nanesení vrstvy v okách sítě. Případě lze nějakou mezeru probetonovat po přidání jedné další vrstvy sítě, ale ne více. Při jednom stříkání lze nanést 3 vrstvy karbonové sítě a poté nechat zavadnout, aby beton nestékal dolů. Pro skleněné vložky je tento limit navýšen na 6 kusů. To je způsobeno tím, že jednotlivé vrstvy této vložky nemají velké mezery (oka), jak je tomu u předchozí použité výztuže. Takže nastříkaná vrstva betonu je tenčí a stříkání postupuje značně rychleji. Lze také lépe vizuálně kontrolovat rovnoměrnost vrstvy. Úpravou horního povrchu bylo opatrné zahlazení zednickou lžící. Závěrečná úprava stříkáním, jak je tomu v podstatě u všech vzorků této diplomové práce, není příliš rovná a už vůbec ne pohledová. Bednění se vzorkem bylo potaženo plastovou fólií a ponecháno v laboratoři týden do zkoušek.



Obrázek 20: Pracovní diagramy prvních čtyř sad vzorků

Z pracovních diagramů na obrázku 20 je zřejmá nerovnoměrnost výsledků prvních sad vzorků a postupné přibližování jednotlivých vzorků posledních dvou sad. Tyto vzorky sloužily zejména pro zjištění a zaběhnutí technologie stříkání.

### 6.3 Časový rozvrh míchání

- 4 minuty mikrosilika s kamenivem - rozemletí
- 3 minuty míchat po přidání vody (nechat si rezervu na vymytí nádoby plastifikátoru)
  - První minutu po styku vody s cementem přidat 8/10 plastifikátoru
  - Zbytek plastifikátoru se zbytkem vody přidat v rozmezí jedné až dvou minut dalšího míchání (globálně druhou až třetí minutu míchání)
  - Po skončení míchání přichází na řadu ruční zásah - setře se nesmíchaná část ze stěn a ze dna nádoby a umístí se doprostřed
- Míchat další 3 minuty (v této době čerstvý beton ztekutí)
  - Přibližně v první minutě této etapy, celkově ve čtvrté minutě začne směs plastizovat

## 6.4 Spad

Součástí stříkaného betonu je spadáný a odražený beton. Tedy beton, který se ke stříkání použil, ale do vzorku se již nedostal.

Tento spad jsem spočítal u čtvrté sady počátečních vzorků. K vybetonování vzorku o hmotnosti 5,9 kg bylo použito 2 záměsí o celkové hmotnosti 8,6 kg. Jednoduchým výpočtem lze zjistit, že spad zde dosahuje hodnoty 2,7 kg a procentuálně dosahuje 32%.

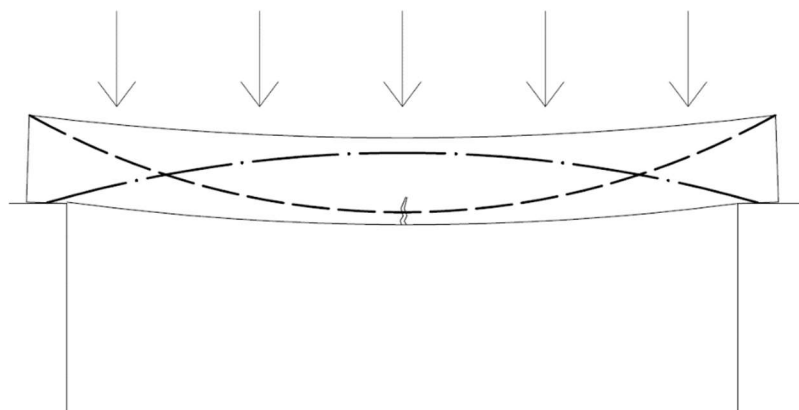
## 7 Teorie ohýbání betonu

V ohýbaném prvku působí při jednom povrchu tlakové a na druhém povrchu tahové napětí. Beton je velmi známý svou odolností vůči tlaku. Běžné konstrukce z betonu jsou schopny odolávat napětí 30 až 40 MPa i více. Tahová pevnost betonu je zpravidla 1/10 tlakové pevnosti. U vysokohodnotných betonů je tento poměr větší, až 1/20. Toto tvrzení podporují výsledky zkoušek (viz třetí kapitola). Obyčejně dochází v ohýbaném betonovém prvku ke křehkému porušení, náhle vznikne trhlina a dochází ke kolapsu konstrukce. Zde je duktilita nejnižší.

To je samozřejmě u staveb nebezpečné, proto se vyztužují. Při vyztužení betonu ocelí se ocel protahuje a v betonové konstrukci vznikají zřetelně viditelné trhliny. Ke kolapsu takto vyztužené konstrukce dochází až po výrazně delší době. Duktilita tohoto prvku je zřetelná.

U karbonové neimpregnované sítě se předpokládá větší možné přetvoření a více trhlin než při použití ocelové výztuže. Očekává se značná duktilita vzorků. Je však zřejmá nižší únosnost takto vyztužených prvků. Proto bylo několik vzorků vyztuženo impregnovanou karbonovou sítí, která je sice pevnější, nicméně je zároveň křehčí. Tím se zajistí vyšší únosnost, bohužel po určitém přetvoření náhle praskne a vzorek nejspíše zkolabuje. Obě sítě mají jasné výhody i nevýhody. Jejich společnou nespornou výhodou oproti ocelové výztuži je minimální krycí vrstva, jelikož uhlík nekoroduje. Záměrem této diplomové práce je pokus o kombinaci a synergii těchto dvou sítí.

Pro zajímavost bylo několik vzorků vyztuženo skleněnou rohoží Cem-MAT®. Od té se očekává křehké chování s nízkou duktilitou, jak je tomu u běžného skla. Tato výztuž se používá ke zlepšení mechanických vlastností tenkovrstvých betonů, především pro tenké podlahy ale i na kuchyňské desky. [22]

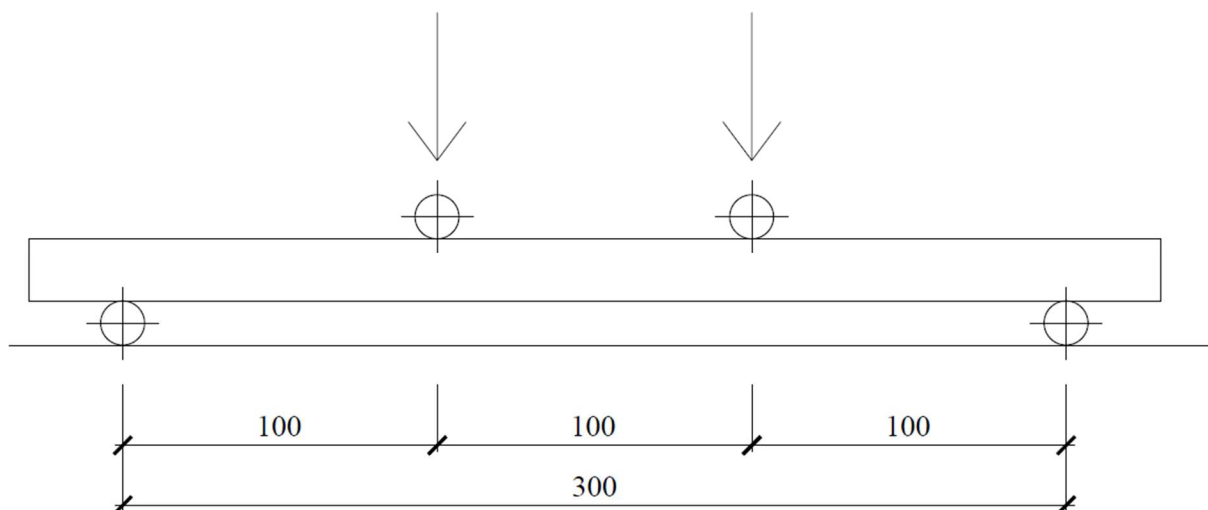


Obrázek 21 ukazuje směr hlavních napětí. Tlakové napětí je zobrazeno čerchovanou čarou a tahové napětí značí čára čárkovaná. V oblasti největšího tahového napětí je znázorněna ohybová trhlina.

Obrázek 21: Schema hlavních napětí obýbaného prvku, čerchované je vyznačen tlak, čárkovaná patří k tahovému napětí

## 8 Zkoušení vzorků

Vybetonované vzorky jsou týden po betonáži zkoušeny čtyřbodovým ohybem na lisu spol. Galbadiny s maximální velikostí zatěžovací síly 100 kN. Tento časový interval byl zvolen kvůli omezenému času na realizaci a sepsání diplomové práce, aby bylo možné odzkoušení určitého množství vzorků, které umožní porovnání. Předtím se musí z vybetonované desky vzorky nejprve nařezat úhlovou bruskou s diamantovým kotoučem na destičky o rozměru 360/100/18. Rozměry vzorků byly rovněž převzaty od vedoucího této diplomové práce, neboť je běžně používá pro výzkum litého betonu originální receptury. Své výzkumy poté publikuje v člancích [27],[28]. Tloušťka těchto vzorků 18 mm je minimální. Z výše popsaných důvodů v předchozí kapitole byla tato tloušťka lehce překročena. Pro řezání byla použita úhlová bruska s diamantovým kotoučem. Následně byly vzorky změřeny a zváženy. Dalším krokem je jejich vložení do lisu a zkouška může začít.

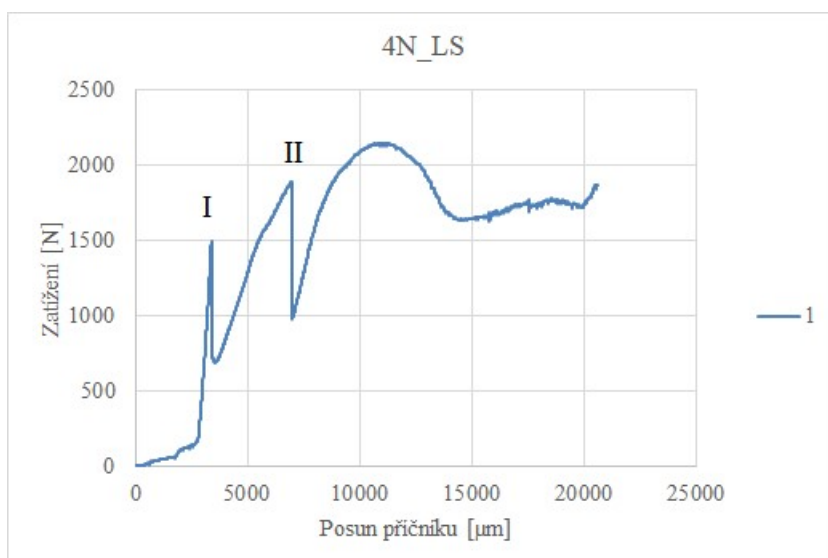


Obrázek 22: Schema sestavy zkoušky čtyřbodovým ohybem

Zatěžování se provádí na lisu, do kterého se vloží zařízení pro čtyřbodový ohyb, náčrt sestavy na obrázku 22, fotografie konkrétní sestavy pro zkoušku na obrázku 23. Celý proces se ovládá přes software na počítači. Měří se zatížení a posun příčnicku stroje, nejedná se o průhyb vzorku. Ukončení zkoušky bylo stanoveno smluveným posunem příčnicku od 20 mm (v grafu 20 000  $\mu\text{m}$ ), kdy už hodnota síly byla vždy minimální.



Obrázek 23: Pohled na zařízení pro zkoušku čtyřbodovým ohybem, zde na konci zkoušky



Obrázek 24: Pracovní diagram vzorku s neimpregnovanou textilií, konkrétní vzorek je na obrázku 25

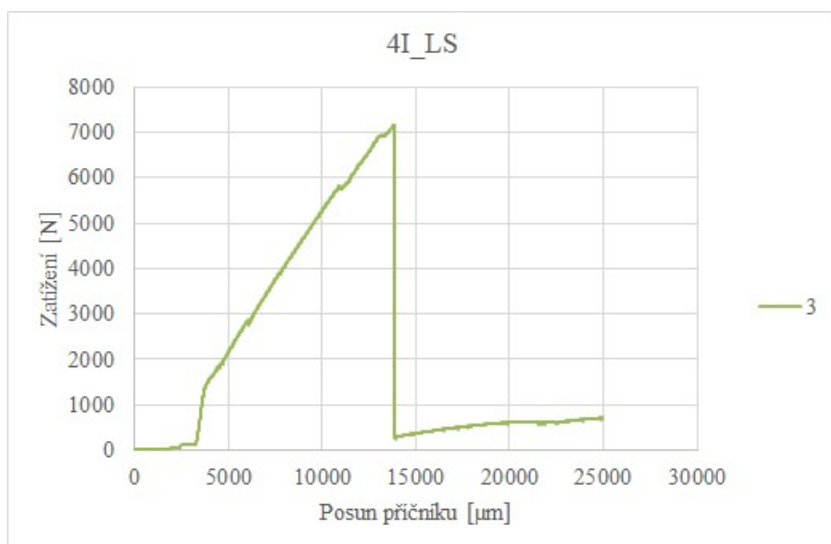
Obrázek 24 ukazuje výstup zatěžovací zkoušky v podobě grafu (pracovní diagram). Zkoušený vzorek se nachází níže na obrázku 25. Oblasti označené římskými čísly označují dvě hlavní trhliny a jejich pořadí. Skoky v zatížení na grafu značí trhliny. Důležitá je rezerva v únosnosti po první trhlíně, což graf značí zvýšeným zatížením před druhou trhlinou. Zajímavý je také růst zatížení po druhé trhlíně, který vidíme na grafu. Poté následuje rozevírání obou trhlin a tvorba dalších, ale značně menších. Tento vzorek se dá označit jako duktilní, nedojde k náhlé ztrátě únosnosti, k náhlému kolapsu.





Obrázek 25: Charakteristické trhliny na vzorku s neimpregnovanou textilií pod zatěžovacími podporami, pracovní diagram tohoto vzorku je na obrázku 24

Z obrázku 25 výše vidíme první trhlínu (ohybová v kombinaci se smykovou silou), který se nalézá v pravé části pod zatěžovacím břemenem. Druhá trhlína vznikla pod dalším břemenem. Výše zobrazený vzorek je vyztužen neimpregnovanou karbonovou sítí (4 vrstvy). Ta způsobuje, že i přes značně rozevřené trhliny je destička schopna přenášet zatížení, jak lze vidět v konečné části grafu.



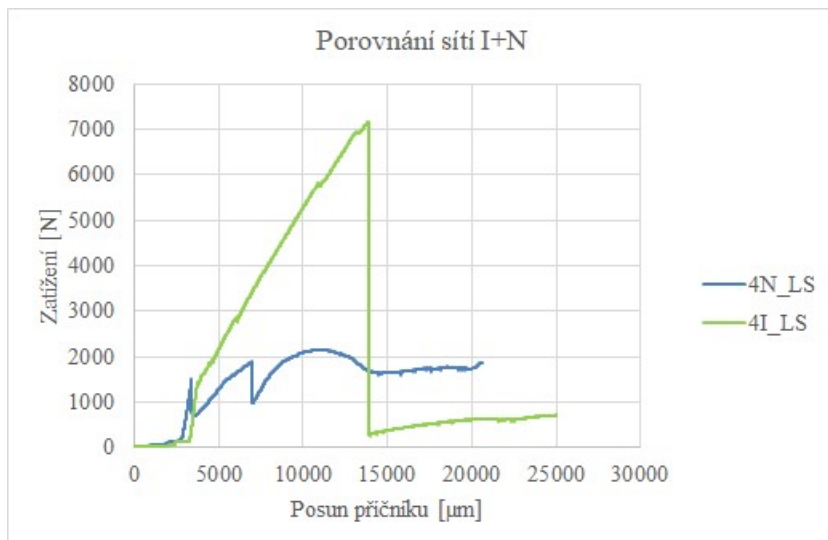
Obrázek 26: Pracovní diagram vzorku s impregnovanou textilií, konkrétní vzorek je na obrázku 27

Obrázek 26 ukazuje další příklad grafu vzorku vyztuženého impregnovanou textilií, který se nachází na obrázku 27. Zde vidíme jednu masivně rozevřenou trhlínu, která vede ke kolapsu, až po značném zatížení vzorku. Ten samozřejmě následoval až po vzniku mikrotrhlin, které se nepatrně rozevírali až do vyčerpání tahové únosnosti výztuže.

Kolaps nastal náhle, což není u betonových konstrukcí žádoucí. Duktilita zde prakticky není. Tento vzorek byl vyztužen 4 vrstvami impregnované karbonové sítě. Na obrázku 27 níže vidíme rázové porušení vzorku v jeho polovině, které je slyšet i v sousedních místnostech. Tato trhlina je převážně způsobená ohybem.



Obrázek 27: Značná trhlina vzorku s impregnovanou textilií, pracovní diagram tohoto vzorku je na obrázku 26



Obrázek 28: Porovnání pracovních diagramů obou vzorků

Můžeme zde rovnou porovnat (z obrázku 28) postupné porušení vzorku vyztuženého neimpregnovanou karbonovou sítí s náhlým porušením vzorku vyztuženého impregnovanou karbonovou sítí. Předpoklad předchozí kapitoly byl naplněn. Vzorek s neimpregnovanou sítí má po první trhlině (viditelném porušení) vyšší únosnost, tento vzorek nazýváme duktilní.

Impregnovaná síť má po vzniku masivně rozevřené trhliny výrazně nižší únosnost, ale před touto trhlinou je únosnost minimálně třikrát vyšší, nicméně porušení je náhlé a tento vzorek duktilní není.

## 9 Výsledné vzorky

Cílem této práce je porovnání impregnované a neimpregnované karbonové sítě jako použité výztuže se zaměřením na duktilitu, případně jejich vzájemné kombinace. Pro porovnání byl zvolen počet 2 nebo 4 vložek v každém vzorku. Oproti šesté kapitole (kde byla zkoušena technologie a maximální vyztužení) je tento počet výztužných vložek redukován kvůli ekonomičnosti vzorků. Tím vzniká v jádru vzorku silná vrstva betonu. Proto jsem se rozhodl o efektivnější vylití této vrstvy namísto stříkání. Současně se porovnají vzorky s technologickým postupem lití a kombinací lití a stříkání. Neimpregnovaná karbonová textilie snadno ztrácí svůj tvar. Proto nelze síť umístit do bedně a poté zalít čerstvým betonem. Vznikne nestejná poloha sítě od povrchu vzorku. Konzistence použitého betonu nelze rovnoměrně ani rozlít do spodní části bedně, což způsobuje nestejnou tloušťku první vrstvy při lití. S obtížemi lze litím vybetonovat první vrstvu a poté do ní vtlačit impregnovanou karbonovou výztuž.

Stříkání čerstvého betonu zajišťuje rovnoměrnou a velmi malou tloušťku první vrstvy, která postačuje pro účinné spolupůsobení betonu s technickou textilií.



Obrázek 29: Vzorky po skončení betonáže

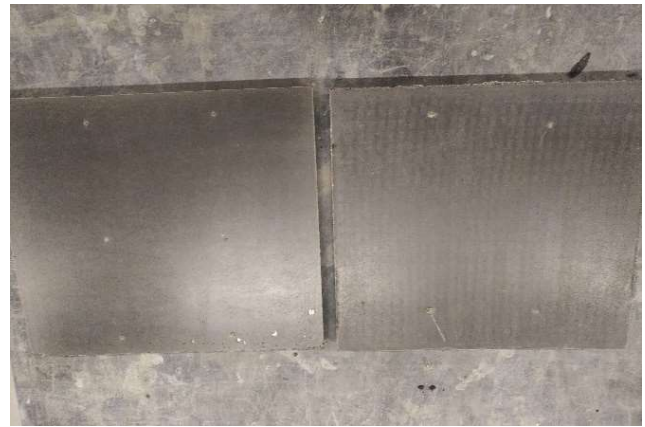
Postup betonáže těchto vzorků znamená nastříkání první tenké vrstvy, pokládka jedné či dvou vrstev (současně se dbá na probetonování) a následné vylití jádra. Vrchní vrstvy nemohou být nastříkány, jelikož při této tloušťce betonu nelze formu natočit do svislé polohy (vrstva sjíždí) dolů. Proto jsou poslední výztužné sítě vtlačeny do nalitého betonu. Horní povrch se následně zahradí zednickou lžící.

Stržení latí použito nebylo, neboť se neimpregnovaná síť drží betonu a tím se bortí. O poznání lepší povrchovou úpravu mají vzorky s impregnovanou sítí, zde její pevný tvar napomáhal úpravě. Dbá se samozřejmě o co nejtěsnější vrchní vrstvu. Obrázek 29 ukazuje vzorky těsně po dokončení betonáže. Nelze to však porovnat s první nastříkanou vrstvou co se tloušťky a pohledovosti povrchu betonu po odformování týče.

Úplně poslední dvě navržené sady vzorků byly vybetonovány s maximálním možným vyztužením, formou stříkání. Vždy po 2 etapách. U skleněných vložek bylo použito 16 vrstev. Karbonových neimpregnovaných sítí je ve vzorku obsaženo 7 vrstev. Impregnované sítě pro maximální vyztužení použity nebyly, nicméně odhadem může být tento počet 5 nebo 6 vrstev. To je způsobeno větší tloušťkou popískováním a také neohebností. Z výsledků jednotlivých vzorků je zřejmá rovnoměrnost. Tu způsobila již získaná zkušenost s technologií. Obrázky 30 až 32 ukazují vzorky po odbednění, od úplně prvních vzorků se na první pohled výrazně liší. Schema vyztužení vzorků, které byly vybetonovány a jejich chování je popsáno v následující kapitole, zobrazuje obrázek 33.



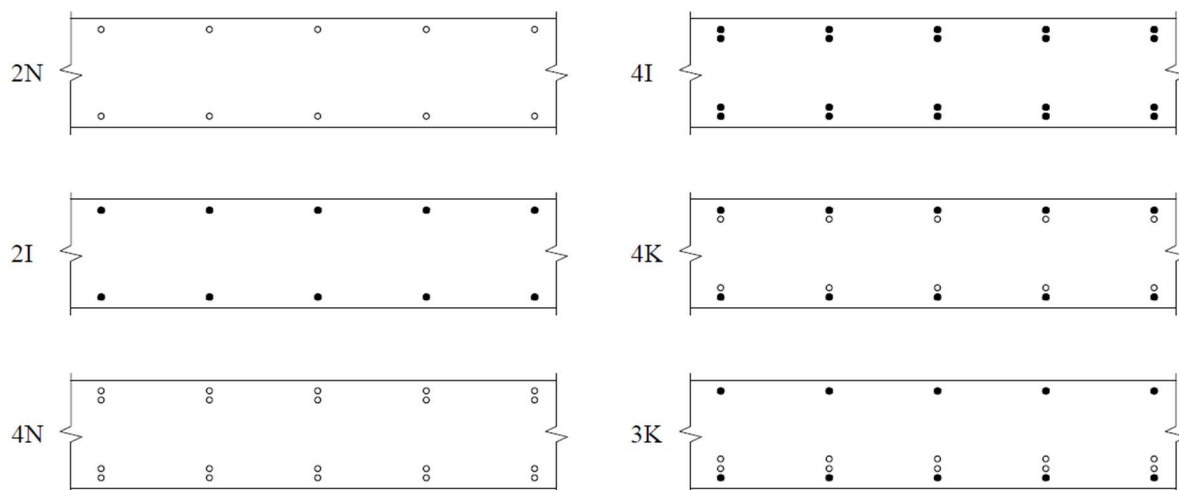
Obrázek 30: Vrchní vrstva vzorků – od nástřikové strany



Obrázek 31: Spodní strana vzorků (od bednění)

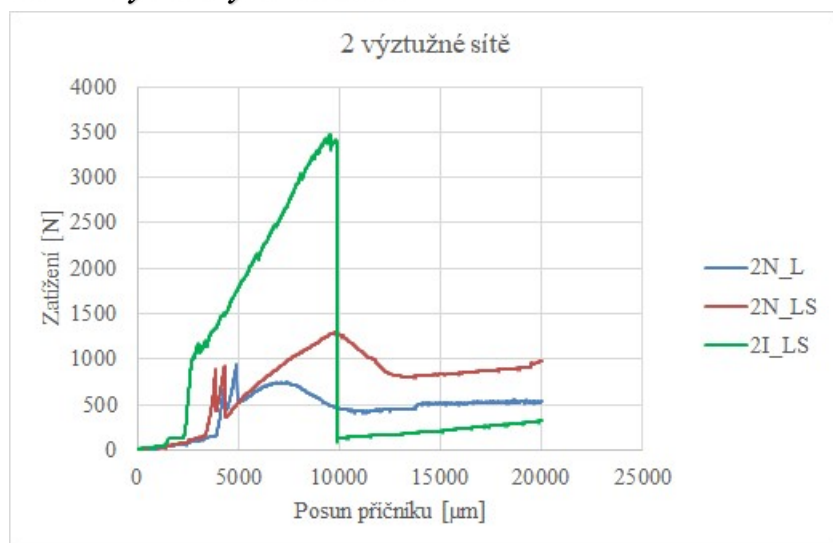


Obrázek 32: Detail stran vzorků po odformování



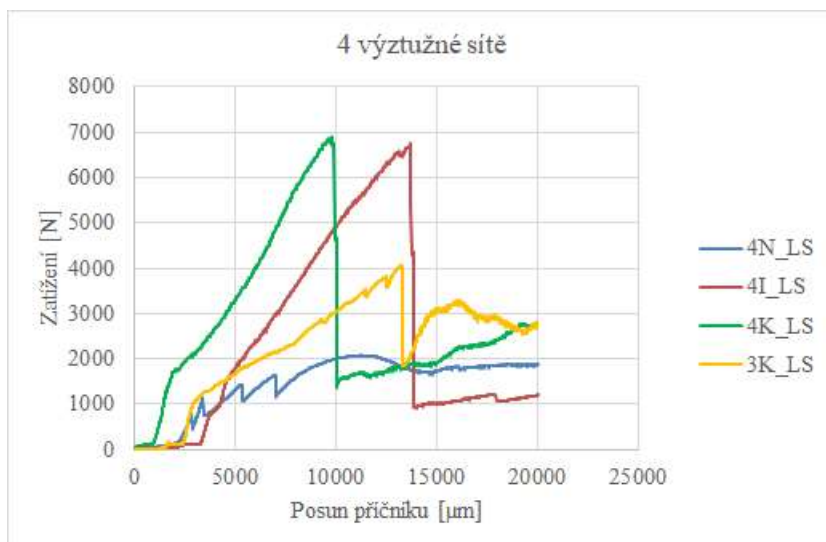
Obrázek 33: Schema vyztužení jednotlivých vzorků (impregnovaná tkanina značena černým plným kolečkem)

## 10 Výsledky a diskuse



Obrázek 34: Pracovní diagramy vzorků s neimpregnovanou textilií

Jako první porovnáme sady vzorků (z obrázku 34), vyztužené pouze dvěma sítěmi. Kombinace stříkání a lití (2N\_LS – červený) má nespornou výhodu jak v provádění, tak v duktilitě, jak je možno vidět na grafu. Samozřejmě se porovnává pouze neimpregnovaná karbonová výztuž. Nižší únosnost litého vzorku (2N\_L – modrý) je způsobená tím, že nelze vyložit neimpregnovanou síť a poté zalít betonem. Síť se zborší a vzdálenost od hrany bednění je nerovnoměrná. Proto by se tato neimpregnovaná karbonová síť neměla kombinovat s litým betonem. Impregnovaná karbonová výztuž (2I\_LS – zelený) prokazatelně zvyšuje únosnost, nicméně zatížení po první trhlině rapidně klesá (jak se předpokládalo) a vzorek má výrazně nižší duktilitu.



Obrázek 35: Pracovní diagramy vzorků s impregnovanou textilií

V obrázku 35 výše jsou pracovní diagramy vzorku vyztužené čtyřmi vrstvami technických textilií. Je prvním pohledem patrný rozdíl mezi impregnovanou (4I\_LS – červený) a neimpregnovanou (4N\_LS – modrý) karbonovou tkaninou. Opakuje se totéž, co na předchozím grafu, vysoká únosnost impregnované tkaniny a vyšší duktilita u neimpregnované tkaniny. Kombinace těchto dvou sítí (vzorek 4K\_LS – zelený) umožnila získat jak vysokou pevnost, tak duktilitu po otevření trhlin. Rezerva zatížení po první trhlině je o něco vyšší než u vzorků s neimpregnovanou karbonovou sítí. Neimpregnovaná karbonová síť zde zachytává rázové porušení způsobené ohybem v kombinaci se smykovou silou. Tím byla prokázána možnost spolupůsobení těchto karbonových sítí. Obrázek 36 níže zobrazuje vzorky sady 4K\_LS po ukončení zkoušky.



Obrázek 36: Zřetelná trhlina způsobená ohybem v kombinaci se smykovou silou (vzorky 4K\_LS)

Z vlastní iniciativy, a díky volné formě, byl vybetonován vzorek navíc (3K\_LS), který lépe situoval neimpregnovanou karbonovou síť oproti vzorkům dříve konzultovaným s vedoucím práce. Ta měla zachytit značný pokles zatížení, v kombinaci ohybu a smykové síly, které je viditelné u výše zmíněných zelených a žlutých čar. Pokles je skutečně menší, ovšem za cenu téměř poloviční únosnosti do první trhliny. Toto vyztužení se překvapivě projevilo jako nevhodné. Na obrázcích 37 a 38 jsou pohledy této sady vzorků po ukončení zkoušky.

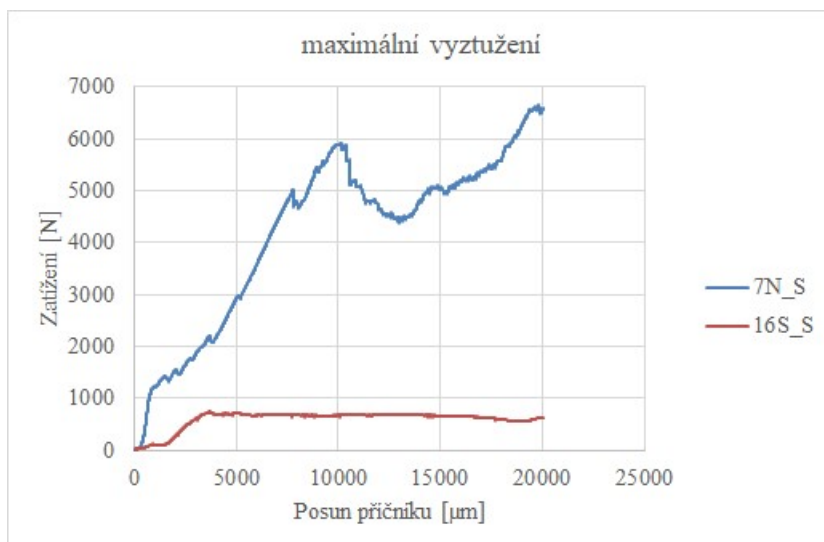


Obrázek 37: Pohled na trhliny vzorků 3K\_LS



Obrázek 38: Boční pohled na vzorky 3K\_LS

Zajímavý byl pokus o maximální vyztužení vzorků neimpregnovanou karbonovou sítí a sekanými skleněnými vlákny. Maximální hodnota výztužných vrstev dosahovala 7 pro neimpregnované vrstvy karbonových textilií a 16 sekaných skleněných rohoží.



Obrázek 39: Pracovní diagramy maximálně vyztužených vzorků

Z grafů na obrázku 39 lze hůře vyčíst trhliny, protože velké množství výztuže se ihned aktivuje a skoky nejsou jako v předchozích případech tak výrazné. Neimpregnovaná karbonová síť se v maximální hodnotě zatížení blíží impregnované variantě. Tento vzorek je ideálním příkladem mnohokrát zmiňovaného duktilního chování. Skleněná výztuž také dobře spolupůsobí, nicméně přenášené zatížení je znatelně menší. Tyto 2 sady vzorků po provedení zkoušky jsou zobrazeny na obrázcích 40 a 41.



*Obrázek 40: Boční pohled na maximálně vyztužený vzorek 7N\_S*



*Obrázek 41: Boční pohled na plně vyztužený vzorek 16S\_S*



Celkový přehled všech vybetonovaných a odzkoušených vzorků v podobě tenkých destiček je shrnuto v tabulce 6. S ohledem na šířku jednotlivých sloupců byl zkrácen popis jednotlivých výztužných vložek.

TT technická textilie

I impregnovaná epoxidovou pryskyřicí

N neimpregnovaná

SR skleněná rohož

Označení	Druh výztuže	Počet vložek [ks]	Plošná hmotnost výztuže [g/m <sup>2</sup> ]	Průměrná síla před první trhlinou [kN]	Průměrná zbytková únosnost [kN]
Sada 1	N TT	8	2040	2,0	1,0
Sada 2	N TT	7	1785	3,2	2,5
Sada 3	N TT	5	1275	1,4	0,8
Sada 4	N TT	6	1530	1,0	2,2
Sada 5	SR	17	2040	0,15	0,6
2N L	N TT	2	510	0,9	0,5
2N LS	N TT	2	510	0,9	0,9
2I LS	I TT	2	590	3,4	0,3
4N LS	N TT	4	1180	1,2	1,8
4I LS	I TT	4	1180	6,8	1,0
4K LS	I+N TT	2+2	1100	6,9	2,0
3K LS	I+N TT	2+2	1100	4,0	1,8
7N S	N TT	7	1785	5,0	3,0
16SK S	SR	16	1920	0,8	0,6

Tabulka 6: Přehled sad vzorků

## 11 Přibližná cena stříkaného textilního betonu

Cena textilního stříkaného betonu, který byl použitý v této diplomové práci, může být spočítána jen přibližně. Pro malý betonovaný vzorek nelze zahrnout cenu práce operátora trysky, odpisy bednění a stříkací pistole. K vybetonování této jedné desky o rozměrech 420 x 360 x 18 mm bylo zapotřebí namíchat 2 záměsi o objemu 2,25 l a 1,9 l. Jedná se o cenu 1 m<sup>2</sup> desky o tloušťce 18 mm. Rozpis cen jednotlivých složek je v následující tabulce s číslem 7.

Složka	Hmotnost [kg]	Cena složky [Kč/kg]	Cena [Kč]
Cement CEM I 42,5R	2,805	22,000	61,71
Technický písek ST 01/06	2,380	1,395	3,32
Technický písek ST 06/12	1,585	2,136	3,39
Microsilica basf 940 U-S	0,722	33,700	24,33
Mikromletá křemenná moučka ST 6	1,008	4,498	4,53
Superplastifikátor na bázi PCE	0,119	50,000	5,95
Voda	0,742	0,075	0,06
Suma	9,361	-	103
<hr/>			
Položka	Cena [Kč/m <sup>2</sup> ]		
Stříkaný beton	683		
Výztužná vložka	174		

Tabulka 7: Výpočet ceny jednoho m<sup>2</sup> stříkaného betonu o tloušťce 18 mm

Z tabulky výše můžeme odečíst cenu jednoho m<sup>2</sup> desky o tloušťce 18 mm: Při vyztužení 2 vložkami karbonové technické textilie vychází jeden m<sup>2</sup> na 1030 Kč, dvojnásobné vyztužení poté stojí 1380 Kč.

## 12 Závěr

K vlastnímu postupu při optimalizaci receptury pro stříkání lze uvést tolik, že použití trychtýře k měření množství protečeného betonu za určitý časový úsek napomohlo k určení úpravy původní receptury. Dalším zjištěným faktorem, je že při stříkání betonu vzniká velký odpad, rozmístěný cca do vzdálenosti 1,5 m kolem stříkacího zařízení, způsobený zejména odrazem od podkladu. Pro tuto práci byla použita omítkářská pistole, která umožňuje nástřik tenkých vrstev, přičemž použití menšího stříkacího otvoru zlepšuje práci se stejnou konzistencí betonu, není nutné čerstvý beton „ztekucovat“ zvýšením vodního součinitele ani přidávat plastifikátor. Jemně mletá křemenná moučka výrazně sráží konzistenci. Zároveň vynecháním jemně mletých částí se snižuje tlaková pevnost zralého betonu (mikrosilika i křemenná moučka). Mikrosilika výrazně zabraňuje segregaci. Jiný typ plastifikátoru, který lépe funguje s daným cementem, měl na stříkání betonu pozitivní vliv. Těmito poznatky bylo umožněno pokračovat v práci a vybetonovat vzorky, v podobě destiček, stříkáním na svislé bednění.

Pečlivým nástřikem první vrstvy vznikla téměř pohledová strana. Neimpregnovanou tkaninu nelze umístit do bednění a následně zalít betonem. Síť se v takovém případě snadno zkroutí, což způsobí nestejnou výšku od hrany bednění. Nevhodnost lití dokazuje nižší únosnost destiček na pracovních diagramech. Řádným nástřikáním betonu do ok sít při současném kontrolování množství betonu na síti, lze betonovat tenké vrstvy a pokládat výztuž.

Neimpregnovaná karbonová textilie zabraňuje přelomení vzorku. Dochází k postupnému protahování a přetrhávání jednotlivých vláken. Během žádné zkoušky nedošlo k přetržení všech pramenů. Bohužel zatížení na pracovním diagramu nedosahuje tak zajímavé hodnoty. S impregnovanou textilií je chování o poznání jiné. Vzorek bez velké široké trhliny odolává velkému zatížení, nicméně po určité době nastane rázové porušení náhlým přetržením výztuže a jedna z menších trhlin se výrazně otevře. Zatížení, které je poté přenášeno takto porušeným vzorkem, nedosahuje ani takových hodnot, jako u neimpregnované tkaniny. Výhodné je tedy kombinované symetrické vyztužení obou těchto variant tkanin. A sice impregnovanou tkaninu umístit co nejbližší povrchu s ohledem na maximální únosnost, maximální rameno sil. Na ni poté z vnitřní strany vzorku přiložit neimpregnovanou tkaninu, případně více vrstev. Chování destiček je výrazně lepší než u samostatně vyztužených variant s ohledem na duktilitu. Nejenže se dosáhne lehce vyššího zatížení před poškozením vzorku, ale zároveň po první trhlíně je destička schopna přenášet větší zatížení, než jaké přenáší tkanina pouze neimpregnovaná. Tím se dokázala synergie těchto dvou textilií.

Sekaná skleněná výztuž, ač se dobře zpracovává, nemá v porovnání s uhlíkem takovou pevnost, i když ukazuje duktilní trend chování. Nutno dodat, že pro všechny vzorky vyztužené skleněnou rohoží bylo použito většího množství vrstev.

Maximálně vyztužené vzorky neimpregnovanou karbonovou textilií dosáhly na pracovním diagramu vysokých hodnot zatížení, jsou však neekonomické.

Tato práce může sloužit jako podklad pro možné kombinované vyztužování betonů karbonovými textiliemi s epoxidovou impregnací a bez impregnace. Vzorky vysokohodnotného betonu vyztužené technickou textilií mohou být subtilní a zároveň velmi odolné. Jako další pokračování v technologii vyztužování technickými textiliemi může být velmi zajímavá i kombinace s klasickou ocelí, kde duktilní neimpregnovaná tkanina může zvýšit rezervu v zatížení konstrukce a tím oddálit porušení, např. při mimořádném zatížení. Autor této diplomové práce věří v pokračování a zdokonalení této technologie dalšími pracovníky ve vývoji betonů vyztužených technickými textiliemi.

## Použitá literatura

- [1] Joseph Monier: French inventor. *Britannica* [online]. London, Mill Street: Encyclopædia Britannica, 2020 [cit. 2020-12-13]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/biography/Joseph-Monier>
- [2] Beton - historie. Jakub Hubený [online]. 2019 [cit. 2020-12-19]. Dostupné z: <http://jakubhubeny.bluefile.cz/beton-historie/>
- [3] MIKULICA, Karel. Technologie výroby cementových pěnobetonů a jejich vlastnosti. Brno, 2013. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců.
- [4] CECH, Brigitte. Technika v antice. Praha: Grada, 2013. ISBN 978-80-247-3786-7.
- [5] Pantheon - HISTORY. History.com [online]. A&E Television Networks, 2020 [cit. 2020-12-19]. Dostupné z: <https://www.history.com/topics/ancient-greece/pantheon>
- [6] Křišťálový palác. Wikipedie [online]. 2020 [cit. 2020-12-19]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/K%C5%99i%C5%A1%C5%A5%C3%A1lov%C3%BD\\_pal%C3%A1c](https://cs.wikipedia.org/wiki/K%C5%99i%C5%A1%C5%A5%C3%A1lov%C3%BD_pal%C3%A1c)
- [7] BEZDĚK, Jaroslav a ARBES, Josef. Vliv popílku na kvalitu betonové směsi a betonu a úspory cementu. Praha: Výzkumný a vývojový ústav Stavebních závodů, 1977.
- [8] MORAVEC, Tomáš. Z historie používání elektrárenského popílku jako přímеси do betonu v České republice. Praha, 2013.
- [9] KRÍŽOVÁ, Katarína. Betonové konstrukce I: pro SPŠ a SOU stavební. Praha: Sobotáles, 2010. ISBN 978-80-86817-39-2.
- [10] PYTLÍK, Petr. Technologie betonu. 2. vyd. Brno: VUTIUM, 2000. Učebnice (VUTIUM). ISBN 80-214-1647-5.
- [11] COLLEPARDI, Mario. Moderní beton. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009. Betonové stavitelství. ISBN 978-80-87093-75-7.
- [12] AÏTCIN, Pierre-Claude. Vysokohodnotný beton. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) a Českou
- [13] DE SCHUTTER, Geert. Samozhutnitelný beton. Praha: ČBS, Česká betonářská společnost ČSSI, 2008. ISBN 978-80-87158-12-8.
- [14] HILAR, Matouš. *Stríkaný beton v podzemním stavitelství*. Praha: Český tunelářský komitét ITA-AITES, 2008. Dokumenty českého tunelářského komitétu ITA-AITES. ISBN 978-80-254-1262-6.
- [15] NOVÁK, Jaroslav a Jiří KOLÍSKO. Speciální betony. Praha: Svaz výrobců betonu ČR, 2001. ISBN 80-238-2678-6.

- [16] LAIBLOVÁ, Ing. Lenka, Ing. Tomáš VLACH a Ing. Jakub ŘEPKA. Co je to textilní beton (TRC). *Tzbinfo* [online]. Praha: Univerzitní centrum energeticky efektivních budov [cit. 2020-12-13]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/18732-co-je-to-textilni-beton-trc>
- [17] ŽALSKÝ, Jiří, Tomáš VLACH, Lenka LAIBLOVÁ, Zuzana JIRKALOVÁ, Jakub ŘEPKA a Petr HÁJEK. Numerical Analysis of Rigid Frame Joint with Textile Carbon Reinforcement. *Solid State Phenomena*. 2019, (292), 159-163. ISSN 1662-9779. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.292.159>
- [18] ALDEA, Corina, Thomas GRIES, Wolfgang BRAMESHUBER, Alva PELED, Manfred CURBACH a Christian MEYER. *TC 201-TRC (Textile Reinforced Concrete): 2 DEFINITIONS, 3 TEXTILES, 4 CONCRETE/MATRIX*. Aachen, 2018.
- [19] ČSN EN 206+A1. *Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. (732403). Brusel: Evropský výbor pro normalizaci, 2016.
- [20] *Karbonové výztuže* [online]. Libavské Údolí: Frisiverto, 2020 [cit. 2020-12-13]. Dostupné z: <https://www.frisiverto.cz/nas-produkt.php>
- [21] Sikafloor®-150. Sika CZ [online]. Brno [cit. 2020-12-19]. Dostupné z: <https://cze.sika.com/cs/produkty-pro-stavebnictvi/podlahy/penetrace/sikafloor-150.html>
- [22] *Rohož Cem-MAT®* [online]. Ostrava: Sklocement Beneš, 2020 [cit. 2020-12-30]. Dostupné z: <http://sklocement.cz/sklenena-vlakna-cem-fil/cem-mat/>
- [23] ŽALSKÝ, Bc. Jiří. Rámový roh z textilního betonu. Praha, 2020. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební. Vedoucí práce Ing. Tomáš Vlach.
- [24] Pistole na omítky. Storch [online]. Pelhřimov [cit. 2020-12-19]. Dostupné z: <http://www.storch.cz/nase-vyrobky/omitaci-technika/pistole-na-omitky/?hasFlash=true&>
- [25] ČSN EN 12390-3 (731302). Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles. Brusel: Evropský výbor pro normalizaci, 2020.
- [26] ČSN EN 12390-5 (731302). Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles. Brusel: Evropský výbor pro normalizaci, 2020.
- [27] Vlach, T., Chira, A., Laiblová, L., Fiala, C., Novotná, M., Hájek, P., 2015. Numerical Simulation of Cohesion Influence of Textile Reinforcement on Bending Performance of Plates Prepared from High Performance Concrete (HPC). *AMR* 1106, 69–72. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.1106.69>
- [28] Vlach, T., Laiblová, L., Ženíšek, M., Řepka, J., Hájek, P., 2018. Soft Insert for Support Modeling of Slightly Textile Reinforced Concrete. *KEM* 760, 158–163. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.760.158>

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Karbonová síť (bez prosycení) pro vyztužení betonu, plošná hmotnost 255 g/m <sup>2</sup>	9
Obrázek 2: Použitá pistole na omítky firmy Storch [24]	10
Obrázek 3: Zkouška tekutosti	14
Obrázek 4: První čtyři sady vzorků	15
Obrázek 5: Pohled na další dvě sady vzorků	16
Obrázek 6: Póry v trámečcích pro zkoušku ohybem způsobené změnou konzistence pro stříkaný beton, vzorky PHJ_11	17
Obrázek 7: Zmenšení pórovitosti vzorků změnou plastifikátoru u poslední varianty receptury, vzorky PHJ_12	17
Obrázek 8: Pohled na zkušební bednění	19
Obrázek 9: Profil zkušebního bednění	19
Obrázek 10: Graf pevností v tahu za ohybu po 7 dnech od betonáže na trámečcích 40 x 40 x 160 mm	20
Obrázek 11: Graf průměrných tlakových pevností po 7 dnech (modře) a 28 dnech (zeleně) od betonáže. Sedmidenní pevnost měřena na zlomcích trámečků, dvacetiosmidenní pevnost měřena na krychlích o délce hrany 100 mm	21
Obrázek 12: Zalepené bednění z LTD pro stříkaný beton	22
Obrázek 13: Poddajná neimpregnovaná karbonová textilie	23
Obrázek 14: Výztuž záměrně menší než bednění z důvodu zachytávání betonu na okrajích bednění	23
Obrázek 15: Impregnace karbonové textilie pryskyřicí a popískování	24
Obrázek 16: Rohož z pramenů skleněných vláken	25
Obrázek 17: První sada stříkaných vzorků – 3 vzorky vlevo. Napravo od nich se nachází litá varianta z jiné práce	26
Obrázek 18: Boční pohled na první sadu stříkaných vzorků	26
Obrázek 19: Stále značné dutiny ve vzorcích ze třetí sady	27
Obrázek 20: Pracovní diagramy prvních čtyř sad vzorků	28
Obrázek 21: Schema hlavních napětí obyčejného prvku, čerchovaně je vyznačen tlak, čárkovaná patří k tahovému napětí	29
Obrázek 22: Schema sestavy zkoušky čtyřbodovým ohybem	30
Obrázek 23: Pohled na zařízení pro zkoušku čtyřbodovým ohybem, zde na konci zkoušky	31
Obrázek 24: Pracovní diagram vzorku s neimpregnovanou textilií, konkrétní vzorek je na obrázku 25	31
Obrázek 25: Charakteristické trhliny na vzorku s neimpregnovanou textilií pod zatěžovacími podporami, pracovní diagram tohoto vzorku je na obrázku 24	32
Obrázek 26: Pracovní diagram vzorku s impregnovanou textilií, konkrétní vzorek je na obrázku 27	32
Obrázek 27: Značná trhlina vzorku s impregnovanou textilií, pracovní diagram tohoto vzorku je na obrázku 26	33
Obrázek 28: Porovnání pracovních diagramů obou vzorků	33
Obrázek 29: Vzorky po skončení betonáže	34
Obrázek 30: Vrchní vrstva vzorků – od nástřikové strany	35
Obrázek 31: Spodní strana vzorků (od bednění)	35
Obrázek 32: Detail stran vzorků po odformování	35

Obrázek 33: Schema vyztužení jednotlivých vzorků (impregnovaná tkanina značena černým plným kolečkem).....	36
Obrázek 34: Pracovní diagramy vzorků s neimpregnovanou textilií.....	36
Obrázek 35: Pracovní diagramy vzorků s impregnovanou textilií.....	37
Obrázek 36: Zřetelná trhлина způsobená ohybem v kombinaci se smykovou silou (vzorky 4K_LS).....	37
Obrázek 37: Pohled na trhliny vzorků 3K_LS.....	38
Obrázek 38: Boční pohled na vzorky 3K_LS.....	38
Obrázek 39: Pracovní diagramy maximálně vyztužených vzorků.....	38
Obrázek 40: Boční pohled na maximálně vyztužený vzorek 7N_S.....	39
Obrázek 41: Boční pohled na plně vyztužený vzorek 16S_S.....	39

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Původní receptura.....	14
Tabulka 2: Tabulka tekutosti.....	18
Tabulka 3: Hmotnost jednotlivých složek v kg pro záměs o velikost 4,5 L u dílčích receptur.....	18
Tabulka 4: Upravená receptura.....	20
Tabulka 5: Pevnosti vzorků zkušebních receptur.....	20
Tabulka 6: Přehled sad vzorků.....	40
Tabulka 7: Výpočet ceny jednoho m <sup>2</sup> stříkaného betonu o tloušťce 18 mm.....	41