

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta stavební

Katedra betonových a zděných konstrukcí



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Mechanické vlastnosti betonových desek vyztužených tkaninami

Mechanical properties of concrete slabs with textile reinforcement

Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb

Vedoucí práce: doc. Ing. Jan Vodička, CSc.

2016

Bc. Aneta Kochová



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE



Fakulta stavební
Thálarova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: <u>Kochová</u>	Jméno: <u>Aneta</u>	Osobní číslo: <u>369506</u>
Zadávající katedra: <u>K133- Katedra betonových a zděných konstrukcí</u>		
Studijní program: <u>Stavební inženýrství</u>		
Studijní obor: <u>Konstrukce pozemních staveb</u>		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: <u>Mechanické vlastnosti betonových desek vyztužených tkaninami</u>	
Název diplomové práce anglicky: <u>Mechanical properties of concrete slabs with textile reinforcement</u>	
Pokyny pro vypracování: Referše o využití Liaporu v betonových prvcích, technologie výroby zkušebních vzorků k prokázání charakteristických pevností kompozitu v tlaku a ohybu.	
Seznam doporučené literatury:	
Jména vedoucího diplomové práce: <u>doc. Ing. Jan Vodička, CSc.</u>	
Datum zadání diplomové práce: <u>29.9.2016</u>	Termín odevzdání diplomové práce: <u>8.1.2017</u>
 Podpis vedoucího práce	 Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Berou na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použitých 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“.

<u>3.10.2016</u> Datum převzetí zadání	 Podpis studenta(ky)
---	--



Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „*Mechanické vlastnosti betonových desek vyztužených tkaninami*“ vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a že jsem uvedla veškeré použité podklady a zdroje.

Nemám námitek proti použití této školní práce ve smyslu §60 Zákona č. 121/2000 sb. O právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne

Bc. Aneta Kochová



Poděkování

V první řadě bych chtěla poděkovat vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Janu Vodičkovi, CSc. za vlídný přístup k vedení mé práce, ochotu, trpělivost, odborné znalosti, podněty, cenné rady a připomínky při jejím zpracování. Dále bych chtěla poděkovat všem, kteří mi pomáhali při zhotovování vzorků a jejich zkoušení. A také bych velice ráda poděkovala své rodině a přátelům, kteří mě během studia a zpracování této školní práce podporovali.



Abstrakt

Cílem této diplomové práce je představení kompozitního materiálu textilbetonu, analýza možností vyztužování betonu textilními sítěmi a ověření materiálových charakteristik. Zvoleným materiálem pro textilní síť jsou uhlíková vlákna. Betonová směs je vylehčena pomocí lehkého kameniva Liaporu. V rámci práce se zhotoví vzorky, jimiž budou tenkostěnné desky jednostranně vyztužené a trámce. Tyto vzorky budou destruktivně zkoušeny a posléze budou vyhodnoceny fyzikálně mechanické vlastnosti tohoto typu textilbetonu. Zhotovené vzorky desek budou zkoušeny ohybem. Závěrem budou výsledky zkoušek porovnány s jinými typy betonových kompozitních materiálů.

Rešerše této školní práce obsahuje základní informace o betonu a o jeho rozdělení. Dále je zde podrobněji popsán textilní beton, jakožto jeho výroba a využití v realizacích. Z důvodu využití Liaporu do betonu, je v této části práce popsán i lehký beton. Součástí rešerše jsou, pro porovnání, získané výsledky z jiných experimentálních prací týkajících se tenkostěnných betonových desek vyztužených textilními sítěmi.

V experimentální části diplomové práce je popsána výroba betonových zkušebních vzorků, zkoušení zhotovených vzorků a následné vyhodnocení provedených zkoušek.

Klíčová slova

Textilní beton, textilní výztuž, prostý beton, vylehčený beton, vlastnosti textilbetonu, tenkostěnné desky, uhlíková tkanina, destruktivní zkoušení



Abstract

The aim of this thesis is to introduce the composite material referred to as textile-reinforced concrete, to analyse the options of reinforcing concrete with textile cages, and to verify material characteristics. The material selected for the textile cages is carbon fibres. The concrete mixture is alleviated using the Liapor lightweight aggregate. As part of the thesis, samples will be fabricated, which will comprise thin slabs reinforced on one side and beams. The samples will be subject to destructive testing and, based on the tests, the physical and mechanical properties of this type of textile-reinforced concrete will be assessed. The samples produced will be tested for bending. Finally, the test results will be compared with other types of concrete composite materials.

The searches part of the thesis contains basic information about concrete and its classification. Furthermore, it describes textile-reinforced concrete in greater detail, such as its manufacture, sample testing and use in structures. Because of using Liapor in to the concrete mixture, this part of the thesis describes light concrete. Part of the search include, for compare, results of other experiments about thin concrete slabs with textile reinforcement grid.

The experimental part of the thesis describes the manufacture of the concrete samples for testing, testing of the samples produced, and the subsequent assessment of the tests.

Keywords

Textile-reinforced concrete, textile reinforcement, plain concrete, light concrete, characteristics of textile-reinforced concrete, thin slabs, carbon fabric, destructive testing



Seznam použitých symbolů a jednotek

RC	Železobeton
TRC	Textilbeton
FRC	Vláknobeton
HPC	Vysokopevnostní beton
UHPC	Ultra vysokopevnostní beton
HSC	Vysokohodnotný beton
LC	Lehký beton
c	Krycí vrstva [mm]
γ	Objemová hmotnost [kg/m^3]
$f_{\text{ck,cube}}$	Charakteristická pevnost v tlaku zjišťovaná na normalizované krychli [MPa]
$f_{\text{ck,cyl}}$	Charakteristická pevnost v tlaku zjišťovaná na normalizovaném válci [MPa]
F	Síla [N], [kN]
M	Moment [kNm]
W	Průřezový modul [m^3]
w	Průhyb [mm], [m]
E	Modul pružnosti [GPa]
σ	Napětí [GPa]
ρ	hustota [kg/m^3]
f	Jemnost vláken [tex]



Seznam objasnění betonářských pojmů

- Krycí vrstva-** Krycí vrstva, je vrstva betonu, která chrání ocelovou výztuž před korozí. Její tloušťka je závislá na agresivitě prostředí. Jedná se o nejmenší vzdálenost mezi povrchem betonu a povrchem výztuže (včetně třmínků).
- Hutnění-** Jedná se o zpracování betonové směsi při ukládání do bednění nebo do formy, tak aby výsledný ztuhlý beton obsahoval minimální množství vzduchových pórů.
- Konzistence-** Konzistence je dána poměrem vody k cementu. Konzistence charakterizuje zpracovatelnost čerstvé betonové směsi.
- Vodní součinitel-** Je o poměr hmotnosti účinného obsahu vody k hmotnosti cementu obsaženém v čerstvé betonové směsi
- Záměs-** Záměs je množství betonu vyrobeného v jednom operačním cyklu míchačky. Tato betonová směs má tedy stejné složení.
- Odbedňování-** Jedná se o odstranění (rozebrání) bednění z betonových prvků
- Odformování-** Jedná se o vyjmutí betonových prvků z forem.
- Požární odolnost-** Je to schopnost stavebních konstrukcí odolávat účinku plně rozvinutého požáru bez ztráty jejich stability únosnosti, celistvosti a izolační schopnosti.
- Křehký lom-** Křehký lom u nevyztuženého betonu je stav kdy, po vzniku tahových trhlin dochází ke kolapsu konstrukce. Jedná se křehký materiál a nedochází k velkým deformacím.
- Čerstvý beton-** Jedná se o směs složek po jejich promíchání.
- Příměsi-** Příměsi jsou látky přidávané do betonové směsi ve velkém množství oproti přísadám. Jedná se například o stejné množství, jako je ve směsi množství cementu. Tyto příměsi ovlivňují některé výsledné vlastnosti betonu.
- Přísady-** Přísady jsou látky přidávané do betonové směsi pouze ve velmi malém množství a velice ovlivňují některé výsledné vlastnosti betonu.
- Segregace-** U vláknobetonu/drátkobetonu dochází ke zvýšené odolnosti proti segregaci. Čímž je myšleno, že vlákna/drátky zamezují sesedání (oddělení) například kameniva a tvoření tak jeho shluků.
- Krvácení betonu-** Krvácení betonu je název pro jev, ke kterému dochází při ukládání čerstvého betonu do bednění nebo formy, popřípadě při jeho přepravě. Jedná se o únik vody s cementem z této směsi netěsnými místy.



Frakce kameniva- Je to směs kameniva určitých velikostí. Určuje se na sestavě sít o daných velikostech ok. Například frakce 8 – 16 obsahuje taková zrna kameniva, která propadla sítím o rozměrech ok 16 mm a zůstala na sítu s velikostí ok 8 mm.

Synergický efekt- Jedná se o jev, který nastává u kompozitních materiálů. Jde o to, že vlastnosti výsledného kompozitu jsou vyšší než by byl pouhý poměrný součet vlastností do něho vstupujících složek.

Skaní- Je to druh úpravy příze, při kterém se spojují a zakrucují dvě nebo více nití dohromady. [27]

Roving- V textilní terminologii se jedná o svazek (provazec/ přást) z nekonečných textilních vláken a to bez zákrutu, nebo s minimálním zákrutem. [26]

Filament- Jedná se o jemnější svazek nekonečných vláken než je u rovingu. V textilní terminologii se jedná o označení pro všechna nekonečná vlákna. [29]

Stříž- Z textilního hlediska se jedná o vlákenný materiál vzniklý krácením filamentů. [28]

Charakteristická pevnost betonu- Je hodnota pevnosti, pod kterou lze očekávat maximálně 5 % hodnot ze všech možných výsledků zkoušek pevnosti.



OBSAH

1	ÚVOD	12
2	REŠERŠE	15
2.1	BĚŽNÉ DRUHY VYZTUŽOVÁNÍ BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ	15
2.1.1	PROSTÝ BETON	16
2.1.2	ŽELEZOBETON.....	17
2.1.3	PŘEDPJATÝ BETON.....	18
2.1.4	VLÁKNOBETON	19
2.1.5	DRÁTKOBETON	21
2.2	SEZNÁMENÍ S TEXTILBETONEM.....	22
2.2.1	ÚVOD DO TEXTILBETONU.....	22
2.2.2	VZNIK TEXTILBETONU	23
2.2.3	CHOVÁNÍ TEXTILBETONU	24
2.3	METERIÁL TEXTILNÍ VÝZTUŽE	27
2.3.1	SKLENĚNÁ VLÁKNA	31
2.3.2	ČEDIČOVÁ VLÁKNA	32
2.3.3	ARAMIDOVÁ VLÁKNA	32
2.3.4	UHLÍKOVÁ VLÁKNA.....	33
2.3.5	UHLÍK	36
2.3.6	POROVNÁNÍ NĚKTERÝCH TEXTILNÍCH VLÁKEN	37
2.4	PŘÍKLADY VYUŽITÍ TEXTILBETONU.....	45
2.5	POROVNÁNÍ VYZTUŽENÝCH BETONŮ.....	53
3	JEMNOZRNNÝ BETON	55



4	LEHKÝ BETON.....	56
4.1	ZNAČENÍ LEHKÝCH BETONŮ	56
4.2	DRUHY LC PODLE ZPŮSOBU VYLEHČENÍ.....	57
4.3	VLASTNOSTI LEHKÝCH BETONŮ	57
5	LEHKÉ KAMENIVO LIAPOR	59
6	CÍL DIPLOMOVÉ PRÁCE.....	60
7	VÝSLEDKY ZKOUŠEK Z JINÝCH ZDROJŮ	61
8	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	68
8.1	BEDNĚNÍ VZORKŮ DESEK.....	69
8.2	BETONOVÁ SMĚS.....	72
8.3	POSTUP BETONÁŽE.....	73
8.4	DESTRUKTIVNÍ ZKOUŠENÍ VZORKŮ	75
8.4.1	TRÁMCE	75
8.4.2	DESKY- ČTYŘBODOVÝ OHYB	80
8.4.3	DESKY- TŘÍBODOVÝ OHYB	84
8.5	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKU EXPERIMENTÁLNÍHO MĚŘENÍ	90
9	ZÁVĚR	98
10	ZDROJE.....	99
11	SEZNAM OBRÁZKŮ	105
12	SEZNEM TABULEK.....	110
13	SEZNEM PŘÍLOH	112



1 ÚVOD

Již v dobách, kdy lidé přestali být sběrači a začali se usazovat trvale na jednom území, nastal problém se zajištěním stálejšího a trvalejšího bydlení. Toto obydlí mělo lépe vzdorovat klimatickým vlivům a celkově nepřízní počasí lépe než jednoduché stavení ze dřeva a slámy. Za tímto účelem se začalo používat důmyslnější opracování dřeva a kamene. Také byl objeven způsob jak spojit dva různé materiály. Postupem času došlo až k výrobě cihel, malt, ocele a cementu.

Pro výrobu betonu je zapotřebí tří základních složek- cementu jakožto pojiva, kameniva jakožto plniva a vody.

K využívání cementu došlo již v letech 300 př. n. l. - 476 n. l., kdy ho Římané použili do staveb stojících dodnes. Těmito stavbami jsou římské lázně, Koloseum, Via Appia, Pantheon a také akvadukt Pont du Gard na jihu Francie. Jednalo se o pucolánový cement z okolí italského města Pozzuli nedaleko Vesuvu. [1]

V 18. století se Anglický stavební inženýr John Smeaton zabýval stavbou vodních děl. Musel tedy vyřešit otázku pojiva odolného ve vodním prostředí. Zjistil, že pro užití vápna do konstrukcí pro vodní stavitelství má nejvyšší váhu obsah hlinitých částí ve vápenci. Takto objevil hydraulické vápno a započal tím výzkum a posléze i vznik moderních hydraulických pojiv. [1],[2]

V roce 1824 vynalezl Angličan Joseph Aspdin portlandský cement, který získal název podle vysoce kvalitních kamenů těžných v anglickém Portlandu. Jedná se o jemně mletou křídu s jemně rozdrčeným jílem, které se vypálili v peci a poté se vzniklý výsledný slinutý produkt rozemlel. [1]

Velký rozvoj využívání vyztuženého betonu započal v roce 1867, kdy pařížský zahradník Joseph Monier využil pletivo jako výztuž do zahradních květináčů. Tímto zahájil novou éru v technologii betonu, respektive železobetonu.

Díky vynálezu železobetonu se mohly začít stavět objemnější stavby. Přidáním ocele byl vyřešen největší problém prostého betonu, kterým je nízká pevnost v tahu. Ale s přidáním ocelové výztuže do konstrukce přišel nový problém, kterým je koroze výztuže. S vyšším nárokem na životnost staveb byla navýšena i krycí vrstva výztuže c, která se dnes standardně používá mezi 20 až 70 mm. Tloušťka krycí vrstvy závisí tedy na životnosti konstrukce a na druhu vnějšího prostředí, tedy na jeho agresivitě vůči konstrukci po celou dobu životnosti budoucí stavby. Dalším kritériem pro tloušťku krycí vrstvy je požární odolnost konstrukce.

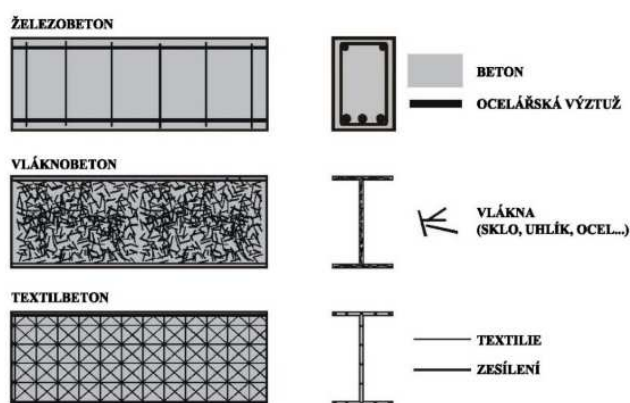
S příchodem této nové technologie betonu přišla i snaha o zefektivnění betonu a výztužných prvků, která trvá dodnes.

A tak ve 20. století vnikl předpjatý beton. S tímto také vznikly nové typy betonů různých vlastností. S ohledem na efektivitu jsou využívány speciální betony, konkrétně betony vysokohodnotné a vysokopevnostní. Všeobecně se beton vyztužuje převážně ocelovými pruty

(železobeton), v dnešní době často i krátkými a tenkými kovovými drátky rovnoměrně rozmístěnými v průřezu (drátkobeton) a také rovnoměrně rozmístěnými vlákny v průřezu z různých materiálů (vláknobeton). Materiálem pro vláknobeton je sklo, uhlík, čedič atd. V případě vláknobetonu vlákna nenahrazují nosnou výztuž. Relativně novou technologií je takzvaně beton vyztužený tkaninou (TRC, textilbeton). Jedná se o vyztužení pomocí prvků z nekovových vláken, například uhlíkových nebo skleněných. Všechny tyto možnosti závisejí především na vývoji nových materiálů a jejich vhodných kombinacích. Díky textilbetonu ve spojení s vysokohodnotným betonem lze docílit hledaných výhod, jimiž jsou subtilnější konstrukce, snazší provedení konstrukcí složitých tvarů a především velká únosnost velmi subtilních konstrukcí. Celkově lze říci, že je snaha odstranit ocelářskou výztuž z nosných betonových konstrukcí. Nevýhodou ocelářské výztuže je především koroze (s tímto spjatá i velikost krycí vrstvy), hmotnost a energetická náročnost při její výrobě.

Textilbeton byl vyvinut v Německu v roce 1994 na TU v Drážďanech (Dresden) a dále vyvíjen na vědeckém pracovišti v Aachen. Výzkum textilbetonu v TU Drážďanech se zabývá využitím textilbetonu při sanacích staveb na zesilování konstrukcí. V RWTH Aachen se výzkum zaměřuje na využití textilbetonu v konstrukcích jako takových, takže na návrh prvků z textilbetonu. V roce 2008 bylo založeno společenství Tudalit sestávající z univerzit, stavebních firem a výrobců textilních vláken. Toto společenství se snaží prosadit navrhování konstrukcí z textilbetonu v běžné stavební praxi. [3]

Textilbeton je v dnešní době využíván především při sanacích konstrukcí. Nejedná se tedy o textilbeton dle definice výztuže z textilních vláken umístěných již v čerstvé betonové směsi před jejím zatuhnutím, ale o zesílení u vnějšího povrchu konstrukce pomocí lamel z textilních vláken.



Obrázek 1- Porovnání prvků s různým vyztužením- RC, FRC a TRC. [4]

V současné době se všeobecně beton nevyužívá pouze jako materiál pro zhotovení stavebních konstrukcí, ale čím dál tím častěji je využíván pro architektonické prvky, nábytek a městský mobiliář. V těchto případech je důležitý vzhled prvků a také jejich hmotnost, kterou se snažíme



snížit, aby bylo možno prvky snáze přemísťovat. Jedním způsobem jak můžeme docílit snížení hmotnosti prvků, je zmenšení tloušťky krycí vrstvy c, s ohledem na požární odolnost konstrukce.

Jak již bylo zmíněno, postupem času docházelo ke zvyšování efektivity betonových konstrukcí. Z původního prostého betonu vznikl železobeton, který vyřešil problém tažených konstrukčních prvků. Dále byl vyvinut předpjatý beton, který je ještě výhodnější než železobeton. Využívá se na konstrukce o větším rozponu a výsledkem jsou relativně tenké konstrukce. Jeho nevýhodou je zejména složitý postup při předepnutí lan a potřebný prostor pro předpínací mechanismy. Dále byl vyvinut drátkobeton a vláknobeton. U obou dvou těchto typů dochází k zlepšení odolnosti proti průnikům vody, k omezení vzniku smršťovacích trhlin, k zvýšení tahové pevnosti, duktility a požární odolnosti. [5] Nevýhodou obou těchto materiálů je špatná možnost zajištění rovnoměrného rozptýlení vláken ve zhotovovaném prvku. U vláknobetonu je nevýhodou, že vlákna nenahrazují klasickou výztuž a tak nemůže dojít ke ztenčení konstrukce díky zmenšení krycí vrstvy c. Jeho výhodou je zejména zlepšení kvality povrchu a v případě propylenových vláken, dochází ke zlepšení požární odolnosti konstrukce. U drátkobetonu se setkáváme se stejnou nevýhodou jako u všech ostatních kompozitních materiálů s ocelovou výztuží a tou je koroze oceli, ani zde tedy není možnost ztenčení konstrukce díky ztenčení krycí vrstvy.

Řešením této situace se zdá být ve využití již zmíněného textilbetonu, který je vyztužen textilní sítí. Jeho výhodou je, že může být výztuž pevně zafixována v určité poloze a tím odpadá problém vláknobetonu a drátkobetonu. Díky vláknům z materiálů nekorodujících, nehořlavých a odolných vůči agresivnímu prostředí může dojít ke ztenčení krycí vrstvy c a tím i ke ztenčení celé konstrukce. Další výhodou je pevnost v tahu, kterou mají vlákna vyšší než běžná ocelářská výztuž. Další z hlavních výhod je hmotnost takovéto výztuže, která je v porovnání s výztuží ocelovou výrazně nižší. Jednou z nevýhod je cena textilních výztuží, která je v porovnání s ocelí vyšší. Může to být především tím, že tento druh vyztužování je teprve ve svých počátcích. Pokud dojde běžnému využívání takového kompozitu ve stavebnictví, bude dle mého názoru cena textilních výztuží klesat. Je také dobré si uvědomit, že náklady na údržbu textilbetonu jsou nižší než je tomu u železobetonu.

Z tohoto důvodu je má diplomová práce zaměřena na textilbeton. A proto byly zhotoveny zkušební vzorky tenkostěnných desek jednostranně i oboustranně vyztužených textilní sítí z uhlíkových vláken v kombinaci s vylehčeným betonem pomocí Liaporu.



2 REŠERŠE

2.1 BĚŽNÉ DRUHY VYZTUŽOVÁNÍ BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ

Co je to beton? V případě, že mluvíme o betonu nevyztuženém, tedy o složení betonu jako takového, popřípadě čerstvého betonu, lze beton vlastně definovat poměrně jednoduše a zároveň velice obtížně. Jednoduchou definicí mám na mysli to, že se jedná o umělý slepenec, ve kterém jsou obsaženy tři základní složky. Těmito složkami jsou voda, cement jako pojivo a kamenivo jako plnivo. Tento slepenec má vlastně nahrazovat přírodní kámen a případně mít ještě lepší některé své vlastnosti. Druhou a složitější definicí jsem měla na mysli velkou variabilitu betonových směsí, kdy jsou ovlivněny vlastnosti výsledného betonu mnoha různými způsoby. Těmito způsoby jsou především příměsi a přísady do betonu (plastifikační, provzdušňovací, zpomalovače tuhnutí, ztekucující, atd.), nebo také jiný druh cementu a kameniva. Díky tomu vzniká široká škála možností míchání směsí a tím i široká škála druhů betonu.

Obecně lze beton rozdělit do mnoha skupin podle různých kritérií. Jednou ze skupin je rozdělení betonů podle objemové hmotnosti γ a to na: [8]

- Beton obyčejný: $\gamma = 2000 - 2600 \text{ kg/m}^3$
- Beton lehký: $\gamma < 2000 \text{ kg/m}^3$
- Beton těžký: $\gamma > 2600 \text{ kg/m}^3$

Dále lze betony rozdělit podle hutnosti na: [8]

- Hutný beton, který má z důvodu chybného zpracování betonové směsi obsah pórů v čerstvém betonu do 5 % objemu
- Provzdušněný beton, do kterého se za účelem zlepšení některých vlastností výsledného betonu nebo betonové směsi uměle vkládají vzduchové póry. Jejich obvyklý objem se pohybuje obvykle mezi 5 a 10 % objemu betonu. Jsou podstatně menší a rovnoměrněji rozmístěné ve struktuře betonu nežli je tomu u hutného betonu.
- Pórovitý beton s obsahem vzduchových pórů nad 10% objemu betonu. Zde se jedná o výrazný vliv na snížení hmotnosti výsledného betonového prvku, ale zároveň jde i o snížení pevnosti.
- Mezerovitý beton, ve kterém se vyskytují navzájem propojené mezery. Vyrábí se pomocí betonových směsí, které obsahují výrazný podíl hrubé frakce kameniva.

Také se betony mohou dělit podle dalších charakteristik jako např. dle typu pojiva, podle podmínek ve kterých je beton vyráběn atd. [8]

S ohledem na řešenou problematiku a záměr diplomové práce se zaměřím na rozdělení betonů podle typu vyztužení, viz níže.

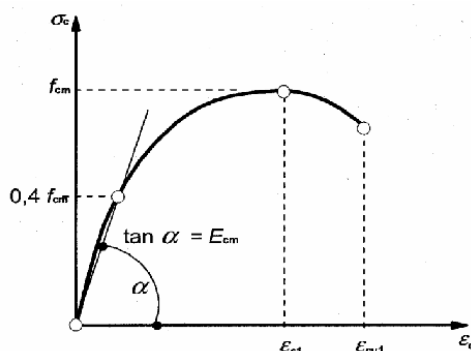


2.1.1 PROSTÝ BETON

Prostý beton je kompozitní materiál sestávající z plniva, pojiva a vody. Základními složkami prostého betonu jsou tedy kamenivo, cement a voda. V dnešní době existuje spousta druhů betonů, které se liší především pevností dle svého využití, ale i jinými vlastnostmi, které jsou ovlivněny druhy a množstvím přísad a příměsí.

Prostým betonem se rozumí beton nevyztužený, nebo beton slabě vyztužený, což je beton vyztužený pomocnou (konstrukční) výztuží. Slabým vyztužením se rozumí takové vyztužení, u něhož se nepředpokládá přenos vnitřních sil v průřezu. Konstrukce zhotovená z tohoto druhu betonu tedy není schopna přenášet tahová zatížení, prostý beton má v tahu 10x menší únosnost než v tlaku.

Z tohoto důvodu se prostý beton využívá pouze na tlačené konstrukce, jako jsou například základové pasy a patky, oblouky, klenby, stěny, centricky tlačené sloupy a jiné. Jedná se [2] především o masivní konstrukce. Není tedy vhodné z prostého betonu zhotovovat prvky, které budou průběhu své životnosti namáhány ohybem a tahem. Již malé přetvoření takového prvku je kritické a dochází při něm ke křehkému lomu.



Obrázek 2- Pracovní diagram betonu v tlaku. [6]

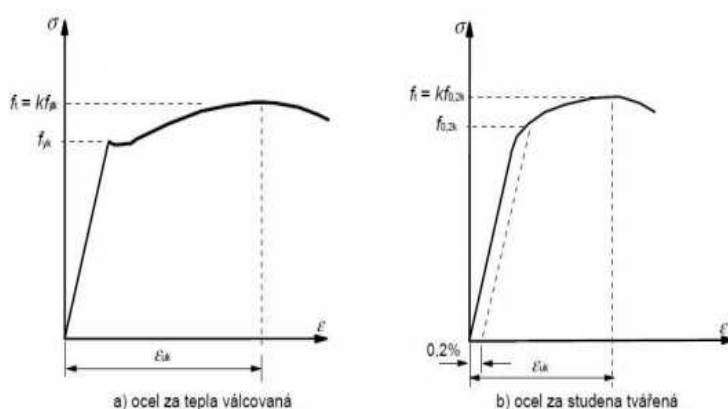


Obrázek 3- Řez prostým betonem. [7]

2.1.2 ŽELEZOBETON

K velkému pokroku ve stavebnictví došlo v druhé polovině 19. století díky vložení železného pletiva do betonu. V současnosti se jedná o nejvíce využívaný druh vyztužení betonových konstrukcí ve stavebnictví. Železobetonové konstrukce se vyztužují převážně ocelovými pruty a sítěmi. Díky tomuto vzniká kompozitní stavební materiál, který je na rozdíl od prostého betonu schopen přenášet i tahová zatížení za předpokladu trvalého spolupůsobení betonu s vyztužnými prvky. Vyztuž do betonu se přidává tedy z důvodu přenášení tahových namáhání, ale běžně se přidává i z důvodu tlakového namáhání, čímž dojde k zesílení průřezu. Tohoto se využívá například u tlacených sloupů dostředně tlačných, nebo s malou výstředností. Vyztuž můžeme tedy rozdělit na tahovou a tlakovou.

Velkou nevýhodou prvků ze železobetonu je náchylnost ocelové vyztuže vůči různým okolním vlivům, především že dochází k její korozi. Z tohoto důvodu musí být zajištěna dostatečná krycí vrstva betonářské vyztuže. Nemalou nevýhodou je i energeticky nákladný proces výroby vyztužných prvků a také potřeba neobnovitelných zdrojů pro její výrobu (železná ruda a uhlí).



Obrázek 4- Pracovní diagram oceli v tahu s výraznou a se smluvní mezí kluzu. [9]



Obrázek 5- Železobeton. [10]



2.1.3 PŘEDPJATÝ BETON

Ve snaze lepšího využití průřezu byl koncem 19. století vyvinut předpjatý beton. Jedná se o konstrukce s vnesenou tlakovou silou, v místě předpokládaného největšího tahového namáhání, za účelem částečného nebo úplného vyrušení tohoto tahového namáhání. Tak, že je výsledný průřez velice málo namáhaný tahem, nebo je pouze tlačenny. Toho je docíleno pomocí předpínací výztuže. Od klasické betonářské výztuže se liší především svou únosností v tahu, která je cca čtyřnásobná. Průřez, který je celý pouze tlačenny, je velice výhodný z hlediska životnosti konstrukce, jelikož se v něm oproti železobetonu nevyskytují tahové trhliny, nebo jen v malé míře.

Díky předpjatému betonu dochází u konstrukcí k menšímu průhybu a zvýšení celkové tuhosti konstrukce oproti konstrukcím ze železobetonu.

Předpjatý beton je převážně využíván v dopravním stavitelství a to především v konstrukcích mostních staveb. V pozemním stavitelství je využíván pro konstrukce o velkých rozponech, nebo pro štíhlé prvky.

Nevýhodou předpjatých prvků je především potřeba složitých přepínacích zařízení a potřebného prostoru pro jejich použití.

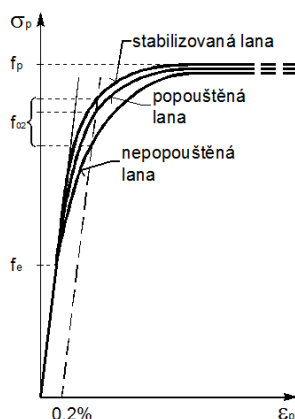


Obrázek 6- Předpjatý beton. [11]



Obrázek 7- Předpjatý beton. [12]

Vnesení předpětí se do prvků dá provést dvěma způsoby. Prvním způsobem je pomocí dodatečného předpínání, kdy dochází k předpětí až po vybetonování prvku. Druhým způsobem je vnesení předpětí před betonáží, jedná se tedy o předem předpjaté prvky.



Obrázek 8- Pracovní diagram předpínacích lan. [13]

2.1.4 VLÁKNOBETON

Vláknobeton, jinak také ve zkratce FRC (neboli „*fibre reinforced concrete*“), je dalším kompozitním materiálem. Zahrnuje celou řadu betonů vyztužených pomocí rozptýlených vláken. Takovou metodu využívali již staří Egypťané, kteří vyztužovali stavební materiály slámou či perím. [14]

Roku 1874 se přidával do betonové směsi odpad z výroby ocelových součástek, což byla vlastně první podoba betonu vyztuženého náhodně rozptýlenými vlákny. Kolem roku 1960 se započalo s bližším zkoumáním vláknobetonu- drátkobetonu a jeho testování v praktických aplikacích pro získání co nejpřesnější definice takto vzniklého nového stavebního materiálu. [15]

Pro získání požadovaných charakteristik výsledného betonu je potřeba zajistit správné rozmístění vláken v betonové směsi. Tato vlákna mají být rozmístěna rovnoměrně s náhodnou orientací. Kontrola správného rozmístění výtuzných vláken je poměrně složitá záležitost. Vlákna používaná do vláknobetonu jsou různých materiálů, tvarů a rozměrů. Různá vlákna se tedy používají pro získání určitých vlastností. Aby se těchto vlastností docílilo, a dalo se tak hovořit o vláknobetonu, musí výsledná matrice obsahovat určité množství těchto vláken v jednotce objemu. Tím musí dojít ke zlepšení alespoň jedné mechanické vlastnosti výsledného betonu. Na výsledné vlastnosti betonového prvku má tedy vliv tvar těchto vláken, jejich rozmístění, orientace, množství, geometrie a samozřejmě samotná betonová směs. [16]

Materiálem pro vlákna jsou např.:

- Ocelová (speciální druh vláknobetonu- drátkobeton)
- Polymerová (propylenová, polyethylenová, polyesterová, nylonová, polyakrylátová apod.)
- Skleněná
- Ostatní

Rozlišujeme tedy pojem vláknobeton a drátkobeton. Drátkobeton je vyztužen ocelovými drátky (viz níže, vlastní kapitola 2.1.5). Pokud mluvíme o vláknobetonu, vyztuženého vlákny jiných



materiálů než jsou ocelová, tak vlákna nenahrazují běžnou betonářskou výztuž. Jelikož jsou dávkována v malém množství, nemají výrazný vliv na pevnost betonu.

„Vlákna rovněž nemohou kompenzovat případné nedostatky ve složení betonové směsi nebo problémy vzniklé při ošetřování betonu. Vzhledem k tomu, že vlákna jsou poměrně drahá, je třeba nejprve zvážit, zda by nebylo lepší tytéž náklady investovat do přídavné výztuže, kvalitnějšího betonu nebo kvalitnějšího způsobu ošetřování. Správně použitá vlákna mohou značně zlepšit chování běžného betonu.“ [15]



Obrázek 9- Polymerová vlákna do betonu. [18]

Vláknobeton má hned několik výhod, mezi něž patří zejména omezení vzniku smršťovacích trhlin, zvýšení odolnosti konstrukce proti průniku vody, zlepšení kvality betonových konstrukcí. Může také zvýšit odolnost proti mrazu a požáru. Dále jsou vlákna odolná vůči korozi a alkalickému prostředí, díky čemuž má vláknobeton vyšší životnost a malé nároky na údržbu. Další výhodou je, že u čerstvého betonu zvyšují odolnost proti segregaci a omezují krvácení betonu. Zvyšují houževnatost betonu, tedy jeho odolnost vůči nárazu a mechanickému poškození. V rozích a na krajích prvku omezuje odštěpování zatvrdlého betonu.

Obecně lze říci, že vlákna zlepšují odolnost betonu proti vzniku trhlin a to v počátečním stádiu při smršťování, ale i ve stádiu zatížení konstrukce. Také zvyšují odolnost betonu v tahu i po vzniku trhlin, a to díky vysoké duktilitě. [23]

„Správně zvolený materiál pro konstrukci hraje důležitou roli při posuzování hospodárnosti konstrukce.“ [15]

Využití vláknobetonu je především tam, kde je požadována houževnatost. Používá se především do pohledových betonů, v podlahách, základových deskách a ve vodostavebních konstrukcích.

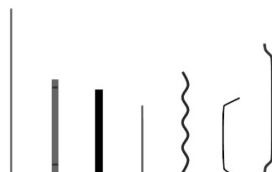
V ČR byl vláknobeton použit například při stavbě lávky přes Lochkovské údolí. Při této realizaci byla do čerstvého betonu přidána polypropylenová vlákna Fibrex délky 12 mm. Hlavní tahovou výztuž tvořily podélné pruty z betonářské výztuže. Vlákna byla do čerstvého betonu vložena za účelem omezení výsledného smrštění. [19]

Vláknobeton je stále ještě předmětem výzkumů.



2.1.5 DRÁTKOBETON

Jak již bylo zmíněno, v kapitole 2.1.4, drátkobeton je speciálním druhem vláknobetonu. Jedná se o betonovou směs vyztuženou ocelovými drátky, které mají být (stejně jako vlákna u vláknobetonu) rovnoměrně rozmístěny a náhodně orientovány v objemu prvku. Pro tento typ vyztužení platí prakticky to samé jako pro vláknobeton. Ocelové drátky do betonu mohou být různých tvarů a rozměrů.



Obrázek 10- Ocelové drátky do betonu. [20]

Výhody takového homogenního materiálu jsou vesměs shodné s výhodami vláknobetonu (viz 2.1.4). Další výhodou je odolnost proti otěru. Nevýhodou drátkobetonu je především v korozi ocelových drátků a neodolnost vůči agresivnímu prostředí, což má vliv na celkovou životnost konstrukce a na její údržbu. Musí být tedy dodržena minimální krycí vrstva výztuže. A nemůže tak dojít ke ztenčení betonových prvků ztenčením krycí vrstvy.

Výrazným rozdílem oproti vláknobetonu je množství drátků v matici, těch je podstatně větší množství a mají vliv na výslednou pevnost betonovaného prvku. Mohou v některých případech částečně nebo zcela nahradit betonářskou výztuž. A je prokázáno, že při zvyšující se dávce drátků se zlepšují vlastnosti výsledného betonu. V některých případech tak může dojít k finanční úspoře a to díky zjednodušení (v některých konstrukčních detailech je provedení běžné výztuže náročné) a zrychlení stavebních prací, úspoře na dopravě a skladování nosné výztuže. [15]

Drátkobeton, stejně jako vláknobeton, je stavební materiál, který se stále ještě zkoumá a vyvíjí.



Obrázek 11- Trámeček z drátkobetonu. [20]



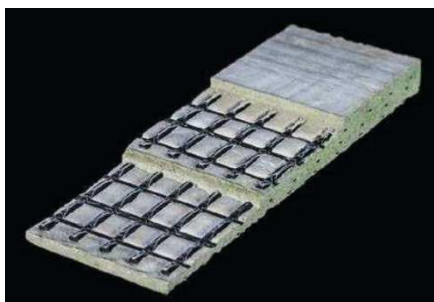
2.2 SEZNÁMENÍ S TEXTILBETONEM

2.2.1 ÚVOD DO TEXTILBETONU

Textilbeton („*textil reinforced concrete*“, zkráceně TRC) je kompozitním materiálem, kdy jsou do čerstvého betonu jako výztuž využita nekovová textilní vlákna. Jedná se vlastně o speciální typ vláknobetonu, kdy nejsou vlákna rovnoměrně rozmístěna po průřezu, ale jsou většinou pomocí sítě, z nich vytvořené, umístěna do místa největšího namáhání a zde jsou zafixována. Toto je považováno za velkou výhodu oproti vláknobetonu, jelikož tak může být průřez efektivnější. Jedná se tak o stejný princip jako u RC.

Kompozitní materiál je materiál, který se skládá ze dvou a více složek. Tyto složky mají odlišné vlastnosti. Přičemž v kompozitu si své vlastnosti musí daná složka zachovat. Vznikne tak kompozitní materiál, který nemá vlastnosti rovné součtu vlastností do něho vstupujících složek. Výsledné vlastnosti má ještě vyšší. Tento jev se nazývá synergický efekt.

Velkou výhodou tohoto typu vyztužení je ztenčení krycí vrstvy díky vláknům nekorodujícím a odolným vůči vnějším vlivům. Tím i celkové ztenčení konstrukce. Díky ztenčení c a lehčímu výztužnému materiálu dochází ke snížení hmotnosti prvku, což je významnou výhodou TRC. Dále mají vlákna vyšší pevnost v tahu oproti standardní ocelářské výztuži. Z tohoto důvodu textilní výztuž může nahrazovat výztuž běžnou betonářskou. S ohledem na dosažení dostatečné soudržnosti je vhodné využít, pro vyztužení prvku, textilní síť z vláken ve dvou směrech na sebe kolmých, vytvářející mříž.



Obrázek 12- Textilbeton. [21]

Předpokladem pro správné fungování takto navržené konstrukce je důkladné propojení výztužné sítě s betonovou směsí. A jelikož se pro TRC využívají výztužné sítě (jako na obr. 12), je tím zajištěna dobrá soudržnost mezi betonem a tkaninou. Tedy za předpokladu, že dojde k dobrému probetonování skrze oka výztužné sítě. Za tímto účelem jsou do textilbetonů využívány betony jemné struktury a do směsi je využito kamenivo vhodné velikosti zrna. To většinou bývá frakce 0 - 4 mm. Díky tomu můžeme dosáhnout konstrukcí velmi malých tlouštěk, až pouhých 10 - 20 mm [21].



Výztužné tkaniny do betonu mohou být různých vysokopevnostních materiálů, jako například z vláken uhlíkových, čedičových, skelných, aramidových, polyethylenových atd.

Hlavní výhody textilbetonu:

- Nekorodující výztuž a odolná vůči většině agresivního prostředí
→ zmenšení tloušťky krycí vrstvy a tak celkové ztenčení konstrukcí, delší životnost, menší nároky a náklady na údržbu
- Materiál výztuže je lehčí nežli běžná betonářská výztuž
→ jednodušší přeprava a tím i menší náklady na přepravu
- Vyšší únosnost výztuže v tahu než u běžné betonářské výztuže
- Vložení výztuže do míst tahového namáhání, jako u běžné betonářské výztuže, jedná se o výhodu oproti vláknobetonu, dochází tím k rovnoměrnému rozmístění výztuže
- Vhodný pro betonování i složitějších tvarů
- Kvalita povrchu prvku z textilbetonu, může dojít i k případnému přebroušení

V dnešní době je takovýto kompozitní materiál velice málo využíván pro stavební účely. Dnes se využívají textilní výztuže jako lamely (desky), tyče (pruty), dráty (lana) a tkaniny (pásy) pro dodatečné ztužení, nebo sanaci stávajících konstrukcí. Více v kapitole č. 2.4 *PŘÍKLADY VYUŽITÍ TEXTILBETONU*.

Takto může dojít k výrobě opravdu subtilních konstrukcí, které mohou splňovat i estetické nároky dnešní doby. Možná je textilbeton tím správným řešením pro budoucnost betonových konstrukcí. A třeba to bude právě tento stavební materiál, který z velké části nebo zcela nahradí dnes běžný železobeton s ocelovou výztuží.

K této otázce se vyjádřil i profesor Joseph Hegger z technické vysoké školy Severního Porýní-Vestfálska. Ten tvrdí, že prvky tvořené z oceli zůstanou nadále využívány při stavbě výškových budov. Při napojování vodorovných prvků již nebudou nezbytností a budou zcela, nebo alespoň z části nahrazeny.

Tento druh vyztužení betonu je také stále ještě ve výzkumu.

2.2.2 VZNIK TEXTILBETONU

Jak již bylo řečeno od dob vzniku RC, tedy železobetonu, v roce 1867, kdy Joseph Monier rozpoutal novou éru ve stavebnictví, uplynulo již mnoho let. A také bylo z RC postaveno mnoho staveb. Ale přibližně v 60. letech minulého století začaly tyto konstrukce stárnout a přišlo se na neduhy RC. V prvcích, kde nebyla dostatečná krycí betonová vrstva výztuže, docházelo k degradaci ocele. Rezavá tekutina vytékala materiálem na povrch konstrukcí.

Od té doby je stále tento druh vyztužení betonu stále nejefektivnější a nejrozšířenější. Stále se z tohoto kompozitního materiálu staví i výškové stavby, ale za předpokladu řádného zajištění tloušťky krycí betonové vrstvy výztuže.



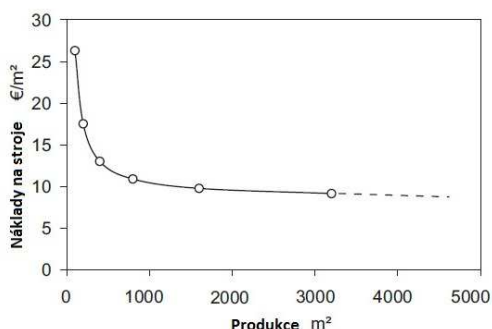
Z důvodů (jak již bylo popsáno), ekologických, též ekonomických a také estetických, se stále hledá vhodný způsob náhrady běžné ocelářské výztuže.

EKOLOGICKÉ DŮVODY- Nižší ekologická zátěž při výrobě oceli. To zahrnuje vysoké emise CO₂ a tudíž menší podíl na vzniku skleníkového efektu. Je při výrobě oceli spotřebováno velké množství kvalitního uhlí (koks) a je k její výrobě zapotřebí železné rudy. Jak železná ruda, tak uhlí jsou v podstatě neobnovitelné zdroje. Oproti tomu lze uhlíková (karbonová) vlákna vyrábět z obnovitelných zdrojů.

EKONOMICKÉ DŮVODY- Zmenšení rozměrů konstrukce, snížení hmotnosti. Menší náklady na skladování, převoz a přemístění. Trvanlivost a náklady na údržbu betonových konstrukcí.

V dnešní době je ale pořád výstavba konstrukcí z textilbetonu velice finančně náročná. Jedná se o poměrně mladý materiál. A využívání textilních vláken ještě není tak rozšířené, aby se jejich výroba vyplatila.

ESTETICKÉ DŮVODY- Kvalita povrchu konstrukcí, vzhledově lehké konstrukce složitých tvarů. Designově zajímavé konstrukce. Využití i na reprezentativní stavby, kde se dnes převážně využívají konstrukce ocelové.

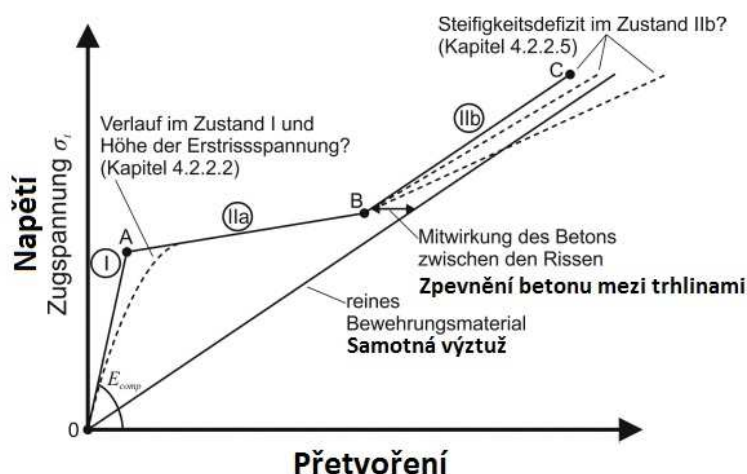


Obrázek 13- Graf závislosti nákladů na stroje v závislosti na množství produkce textilních vláken. [24]

2.2.3 CHOVÁNÍ TEXTILBETONU

Pracovním diagram TRC můžeme rozdělit na tři oblasti ohraničené body 0, A, B a C. [25]

- Oblast I- TRC bez trhlin
- Oblast IIa – vznik trhlin
- Oblast IIb - ukončení vzniku trhlin v průřezu



Obrázek 14- Pracovní diagram textilbetonu v tahu. [25]

Oblast I – Do bodu A se kompozitní materiál chová téměř lineárně pružně s modulem pružnosti E_{comp} . V této oblasti se nevyskytují trhliny. Modul pružnosti E_{comp} lze vypočítat pomocí rovnice: [25]

$$E_{comp} = \frac{E_t A_t + E_c A_c}{A_t + A_c}$$

E_c je moduly pružnosti betonu a E_t textilních vláken.

A_c je průřezová plocha betonu a A_t textilních vláken.

Oblast IIa – Mezi body A a B se jedná o oblast vzniku trhlin, a to z důvodu vyčerpání tahové pevnosti betonu. Jedná se o významnou oblast z pohledu návrhu konstrukcí. Přesněji řečeno konstrukce navrhované na MSP vyhoví pouze v oblasti I (tedy mezi body 0 – A). Nalezení bodu A je závislé na průřezové ploše textilních vláken ve vyšetřovaném průřezu. Vypočítání napětí v bodě A lze za předpokladu: [25]

- V oblasti I je lineární průběh pracovního diagramu TRC.
- $A \approx A_c$
- Vzájemné spolupůsobení betonu a textilních vláken a je tedy shodné jejich přetvoření.

$$\varepsilon_{cr} = \varepsilon_{cr,t} = \varepsilon_{cr,c}$$

ε_{cr} je přetvoření celku

$\varepsilon_{cr,t}$ je přetvoření textilních vláken

$\varepsilon_{cr,c}$ je přetvoření betonu

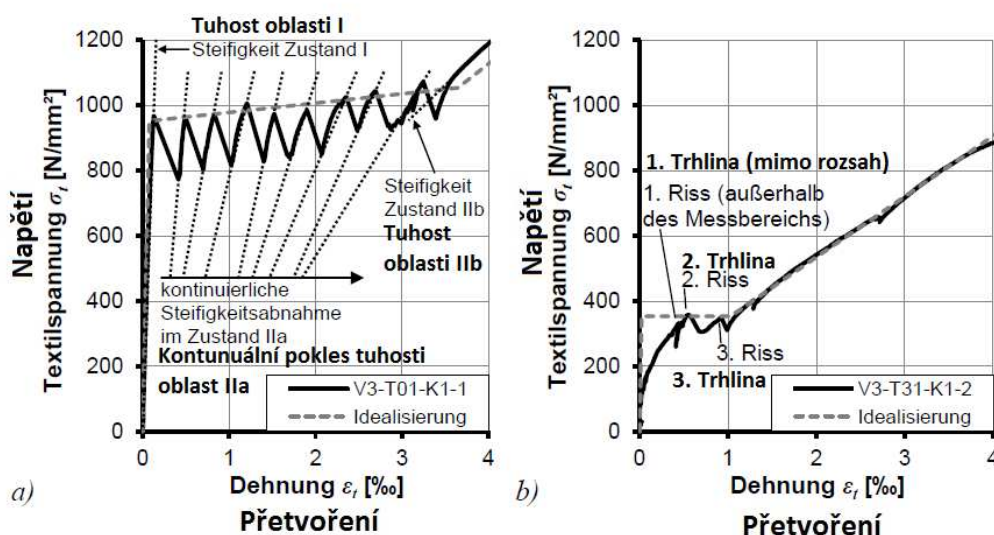
Za splnění těchto podmínek můžeme vyčíslit napětí v bodě A:

$$f_{ctm}(\omega_l) = f_{ctm}(0) \cdot (1 + \omega_l)$$

$f_{ctm}(0)$ je pevnost betonu v tahu

ω_l je míra vyztužení v závislosti na modulech pružností E_c , E_t a ploch A_c , A_t

$$\omega_l = \frac{E_t A_t}{E_c A_c}$$



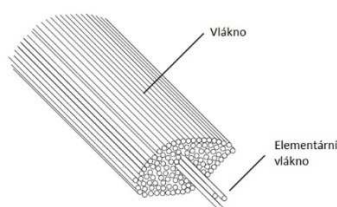
Obrázek 15- Oblast IIa z pracovního diagramu textiltbetonu v tahu, oblast vzniku trhlin. Obr. a) Uhlíková vlákna spřažená epoxidem, $\omega_l = 1,94\%$ b) Uhlíková vlákna spřažená styrol- butadienem, $\omega_l = 1,37\%$. [25]

Oblast IIb – Po překročení bodu B (horní hranice oblasti IIa) již nevznikají další trhliny v betonu. Pokud nadále narůstá napětí, dojde k porušení prvku (bod C). Při porušení prvku se uvažuje pouze s účinkem textilních vláken v řešeném průřezu. Pevnost textiltbetonu je tedy stanovena na základě pevnosti textilních vláken v tahu. [25]

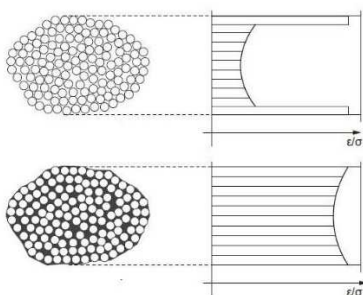
2.3 MATERIÁL TEXTILNÍ VÝZTUŽE

V současné době je malé množství výrobců výztuží z textilních vláken určených pro stavební průmysl, ale typů textilních výztuží je velké množství. Odlišnostmi mezi různými výztužemi jsou: materiál, tvar průřezu vlákna, propojení vláken, hustota textilie atd.

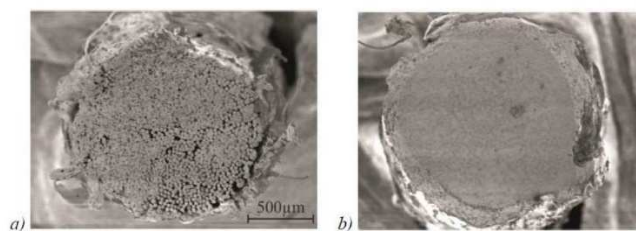
Sít z textilních vláken je nejčastěji čtvercová nebo obdélníková se vzdáleností jednotlivých prutů do 40 mm. Z tohoto důvodu se při zhotovení prvků používá již zmíněná betonová směs s frakcí kameniva do 4 mm (jemnozrnný beton). Vlákno, kterým jsou tvořeny textilní sítě, se skládá až z tisíců elementárních vláken. Při zatěžování těchto vláken musí dojít k rovnoměrnému přenosu zatížení mezi vnitřními a vnějšími elementárními vlákny. Z tohoto důvodu se používá ke spřažení elementárních vláken epoxidu a styrol-butadienu. Díky tomuto spřažení dochází nejen k vyšší pevnosti, ale i k možnosti tvarování vláken do požadovaných tvarů. [24]



Obrázek 16- Textilní vlákno skládající se z elementárních vláken. [24]



Obrázek 17- Porovnání napětí v mezi nespřaženým a epoxidem spřaženým průřezem textilního vlákna. [24]



Obrázek 18- Rozdíl nespřaženého a epoxidem spřaženého textilního vlákna pod mikroskopem. [25]

Základní pojmy:

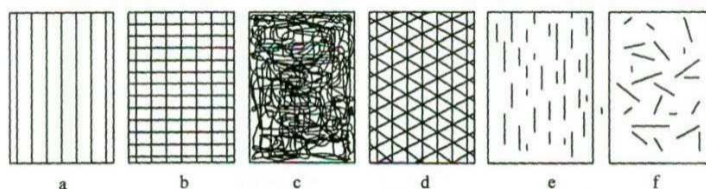
- **elementární vlákno** - Základní prvek vlákna. Vlákno se tedy skládá z elementárních vláken (stovky až tisíce).
- **vlákno** – Z vláken se dále tvoří další textilní prvky. Například nitě, příze, tkaniny atd.
- **jemnost** - Je to vlastnost popisující vlastnosti vlákna.
- **tex** - jednotka popisující jemnost.

$$f = 1 \text{ tex} = \frac{1 \text{ g}}{1 \text{ km}} [\text{g/km}]$$

Na základě tohoto vzorce lze následně vyčíslit **plocha vlákna**, kde f je jemnost vlákna [tex] a ρ měrná hmotnost [kg/m^3]: [25]

$$A = \frac{f}{\rho} [\text{m}^2]$$

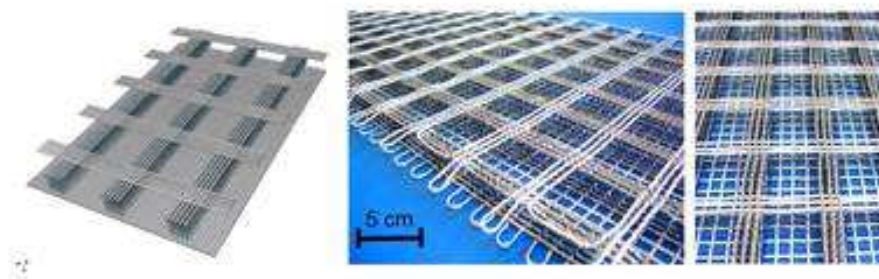
Jednotlivá textilní vlákna, v textilní terminologii také filameny, tvoří svazky. Tyto svazky tvoří přízi, které se také říká roving. Dále mohou být tyto příze strojně zpracovávány do sítí. [26]



Obrázek 19- Příklady uspořádání vláknové výtzuže v kompozitech: a) jednosměrné uspořádání, b) tkanina, c) rohož, d) víceosá výtzuž z kontinuálních vláken, e) krátká vlákna jednosměrně orientovaná, f) krátká vlákna s nahodilou orientací. [30]



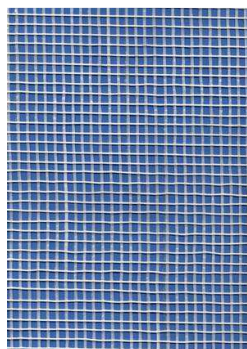
Obrázek 20-Textilní síť, "3D-Sandwich". [31]



Obrázek 21-Textilní síť, "3D-Waffel". [31]



Obrázek 22-Textilní síť, "3D-Gitter". [31]



Obrázek 23-Textilní síť, 2D. [31]

Materiály využívané pro textilní výztuže:

- Čedičová vlákna
- Uhlíková vlákna
- Skleněná vlákna
- Aramidová vlákna
- Další vlákna: polymerová, kovová, z přírodních materiálů a další

Tabulka 1- Mechanické vlastnosti kompozitů a textilních vláken.[30]

Materiál	modul pružnosti [GPa]	pevnost v tahu [MPa]
skleněné vlákno typu E	73	2500
sklovina E	73	100
uhlíkové vlákno	230 až 950	2000 až 6000
polykrystalický grafit	10	20
keramické vlákno SiC	300	3000
SiC monolitický	410	500
UHMW polyethylenové vlákno	90 až 170	3000
lineární polyethylen	0,4	26

Textilní výztuž se specifikuje podle: [64]

- Materiálu vlákna
- Vzdálenosti jednotlivých rovingů v podélném a příčném směru
- Jemnosti vlákna
- Vzájemné orientace podélných rovingů ku příčným rovingům (0°; 22,5°; 45°; 67,5°)
- Tvaru průřezu vlákna (eliptický, plochý, kruhový)
- Dle úpravy průřezu vlákna (spřažené epoxidem či jinými materiály, nebo nespřažené)



Z důvodu množství druhů, průměrů a typů textilní výztuže byla zavedena některými výrobci specifikace textilní výztuže pomocí jednoduchého značení. [64]

YBB-000A-00-00

kde Y - materiál vláken (S - skleněná vlákna a K - karbon)

BB - materiál, kterým byla vlákna spřažena (EP - epoxid, SB - styrol-butadien)

000 - průřezová plocha textilie na metr běžný

A - značí uspořádání vláken (S - symetrická nebo O - obdélníková struktura). Pokud je symetrická struktura, stačí jedna hodnota vzdálenosti vláken.

00 - vzdálenost mezi jednotlivými vlákny v příčném a podélném směru

Příklad: KEP-140S-25, jedná se o karbonová vlákna spřažená epoxidem. Roviny mají vůči sobě navzájem symetrickou strukturou (čtvercová síť). Vzdálenost rovingů je 25 mm a průřezovou plochou 140 mm²/m. Jelikož jsou oka sítě čtvercová, píše se číslo 25 pouze jednou.

2.3.1 SKLENĚNÁ VLÁKNA

„Nejčastěji se vyrábí metodou sol/gel: Z disperze (solu) se těkáním rozpouštědla tvoří gel. Je to kapalina tak viskózní, že se chová jako pevná látka. Tepelným zpracováním za současného dloužení se vytváří kompaktní struktura, což je skleněné vlákno.“ [32]

Metody zvlákňování: [33]

- *„Zvlákňování přes trysky: Skelná tavenina při odtahování z trysky rychlostí 30-60 m/sek. tuhne. Jednotlivé filameny s jemností 4-13 μm se spojují do jednoho svazku, šlichtují a navíjí. Tímto způsobem se vyrábí více než 90% skleněných filamentů.*
- *Pro staplová vlákna se používá dvoufázová technologie. V prvním stupni se zhotovují z taveniny tzv. pelety, které se případně skladují a ve druhé fázi roztaví a zvlákňují tažením přes trysku s pomocí síťového bubnu rychlostí do 60 m/sek. [34]*
- *Foukání přes trysku. Odtah z trysky se provádí stlačeným vzduchem. Rychlostí 150-200 m/sek. se vytahují niti rozdílných délek a ukládají na síťový buben. Odtud se vlákenný materiál odtahuje, prochází olejovou mlhovinou a navíjí na cívku.*
- *Tažení tyčemi: 100-200 skleněných tyčí 150-190 cm dlouhých a o průměru 4-5 mm se taví na dolním konci při konstantním posunu. Odletující kapky táhnou vlákna a padají na buben, na který se rychlostí 40-50 m/sek. nitě navíjí, zatímco se kapky odhazují.*
- *Modifikované tažení tyčemi: Nitě, které leží na odtahovacím bubnu vedle sebe, se zvedají pomocí proudu vzduchu a vedou do sběrného kanálu. Zde se pak se lámou na různé délky, odtahují a vytváří pramen vláken, který se navíjí jako přást na cívku.“*



„Vlákno se dodává jako hladký nebo tvarovaný filament v tloušťce 400-4000 tex (s průměrem jednotlivých vláken od 6 μm) nebo jako skaná příze 400-2000 tex, případně s mosazným nebo chromovým jádrem, nebo jako stříž.“ [35]



Obrázek 24- Svazek skleněných filamentů, roving. [32]

2.3.2 ČEDIČOVÁ VLÁKNA

Čedičová vlákna jsou podobná vláknům skleněným i výrobní technologie je podobná. Oproti vláknům skleněným mají však hned několik výhod. Mezi tyto výhody patří především cena, která je až o 40% nižší. Další výhodou je například větší rozsah teplot, při kterých se dají tato vlákna používat, a to v rozmezí od -260 do +820 °C, skleněná vlákna mají teplotní rozsah od -60 do +600 °C. [36]

Jedná se o textilní vlákno získané z čedičové horniny. Čedič, nebo také basalt, je vyvřelá hornina. Vlákna jsou vyráběna z čedičové taveniny rozehřáté na 1500 °C – 1700 °C a to jednostupňovým tažením. Na materiál se během výroby vláken nanáší lubrikace, která snižuje mechanické poškození vláken při jejich vzájemném tření o sebe. Při mechanickém poškození výrazně totiž klesá pevnost vyráběných vláken. Po nanesení lubrikace se vlákna navíjejí. [36]

2.3.3 ARAMIDOVÁ VLÁKNA

Jedná se o textilní polymerové vlákno. Je vyrobeno z polyamidů, které jsou ve své struktuře tvořeny dlouhým uhlíkovým řetězcem. Jeho název pochází z názvu aromatický polyamid – aramid. [37]

Aramidové vlákno se vyrábí navíjením pevného vlákna z kapalného roztoku. Toto je umožněno obsahem iontové složky reakční směsi a vhodným rozpouštědlem. Iontová složka se váže na vodíkové můstky.

Aramidová vlákna se rozdělují na dvě základní skupiny:



- Meta-aramidy (metafenylen-izoftalamidy, zkráceně také MPIA), vynikající svou termickou odolností a elektroizolačními schopnostmi.
- Para-aramidy (p-fenylen-tereftalamidy, zkráceně PPTA) s podstatně vyšší pevností v tahu a vyšším modulem pružnosti.



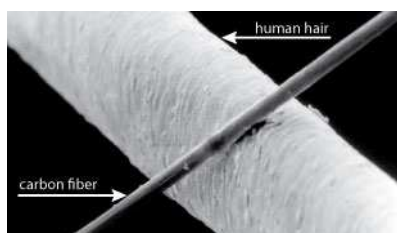
Obrázek 25- Aramidová stříž. [37]

2.3.4 UHLÍKOVÁ VLÁKNA

Uhlíkové vlákno, též karbonové vlákno, je druh vlákna obsahující uhlík v různých modifikacích.

Uhlíková vlákna jsou krystalická a podle technologie výroby se rozlišují dva typy. Prvním typem jsou Pitch-vlákna, k jejichž výrobě jsou jako prekurzory využívány smoly odpadající při destilaci ropy. Druhým typem, a to typem s lepšími mechanickými vlastnostmi, jsou PAN vlákna. Tyto vlákna jsou kvůli lepším mechanickým vlastnostem dražší, nežli Pitch-vlákna. U PAN vláken se vychází z polyakrylonitrilových vláken jako prekurzoru. [38], [39]

Uhlíková vlákna jsou odolná velmi vysokým teplotám, ale pouze v neoxidujícím prostředí. Pevnost se chová konstantně až do teploty 2000 °C, modul pružnosti s teplotou dokonce roste. Ale v oxidačním prostředí pevnost uhlíkových vláken rychle klesá a to již od teplot kolem 500 °C. [38]



Obrázek 26- Uhlíkové vlákno o průměru 6 μm v porovnání s lidským vlasem. [42]

Edison použil bambusovou dřevinu ke zhotovení prvního uhlíkového vlákna do žárovky v roce 1880. K současné výrobě se používají textilní vlákna jako surovina ve formě prekurzorů.



- Průmyslově byla první uhlíková vlákna vyrobena v roce 1957 z viskózy. Tato surovina má však výtěžek jen asi 25 %. V posledních letech se tímto způsobem vyrábí jen v Bělorusku a v Rusku. [40]
- Z polyakrylového vlákna pochází asi 90 % uhlíkových vláken z celkové světové produkce 45 000 tun (2009). S průmyslovou výrobou se začalo v roce 1971 v Japonsku.
- Za počátek výroby uhlíkových vláken ze smol (izotropních nebo mezofázových) se označuje rok 1976. Vyráběné množství, resp. podíl na celkové produkci není ve statistikách viditelný. Obzvláště výrobky z mezofázových smol se vyznačují podstatně vyšším modulem pružnosti a vyšší tepelnou vodivostí.
- V 90. letech minulého století se zkoušela výroba uhlíkových vláken z fenolaldehydových prekurzorů. Výrobky se vyznačovaly lepší přilnavostí k pryskyřicovým matricím (v kompozitech). [41]

Postup výroby uhlíkových vláken:

„V průběhu výrobního procesu se používají různé plyny a kapaliny. Některé z těchto materiálů jsou navrženy tak, aby reagovali s vláknem pro dosažení specifického účinku. Jiné materiály jsou navrženy tak, aby nereagovali, nebo je zabráněno určitým reakcím s vláknem. Stejně jako u prekurzorů, přesné kompozice mnoho z těchto zpracovávaných materiálů jsou považovány za obchodní tajemství.“ [42]

„Způsob výroby uhlíkových vláken je součástí chemické a mechanické části. Prekurzor je vtažen do dlouhých pramenů, nebo vláken. Potom se zahřívá na velmi vysokou teplotu, aniž by se dostal do kontaktu s kyslíkem. Bez kyslíku je vlákno nehořlavé. Místo toho, vysoká teplota způsobí, že se atomy ve vlákně prudce rozvíjejí, kromě atomů uhlíku. Tento proces se nazývá karbonizace a zanechává vlákna složená z dlouhých, těsně vzájemně uzamčených řetězců atomů uhlíku s jen několika jinými atomy.“ [42]

„Zde je typická sekvence operací použitých k vytvoření uhlíkových vláken z polyakrylonitrilu (PAN):“ [42]

– „Předení- Akrylonitril plastový prášek se smísí s dalšími umělými hmotami, jako je methylnakrylát nebo methylnmethakrylát, a nechá se reagovat s katalyzátorem v suspenzi nebo roztoku. Plasty se poté spřádají do vláken za použití jedné z několika různých metod. U některých metod se plast, smíchaný s některými chemickými látkami, čerpá do malých trysek do chemické lázně nebo chladicí komory, kde plast koaguluje a ztuhne do vláken. Tento postup je podobný postupu, použitého k vytvoření polyakrylového textilního vlákna. V jiných metodách se plastová směs zahřívá a čerpá do malých trysek do komory, kde se rozpouštědla odpaří a ponechají pevné vlákno. Krok zvláknění je důležitý, protože je během tohoto procesu vytvořena vnitřní atomová struktura vlákna. Vlákna se pak promyjí a protahují na požadovaný průměr vláken. Roztažení umožňuje sladit molekuly uvnitř vláken a poskytuje základ pro formování pevně vázaných uhlíkových krystalů po karbonizaci.“ [42]

– „Stabilizace- Předtím, než jsou vlákna karbonizována, musí být chemicky upravena tak, aby přenesla své lineární atomové vazby k více stabilní teplotě pro lepení. Toho je dosaženo zahříváním vláken ve vzduchu na asi 390 až 590 ° F (200 až 300 ° C) po dobu 30-120 minut. To



způsobí, že vlákna získají molekuly kyslíku ze vzduchu. Stabilizační chemické reakce jsou komplexní a zahrnují několik kroků, z nichž některé se vyskytují současně. Ale také vytvářejí své vlastní teplo, které je třeba kontrolovat, aby se zabránilo přehřátí vláken. Komerčně proces stabilizace používá různé techniky. V některých procesech, jsou vlákna čerpány přes sérii vytápěných komor. V jiných vlákna prochází přes horké válce a přes záhony sypaných materiálů uchovávaných v suspenzi pomocí proudu horkého vzduchu. Některé procesy používají ohřátý vzduch smíchaný s některými plyny, které chemicky urychlují stabilizaci.“ [42]

-„Karbonizace- Jakmile jsou vlákna stabilizována, zahřejí se na teplotu asi 1,830-5,500 ° F (1,000-3,000 ° C) na dobu několika minut v peci naplněné směsí plynů, která neobsahuje kyslík. Nedostatek kyslíku brání shoření vláken za ve velmi vysokých teplot. Tlak plynu uvnitř pece je udržován vyšší než vnější tlak vzduchu a místa, kde vlákna vstupují a vystupují z pece, jsou utěsněny, aby neucházel kyslík. Když se vlákna zahřívají, začínají ztrácet své atomy, kromě většiny atomů uhlíku, ve formě různých plynů, včetně vodní páry, amoniak, oxid uhelnatý, oxid uhličitý, vodík, dusík a další. Vzhledem k tomu zbývající atomy uhlíku, ve formě pevně vázaných krystalů uhlíku, jsou uspořádány více či méně rovnoběžně s dlouhou osou vlákna. V některých procesech se využívají dvě pece, které pracují při dvou různých teplotách. Ty se používají pro lepší řízení rychlosti ohřevu v průběhu karbonizace.“ [42]

-„Ošetření povrchu- Po karbonizaci mají vlákna povrch, který nemá dobrou soudržnost s epoxidy a dalšími materiály použitých v kompozitech. Pro lepší soudržnost vláken se jejich povrch mírně oxiduje. Přídavek atomů kyslíku na povrch poskytuje lepší chemické pojící vlastnosti, a také leptá a zdrsňuje povrch pro lepší mechanické lepení. Oxidace může být dosaženo ponořením vlákna do různých plynů, jako je vzduch, oxid uhličitý, nebo ozon. Nebo do různých kapalin, jako je chlornan sodný nebo kyselina dusičná. Vlákna mohou být také potaženy elektrolyticky tím, že vlákna jsou kladným pólem v lázni naplněné různými elektricky vodivými materiály. Způsob ošetření povrchu, musí být pečlivě kontrolován, aby se zabránilo vytváření drobných povrchových vad. Jako jsou důlky, které by mohly způsobit selhání vláken.“ [42]

-„Dimenzování- Po ošetření povrchu, se vlákna potahují, aby byly chráněny před poškozením při navíjení nebo tkaní. Nátěrové hmoty jsou zvoleny, aby byly kompatibilní s lepidlem, použitým k vytvoření kompozitních materiálů. Typické nátěrové hmoty mohou být epoxidové, polyester, nylon, urethanové, a další. Potažená vlákna jsou navinuta na válce, cívky. Cívky se umístí do spřádacího stroje a vlákna jsou stočena do nití různých velikostí.“ [42]



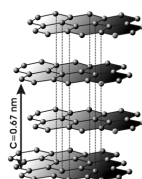
Obrázek 27- Textilní síť z uhlíkových vláken. [68]

2.3.5 UHLÍK

Chemická značka uhlíku je C a jeho latinský název je Carboneum. Jedná se o prvek, který je nepostradatelnou součástí všech organických sloučenin. V přírodě se čistý uhlík vyskytuje ve dvou přírodních modifikacích a to jako grafit (tuha) nebo jako diamant.

- Grafit: neboli tuha je nejčastější formou výskytu uhlíku v přírodě ve formě čistého uhlíku. Jedná se o vrstvený prvek, ve kterém jsou jednotlivé vazby spolu propojeny slabými interakcemi. Jedná se o měkký materiál. Uhlík se v této podobě využívá na výrobu tužek. Grafit je elektricky vodivý materiál.

Uměle vyráběnou formou uhlíku je skelný grafit. K jeho výrobě dochází pomocí přesně řízeného dlouhodobého vysokoteplotního rozkladu organických látek na povrchu přírodního grafitu. Jeho cena je poměrně vysoká. Velkou výhodou grafitu je jeho velké tepelná odolnost. [70]



Obrázek 28- Vrstvy ve struktuře grafitu. [69]

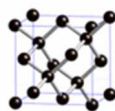


Obrázek 29- Grafit. [69]



Obrázek 30- Skelný grafit. [69]

- Diamant: je tvořen uhlíkem, který krystalizoval v krychlové soustavě. Jedná se o nejtvrďší nerost. Je to vysoce ceněný přírodní produkt, a z toho důvodu se diamanty vyrábějí synteticky. Diamant je nevodivý materiál a odolný vůči vysokým teplotám, také je vysoce mechanicky i chemicky odolný.



Obrázek 31- Uhlík krystalizující v krychelné soustavě- diamant. [69]



Obrázek 32- Broušené diamanty. [69]

2.3.6 POROVNÁNÍ NĚKTERÝCH TEXTILNÍCH VLÁKEN

V této kapitole provedu srovnání základních materiálů pro výrobu textilních výztuží.

VYSOKÁ PEVNOST- Textilní vlákna mají oproti běžné betonářské výztuži zhruba dvojnásobnou pevnost v tahu. Z tohoto důvodu může být textilní výztuž náhražkou dnes využívaných výztuží do betonu.

NÍZKÁ HMOTNOST- Objemová hmotnost textilních výztuží je cca 4,5 krát nižší než je u běžně využívané betonářské oceli. Díky tomuto lze s takovýmto typem vyztužení snadno manipulovat i bez zvedací techniky. Tak může dojít ke značné úspoře finančních prostředků.

ODOLNOST PROTI KOROZI- Materiály, z nichž jsou vytvořena textilní vlákna, jsou odolné vůči atmosférické korozi. Dále jsou odolné proti korozi způsobené chemikáliemi, oleji, bakteriemi, vodou atd. Proto není potřeba jejich povrch dále upravovat, jako třeba opatřovat ochrannými povlaky, nebo nátěry.



TEPELNÁ A POŽÁRNÍ ODOLNOST- Textilní vlákna jsou odolná vůči rozsáhlé stupnici teplot. Každý materiál to má trochu jinak, ale celkově jsou odolnější proti vysokým teplotám oproti běžně využívané oceli. Jejich dalšími důležitými vlastnostmi jsou nízká tepelná vodivost a rozměrová stálost.

ELEKTRICKÉ VLASTNOSTI- Textilní vlákna jsou elektricky nevodivá.

Mechanické vlastnosti vláken se dle výrobců a zdrojů liší. Zde uvádím alespoň přibližné hodnoty.

Druhy skla: E (Electric), S (strength), C (corrosion), D (dielectric)

Tabulka 2-Vlastnosti skleněných vláken. [43]

složení	Jednotka	E-sklo	S-sklo	D-sklo	C-sklo
SiO ₂	%	53-55	60	72-75	60-65
Al ₂ O ₃	%	14-15	24	-	<6
B ₂ O ₃	%	6-8	-	<23	<7
CaO	%	17-22	9	-	14
MgO	%	<5	6	-	<3
K ₂ O,Na ₂ O	%	<1	<0,5	<4	8-10
Ost.oxidy	%	1	-	<1	<1,5
Hustota	g/cm ³	2,6	2,53	2,14	2,45
Pev. v tahu	MPa	3400	4400	2500	3100
E-modul R _m	GPa	73	86	55	70
Tažnost	%	3,5-4	4,5	3	3,5-4
Spec.el.odpor	ohm/cm	1015	1014-1015	-	1014-1018
Koef.Tep.rozt.	10E-6K	5	4	2-3	7,2

Tabulka 3- Vlastnosti aramidových vláken. [43]

	Jednotka	Nízkomodulová (LM)	Vysokomodulová (HM)
Hustota	g/cm ³	1,44	1,45
Pev. v tahu	MPa	2800	2900
E-modul R _m	GPa	59	127
Tažnost	%	4	1,9
Spec.el.odpor	ohm/cm	1015	1015



Koef.tep.rozt.	10E-6K	-2,3	-4,1
Absorpce vlhkosti	%	7	3,5
Výrobce	DuPont	Kevlar 29	Kevlar 49
	Akzo	Twaron LM	Twaron HM

Tabulka 4- Vlastnosti uhlíkových vláken. [43]

	Jednotka	Vysokopevnostní (HS)	Vysokomodulová (HM)
Hustota	g/cm ³	1,79	1,8
Pev. v tahu	MPa	5400	2350
E-modul R _m	GPa	290	358
Tažnost	%	1,7	0,6
Spec.el.odpor	ohm/cm	----	1x10E-3
Koef.tep.rozt.	10E-6K	----	-0,5
Tepelná vodivost	W/m K	----	710

Tabulka 5- Srovnání pevností, modulu pružnosti a hustoty vláken. [43]

Materiál	E (GPa)	R _m (MPa)	q(g/cm ³)
E-sklo	72,4	3500	2,54
S-sklo	85,5	4600	1,48
Uhlík (HM)	390	2100	1,9
Uhlík (HS)	240	2500	1,9
Kevlar 49	130	2800	1,5
Bór	385	2800	2,65
Ocel	210	340-210	7,8
Al-slitiny	70	140-620	2,7



Kevlar je výrobní značka para- aramidových vláken.

EPOXIDOVÉ PRYSKYŘICE

Pro vláknové kompozity jsou nejpoužívanější epoxidové pryskyřice. Ty pojí jednotlivá vlákna k sobě a zároveň je tak i chrání. Epoxidové pryskyřice mají velmi dobrou přilnavost k povrchu vláken a soudržnost s nimi. Dále mají také malé vnitřní pnutí a malé smršťování jak při zpracování, tak i během vytvrzování. [43]

Kombinace různého druhu tvrdidla a různého typu pryskyřice má za následek různé vlastnosti směsi při jejím zpracování. Lze tak ovlivnit především dobu zpracovatelnosti směsi, její vytvrzovací teplotu, dobu samotného vytvrzování, nebo popřípadě dostatečné dotvrzení za zvýšené teploty. [43]

Tabulka 6-Vlastnosti epoxidových pryskyřic (Epoxidová pryskyřice LF a tvrdidla řady LF firmy R&G). [43]

Vlastnosti	Jednotka	Laminační pryskyřice LF	Tvrdidlo LF1	Tvrdidlo LF2	Tvrdidlo LF3
Hustota	g/cm ³ /20°C	1,15	0,95	0,96	0,98
Viskozita	mPas/25°C	600	300	400	100
Epoxid.ekv.	100/ekv.	0,6	---	---	---
Aminový ekv.	g/ekv.	---	65	65	65
Směšov.poměr	g	100:	38	38	38
Směšov.poměr	ml	100:	45	45	45
Život.směsi	min	---	50	90	120

Tabulka 7- Výsledné vlastnosti vytvrzelé pryskyřice. [43]

Vlastnosti	Jednotka	Letecký standard	Pryskyřice LF+Tvrdidlo LF1	Pryskyřice LF+Tvrdidlo LF2	Pryskyřice LF+Tvrdidlo LF3
Hustota	g/cm ³	---	1,15	1,15	1,15
Ohyb. pevnost	MPa	90	118	110	115
Pevnost v tahu	MPa	55	79	75	73
Rázová pevnost	kJ/m ²	---	46	52	50
Tažnost	%	---	4,8	4,7	5,3



Pevnost v tlaku	MPa	120	126	132	129
E-modul	MPa	2,8x10E3	3,4x10E3	3,3x10E3	3,3x10E3

Tabulka 8- Výsledné vlastnosti kompozitu: Pryskyřice LF + skleněná vlákna: 16 vrstev tkaniny Interglas 92 626 (296 g/m²), vytvrzeno 24 hodin za pokojové teploty a dotvrzeno 15 hodin za teploty 50-55 °C. [43]

Vlastnosti	Jednotka	Pryskyřice LF+Tvrdidlo LF1	Pryskyřice LF+Tvrdidlo LF2	Pryskyřice LF+Tvrdidlo LF3
Pevnost ve smyku	MPa	41	38	38
Ohyb. pevnost	MPa	484	483	492
Pevnost v tahu	MPa	485	485	485
Pevnost v tlaku	MPa	315	321	325
E-modul	MPa	21x10E3	21x10E3	21x10E3

Tabulka 9- Pryskyřice LF + uhlíková vlákna: 8 vrstev R&G uhlíkové tkaniny 200g/m², vytvrzeno 24 hodin za pokojové teploty a dotvrzeno 15 hodin za teploty 50-55 °C. [43]

Vlastnosti	Jednotka	Pryskyřice LF+Tvrdidlo LF1	Pryskyřice LF+Tvrdidlo LF2	Pryskyřice LF+Tvrdidlo LF3
Pevnost ve smyku	MPa	51	48	48
Ohyb. pevnost	MPa	712	693	711
Pevnost v tahu	MPa	383	350	362
Pevnost v tlaku	MPa	383	350	362
E-modul	MPa	48x10E3	45x10E3	46x10E3

Tabulka 10- Pryskyřice LF + aramidová vlákna: 8 vrstev R&G kevlarové tkaniny, vytvrzeno 24 hodin za pokojové teploty a dotvrzeno 15 hodin za teploty 50-55 °C. [43]

Vlastnosti	Jednotka	Pryskyřice LF+Tvrdidlo LF1	Pryskyřice LF+Tvrdidlo LF2	Pryskyřice LF+Tvrdidlo LF3
Pevnost ve smyku	MPa	28	29	29
Ohyb. pevnost	MPa	349	339	344
Pevnost v tahu	MPa	508	479	503
Pevnost v tlaku	MPa	138	135	147

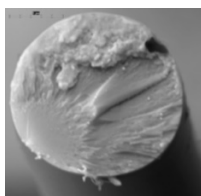


E-modul	MPa	30x10E3	26x10E3	29x10E3
---------	-----	---------	---------	---------

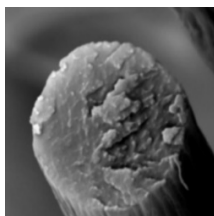
MECHANISMUS PORUŠENÍ VLÁKEN [44]

Porušení vláken sledujeme na tvaru lomové plochy vlákna. K této lomové ploše dochází v důsledku tahového namáhání. Pro vlákna, skleněná a uhlíková je typický křehký lom.

Křehkému lomu předchází trhlinka nebo defekt na vlákně v místě, kde se koncentruje napětí. Toto napětí způsobuje růst této trhliny (zrcadlová plocha na lomové ploše) a vznik dalších trhlin, nakonec dochází k lomu vlákna.



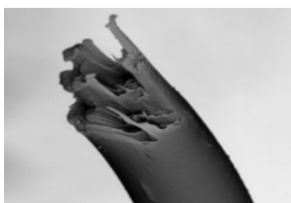
Obrázek 33- Křehký lom skleněného vlákna. [44]



Obrázek 34- Křehký lom uhlíkového vlákna. [44]

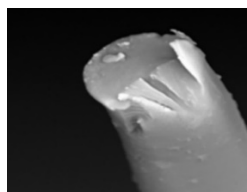
U většiny vláken ze syntetických materiálů zvlákněvaných z taveniny dochází při namáhání k houževnatému lomu.

U houževnatého lomu je charakteristické pomalé šíření trhliny, pro které je typický „V“ zářez na lomové ploše vlákna. Tento zářez je doprovázen plastickým kluzem na druhé straně vlákna od „V“ zářezu, což způsobí jeho přetržení.



Obrázek 35- Houževnatý lom PES vláken. [44]

PES vlákna- jedná se o mezinárodní zkratku polyesterových vláken



Obrázek 36- Houževnatý lom PES vláken. [44]

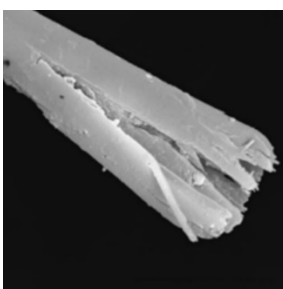
U vláken z vysoce pevných materiálů, jako jsou vlákna z aromatických polyamidů PBO atd., dochází k typickému axiálnímu štěpení. Toto štěpení je důsledkem povrchového poškození vlákna, přičemž při tomto porušení dochází ke smykovému napětí. Při smykovém napětí dochází k oddělování polymerních řetězců, jelikož jsou meziřetězcové vazby výrazně slabší. Délka štěpu je zhruba 100 násobek průměru vlákna. Z původního jednoho štěpení se postupně oddělují další fibrily, to znamená, že se štěpení větví. Vlivem takového postupného dalšího štěpení se průměr vlákna v místě přetržení pohybuje kolem 2 – 4 μm , což je asi 3 – 6 x méně než byl původní průměr vlákna před jeho porušením.



Obrázek 37- Axiální štěpení u PBO vlákna. [44]



Obrázek 38- Axiální štěpení u aramidového vlákna- Kevlar. [44]



Obrázek 39- Axiální štěpení u aramidového vlákna- Nomex. [44]

U vláken, která se vyrábějí zvlákňováním z roztoku a vláken s mikro-póry, která obsahují síť mikro dutin, je typický granulární lom. Při napětí vzniklém namáháním vlákna dochází k šíření trhliny vlivem přenášením napětí, nikoli přímočaře. Důsledkem tohoto přenášení napětí je praskání postupně jednotlivých vláknových elementů v okolí takovéto trhliny. Takovýto typ porušení- granulární lom je charakteristický pro taková keramická a uhlíková vlákna, která mají mikro-póry nebo síť slabých míst v průřezu vlákna.

Křehký lom všeobecně způsobuje rychlé porušení vlákna, na které teoreticky není předem upozorněno. Je tedy nežádoucí a snažíme se mu zamezit. Oproti tomu houževnatý lom a axiální štěpení jsou pomalejší jevy, jelikož vlákna v těchto případech jsou schopna pojmout více energie, než dojde k jejich přetržení.



Obrázek 40- Granulární lom u lyocelových vláken. [44]

2.4 PŘÍKLADY VYUŽITÍ TEXTILBETONU

V dnešní době se textilní vlákna ve stavebnictví používají především na sanace stavebních konstrukcí. Jedná se o zesilování konstrukcí pomocí lamel, nebo tyčí. Tyto výztužné prvky se vkládají jako lamely k vnějšímu povrchu konstrukce, nebo jako tyče do připravených drážek v konstrukci. Takovýto způsob sanace praktikuje například firma STADO CZ s.r.o., která využívá jako textilního materiálu uhlíkových vláken.

„Zesilování konstrukcí pomocí CFRP lamel (uhlíkové lamely): Carbo®CFRP uhlíkovo-vláknité lamely jsou jednosměrná uhlíková vlákna laminována s minimálním obsahem vláken 68%. Lamely jsou vyrobeny z pečlivě seřazených uhlíkových vláken, obalených v Bisphenolu A, který je na bázi za tepla tuhnoucí vinyl esterové pryskyřice. Toto složení poskytuje skvělou životnost a odolnost proti nepřízní počasí a proti korozi. Jsou dodávány v pásech s odlepovací vrstvou na obou stranách, jejímž odstraněním, je povrch lamel vhodný pro spojení s podkladem a to bez jakéhokoli dalšího čištění nebo ošetření. Vysoce účinné uhlíkovo-vláknité CFRP lamely byly speciálně navrženy pro aplikace spolu s velmi kvalitním epoxidovým lepidlem Carbo®Resin ke konstrukčnímu posílení staveb. Technologie uhlíkových materiálů vytváří řešení, jak posílit podlahy, stěny, nosníky, sloupy a jiné stavební prvky, které jsou narušené chátřením, dodatečným zatížením nebo nadbytečným průhybem. Potřeba navýšení kapacity zatížení může vzniknout z důvodu poničení stavebních prvků, konstrukcí nebo v důsledku projektových chyb, změn v navrhovaných předpisech či v důsledku změny použití.“ [45]



Obrázek 41- Dodatečné vyztužení konstrukce pomocí uhlíkových lamel. [45]

„Zesilování a zajištění konstrukcí pomocí Carbo Bar systému: Carbo Bar (uhlíkové tyče) v průměrech 6,8,10 mm vytváří spolu s kvalitním epoxidovým lepidlem Carbo®Resin výztužný systém, který se aplikuje do předem připravené drážky, vrtu. Výhodou systému z uhlíkových materiálů je výrazně nižší hmotnost, jednoduchá aplikace, minimální aplikační tloušťka, vysoká pevnost v poměru k váze, bez koroze, skvělá dlouhodobě ověřená životnost a minimální údržba, jednoduchá aplikace.“ [45]



Obrázek 42- Dodatečné vyztužení konstrukce pomocí uhlíkových tyčí. [45]

Dále jsou v dnešní době využívány textilní výtzuže pro vrchní část vozovek a podlah.

Také už bylo postaveno mnoho prvků z textilbetonu, kdy se jednalo především o tenkostěnné prvky, které nenesou velké zatížení. Šlo tedy o prvky nenosné pohledové, jako jsou například fasádní panely.



Obrázek 43- Fasádní panely z textilbetonu. [46]



Obrázek 44- Fasádní panely z textilbetonu. [17]



Takovéto fasádní panely byly zhotoveny pro novou budovu fakulty TU Dresden (TU = Technické univerzity). Jejich rozměry jsou 1,2 x 2,4 m a tloušťka je 30 mm. jednalo se celkem o 530 prvků. Výztužemi byly 3D textilní tkaniny. Kdyby byly tyto panely vyrobeny běžným způsobem ze železobetonu, jejich tloušťka by byla 140 mm. Výhod v textilbetonovém zhotovení je hned několik. Mezi tyto výhody patří například tenčí a lehčí konstrukce, což znamená snazší manipulaci, dopravu a montáž. Díky tenčím konstrukcím mohou být použity větší izolace, aniž by to mělo dopad na celkový rozměr konstrukce a interiérového prostoru. Respektive tenčí obvodový plášť umožní větší interiéry. Dále má nižší hmotnost samozřejmě i nižší statické požadavky. Celkově je zapotřebí méně betonu, a tak i menší náklady na výrobu betonové směsi i na její dopravu a případně i na budoucí likvidaci konstrukcí z ní zhotovených. Z ekologického hlediska se jedná o snížení množství emisí uhlíku.



Obrázek 45- Fasádní panely z textilbetonu, TU Dresden. [47]

Mezi další zhotovené nenosné konstrukce z TRC patří městský mobiliář, který se z takto zhotoveného kompozitu dá umístit i na místa, kde by běžné betonové prvky měli problém se svou životností. U nás se výrobou takovýchto prvků z textilbetonu zabývá firma Gravelli, jedná se především o výrobou prvků pro využití v interiérových prostorách. Jako výztužnou textilii firma Gravelli využívá tkaninu ze skleněných vláken. Čerstvou betonovou směs převážně aplikuje nástřikem. Výsledný povrch prvků po vytvrdnutí brousí, leští a opatřuje jej několika vrstvami nátěrů, včetně nátěrů ochranných. [48]



Obrázek 46- Textilbetn, „Trio set“ od Gravelli. [48]



Obrázek 47- Textilbetn, "Simply" od Gravelli. [48]



Obrázek 48- Textilbeton "Zephyr" od Gravelli. [48]

Další možnou alternativou pro využití TRC je na výrobu kanalizačních a jiných trub, které mají vyšší odolnost vůči alkáliím, chemikáliím a dalším agresivním účinkům. Výhodami takovýchto trub jsou jejich nízká hmotnost, odolnost a cenová přijatelnost.

Také se z textilbetonu vyrábí zařizovací předměty, jako například umyvadla. Nebo různé dekorativní předměty jako šperky, vázy, sochy, svítidla a užitné předměty jako vázy, ořezávátka, střešní tašky, podlahové dlaždice atd.



Obrázek 49- Textilbeton, "SLANT 07 double" od Gravelli. [49]

O prosazení využívání TRC v praxi usiluje společnost Tudalit, která sídlí v Drážďanech. Tato společnost sdružuje některé výrobce textilních vláken, univerzity a stavební firmy.



Dalším způsobem využití textilbetonu v praxi mohou být skořepinové konstrukce různých tvarů. Velkou výhodou je estetická hodnota takto zhotovených konstrukcí. Ostatní výhody jsou vesměs shodné s výhodami u již zmíněných fasádních panelů.



Obrázek 50-Textilbeton, pavilon v Löbau. [50]

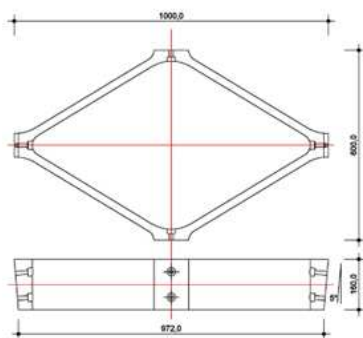


Obrázek 51- Textilbeton, pavilon. [51]

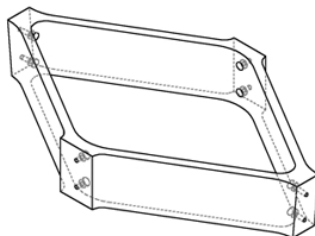
Dalším příkladem užití textilbetonu ve stavebnictví jsou konstrukce příhradové. Například konstrukce z kosočtvercových prvků spojených šroubovými spoji. Tato konstrukce dosahuje rozpětí do 10 m a výškou ve vrcholu 3 m. Rozměry jednoho stavebního dílce jsou 100 x 600 x 160 mm. [52]



Obrázek 52- Textilbeton, příhradová konstrukce. [52]



Obrázek 53- Textilbeton, příhradová konstrukce. [52]



Obrázek 54- Textilbeton, příhradová konstrukce. [52]

Textilbeton byt již využit i v dopravním stavitelství při stavbě několika mostů. Jedním z prvních takovýchto mostů na světě je lávka pro pěší a cyklisty v Kemptenu v Bavorsku, která byla postavena v roce 2006. Konstrukce je tvořena jako předepnutá z 18 prefabrikovaných segmentů. Tyto segmenty jsou průřezu „U“ délky 930 mm a výšky 1350 mm. Segmenty jsou proměnné tloušťky, přičemž v nejtenčím místě činí tloušťka pouhých 30 mm. V horních krajích segmentů, v místě ukončení zábradlí, je umístěno po jednom předpínacím ocelovém lanu. Dále je ve spodních rozích segmentů po dvou takovýchto lanech. Celkem má tedy lávka 6 předpínacích lan. Rozpětí lávky činí 16,74 m a šířka průchozího profilu je 2 m. Celková hmotnost lávky je 12,5 tuny, což je asi 1/3 hmotnosti takovéto lávky zhotovené z běžného železobetonu. [62]

Téměř totožný most, první svého druhu, se nachází v saském Oschatz. Takových to lávek je postaveno již více.



Obrázek 55-Textilbeton, lávka ve městě Kempten. [53]

Dalším příkladem mostu z TRC je lávka v městečku Albstadt – Lautlingen. Celková délka této mostní konstrukce dosahuje téměř 100 m. konstrukce je tvořena ze 7 polí, které jsou konstruovány jako jednotlivé prosté nosníky o maximálním rozpětí 17 m. Každý tento jednotlivý nosník má konstantní zakřivení střednice a v příčném řezu je tvořen ze sedmi trámců a dvou krajních konzol. Trámce mají výšku 435 mm a krajní konzoly mají výšku proměnou od 90 mm do 120 mm. Nosníky jsou vyztuženy skleněnými 2D sítěmi z vláken o průměru 2 mm a pevností v tahu 1000 MPa. Vzdálenosti vláken v síti jsou 15 mm. Z tohoto důvodu byla zvolena jemnozrnná betonová směs s maximální velikostí zrna do 4 mm. [54]



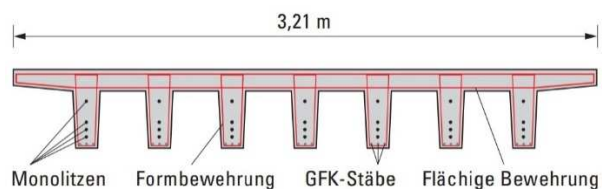
Obrázek 56- Textilbeton, pohled na most v Lautingen. [54]



Obrázek 57-Textilbeton, pohled zespodu na most v Lautingen. [54]



Ve spodních dvou rozích trámů jsou umístěny tři pruty o průměru 16 mm ze skleněných vláken, do každého rohu jeden. Každý nosník byl dále předepnut čtyřmi lany v řadě nad sebou. Velikost krycí vrstvy v místech nekovové výztuže je pouze 15 mm.



Obrázek 58 Textilbeton, náčrtek řezu mostu v Lautingen. [54]



Obrázek 59 Textilbeton, vrchní pohled na most v Lautingen. [55]



Obrázek 60 Textilbeton, skleněná výztuž mostu v Lautingen. [55]



2.5 POROVNÁNÍ VYZTUŽENÝCH BETONŮ

Tabulka 11- Porovnání vyztužených betonů. [68]

	ŽELEZOBETON	PŘEDPJATÝ BETON	VLÁKNOBETON	DRÁTKOBETON	TEXTILBETON
ÚSPORA BETONU	Ne.	Ano.	Ne.	V některých případech ano.	Ano- vyšší pevnost a snížení krycí vrstvy.
ROZMÍSTĚNÍ VÝZTUŽE	Cíleně v místě tahového namáhání.	Cíleně v místě tahového namáhání.	Není nosná výztuž. Náhodné rozmístění vláken a neschopnost identifikace jejich rozmístění a orientace předem.	Rovnoměrně po průřezu. Lze říci, že ve směru namáhání působí pouze 1/3 drátků (orientace drátků ve 3D). Náhodné rozmístění drátků a neschopnost identifikace jejich rozmístění a orientace předem.	Cíleně v místě tahového namáhání.
OCHRANA VÝZTUŽE	Vysoké požadavky na krytí výztuže a na zajištění její odolnosti z důvodu možné agresivity prostředí.	Vysoké požadavky na krytí výztuže a na zajištění její odolnosti z důvodu možné agresivity prostředí.	Nekorodující výztuž. Některé druhy vláken odolné vůči agresivnímu prostředí.	Vysoké požadavky na krytí výztuže a na zajištění její odolnosti z důvodu možné agresivity prostředí.	Nekorodující výztuže odolná vůči agresivnímu prostředí.
ÚNOSNOST	Obecně dobrá únosnost.	Zvýšená únosnost.	Zvyšuje únosnost v tahu	Pro prvky s menším zatížením.	Zvýšená únosnost.
FINANČNÍ NÁROČNOST	Cenově snadno dostupný.	Dražší výztuž.	Dražší výztuž.	Dražší výztuž. Možná úspora na množství betonu, na	Dražší výztuž. Úspora na množství betonu, na



				uskladnění, montáži a dopravě výztuže.	uskladnění, montáži a dopravě výztužných prutů.
EFEKTIVITA	Vysoká efektivita.	Vysoká efektivita.	Menší efektivita.	Menší efektivita.	Vysoká efektivita.
ROZMĚR KONSTRUKCE	Běžný rozměr.	Subtilnější konstrukce.	Běžný rozměr.	Možné ztenčení konstrukce (v některých případech).	Výrazné ztenčení konstrukce.
DALŠÍ	-	Zvýšená náročnost provádění.	Omezení vzniku a šířky trhlin. U některých materiálů výztuže zvýšení požární odolnosti. Vlákna i v okrajových částech konstrukce zabraňují odprýskávání rohů a hran betonových prvků.	Omezení vzniku a šířky trhlin. Vyztužení i špatně dostupných míst konstrukce, snazší vyztužení složitých průřezů. Drátky i v okrajových částech konstrukce zabraňují odprýskávání rohů a hran betonových prvků.	Omezení vzniku a šířky trhlin. U některých materiálů výztuže zvýšení požární odolnosti.



3 JEMNOZRNNÝ BETON

Jak již bylo zmíněno, z důvodu dobrého probetonování výztužných sítí a prvků o malých průřezích, pro zajištění dostatečné soudržnosti, se do textiltbetonu využívá jemnozrnný beton s frakcí kameniva do 4 mm, obvykle okolo 1 mm. Jemnozrnné betony se řadí mezi betony vysokohodnotné. Obsahem cementu se pohybují kolem 500 kg/m^3 . Do lehkého betonu se přidávají plastifikátory, dále obvykle fluidní popílek a mikrosilika. Složení betonové směsi závisí na aktuální potřebě (např. na velikosti průřezu a zvolené výztuži).

V porovnání s běžným betonem má jemnozrnný beton vyšší objemovou hmotnost a menší modul pružnosti. Dále se jemnozrnný beton chová v osovém tahu méně duktilněji nežli běžný beton. Toto je důsledkem vyššího obsahu pojiv a jemných částic ve směsi jemnozrnného betonu.

Jemnozrnné betony vykazují vyšší smršťování a dotvarování než betony s hrubším kamenivem.



4 LEHKÝ BETON

Lehký beton ve zkratce LC z anglického překladu light-weight concrete se definuje dle normy ČSN EN 206-1 Beton- Část 1: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda [56] jako kompozitní materiál. Objemové hmotnosti lehkého betonu se určují na betonu vysušeném v sušárně. Tato objemová hmotnost se u lehkých betonů pohybuje od 800 kg/m^3 do 2000 kg/m^3 .

Zmenšování hmotnosti betonu se provádí několika způsoby: [57]

- **Přímo:** vnesením vzduchu do cementového tmelu (pomocí pěnotvorných přísad).
- **Nepřímo:** pomocí umělého nebo přírodního pórového kameniva, nebo pomocí přidání vylehčujících organických surovin (korek, piliny) do cementového tmelu.
- **Kombinací:** pomocí kombinace obou zmíněných vylehčujících metod, jako například použití pórového kameniva a pěnotvorné přísady.

4.1 ZNAČENÍ LEHKÝCH BETONŮ

Značení lehkého betonu je vesměs shodné se značením běžného betonu.

Dle třídy betonu v tlaku: [56]

Např. LC 35/38

- LC: značí druh betonu, jak již bylo zmíněno z anglického překladu light-weight concrete.
- 35: První číslo (před lomítkem) značí charakteristickou pevnost v tlaku měřenou na normalizovaném válci výšky 300 mm a průměru 150 mm ve stáří 28 dnů. Značí se $f_{ck,cyl}$ [MPa].
- 38: Druhé číslo (za lomítkem) určuje charakteristickou pevnost v tlaku získanou na normalizované krychli o hranách délky 150 mm ve stáří 28 dnů. Značí se $f_{ck,cube}$ [MPa].

Dle objemové hmotnosti: [56]

Objemová hmotnost celé betonové matrice, a to včetně všech dutin a pórů v ní obsažených, musí být u LC maximálně do 2000 kg/m^3 a to dle normy ČSN EN 206-1.



Tabulka 12- Tabulka značení LC dle objemové hmotnosti. [56]

	D 1,0	D 1,2	D 1,4	D 1,6	D 1,8	D 2,0
γ [kg/m ³]	800 - 100	1000 - 1200	1200 - 1400	1400 - 1600	1600 - 1800	1800 - 2000

4.2 DRUHY LC PODLE ZPŮSOBU VYLEHČENÍ

- Lehké mezerovité betony:

Lehké mezerovité betony se vyrábí přidáním pórovitého kameniva do betonové směsi, přičemž se vynechají drobné frakce tohoto kameniva a sníží se podíl cementového tmelu. Díky tomuto omezení jemných částic vznikne ve struktuře betonu velké množství mezer.

Pevnost takového betonu se obvykle pohybuje v rozmezí od 1 do 10 MPa a objemová hmotnost od 500 – 1500 kg/m³. Výhodou konstrukce zhotovené z lehkého mezerovitého betonu je odolnost proti mrazu a malé smrštění. Některé normy ale zakazují použití mezerovitého betonu s nosnou výztuží, jiné toto připouštějí, ale se zajištěním ochrany výztuže proti její korozi. [57],[58]

- Lehké hutné betony s pórovitým kamenivem:

U takového typu betonů se vylehčení dosahuje přidáním pórového kameniva. Nejedná se tedy o vylehčení cementového tmelu, póry se nachází pouze ve struktuře kameniva, které je obaleno hutným cementovým tmelem. Pórovitým kamenivem může být například Liapor, což je obchodní název pro expandovaný jíl, tzv. keramzit.

- Lehké pórovité betony:

Jedná se o druh betonu, který je vylehčen přímo ve struktuře cementového tmelu a to přidáním pěnotvorné přísady, nebo pomocí plynotvorné látky. Struktura tohoto typu betonu je jemnozrnná a neobsahuje tedy hrubou frakci kameniva. Tyto betony jsou známy jako pórobetony (např. tvárnice Ytong).

4.3 VLASTNOSTI LEHKÝC BETONŮ

Lehké betony mají spoustu výhod oproti běžným betonům. Mezi tyto výhody patří především nižší objemová hmotnost, která má vliv na celkové zatížení budované konstrukce. Toto vylehčení má vliv i na snížení finanční náročnosti při montáži a přepravě prefabrikovaných prvků z tohoto betonu. Další významnou výhodou je nižší tepelná vodivost a vyšší mrazuvzdornost.

Mezi nevýhody se řadí vyšší křehkost oproti betonům s klasickým kamenivem. Také vykazuje nižší modul pružnosti a nižší teplotní roztažnost, což má pozitivní vliv na riziko vzniku trhlin. Oproti



tomu nižší tuhost má za následek zvýšení deformací., tedy smršťování a dotvarování lehkého betonu oproti betonu s klasickým kamenivem.

Lze konstatovat, že vzhledem k objemové hmotnosti, mají lehké betony dobrý modul pružnosti a dosahují vysokých pevností. [59]

Jelikož je obvykle pevnost pórovitého kameniva nižší než pevnost samotného tmelu, je pevnost výsledného betonu převážně závislá na pevnosti cementového pojiva. Celkově lze říci, že pevnost betonu roste s jeho objemovou hmotností. [71]

Za použití pouze Liaporu, jakožto vylehčujícího kameniva do betonu, bude mít výsledný prvek celkem nízké pevnosti v tlaku. Pokud, požadujeme vyšší pevnosti v tlaku, je nutné použít jako plniva kombinaci pórovitého kameniva s přírodním hutným kamenivem. [60]



5 LEHKÉ KAMENIVO LIAPOR

Jedná se o lehké keramické kamenivo vyráběné výpalem a expandováním přírodních jíílů, tzv. keramzit, jehož obchodní název je Liapor. Jedná se o velmi lehký materiál ve formě granulátu. Jeho výhody jsou především nízká objemová hmotnost, dobré tepelně izolační schopnosti, odolnost proti mrazu, odolnost proti ohni, pevnost, trvanlivost a zdravotní nezávadnost. Liapor je granulát s téměř kulovými zrny s vnitřní stejnoměrnou pórovitou strukturou a uzavřeným slinutým povrchem. [61]



Obrázek 61- Lehké kamenivo Liapor. [61]



6 CÍL DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem této diplomové práce je představení méně známého kompozitního materiálu, kterým je textilbeton. Především tedy jeho využití v subtilních konstrukcích. Z tohoto důvodu budou zhotoveny tenkostěnné desky vyztužené textilními sítěmi z uhlíkových vláken. Podrobněji jsem se k definici textilbetonu (novodobého materiálu), druhů materiálů pro výztužné prvky pro textilbeton a samotné typy výztužných prvků vyjadřovala v předchozích kapitolách.

Textilbeton byl již zkoumán v tenkostěnných deskách již dříve, ale převážně za použití UHPC. Některé výsledky zkoušek na tenkostěnných deskách, získané od jiných zdrojů, jsou pro srovnání s vlastní experimentální tvorbou uvedeny v kapitole č. 7.

Jelikož je celková snaha o odlehčení konstrukcí, tak se má práce zaměřuje na textilbeton zhotovený z lehkého betonu. Tento lehký beton je vylehčen pomocí kameniva Liapor. Z tohoto důvodu se všeobecně o lehkém betonu a Liaporu také zmiňuji v předchozích kapitolách.

V následující experimentální části se zaměřuji na tvorbu vzorků tenkostěnných desek z lehkého betonu, vyztužených textilními sítěmi z uhlíkových vláken. Dále také na zkoušení těchto vzorků a získání tak mechanických vlastností.



7 VÝSLEDKY ZKOUŠEK Z JINÝCH ZDROJŮ

Data uvedená v následující tabulce jsou získána z diplomové práce Kateřiny Liškové, tedy ze zdroje č. 63.

Tabulka 13- Naměřené maximální síly při zkoušce tříbodovým ohybem na deskách o rozměrech 600/400/18 mm. [68]

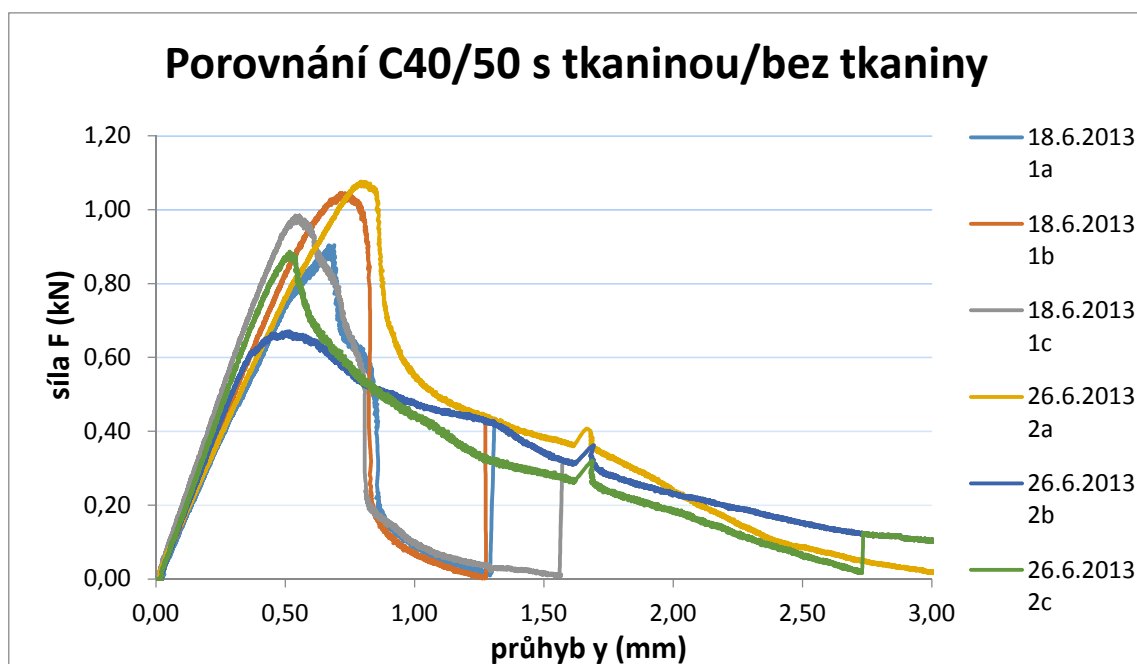
Naměřené maximální síly při zkoušce tříbodovým ohybem na deskách o rozměrech 600/400/18 mm. Hodnoty z diplomové práce Kateřiny Liškové- zdroj č. 63.			
F [kN]	Beton	Tkanina	Poznámka
0,9 až 1,1	C 40/50	Bez tkaniny	1a, 1b, 1c <i>Horizontální bednění.</i>
0,65 až 1,25	C 40/50	S čedičovou tkaninou	2a, 2b, 2c <i>Horizontální bednění.</i> <i>„Při porušení desky bylo zjištěno, že se tkaniny posunula ke středu desky. Dále bylo zjištěno, že deska měla při horním povrchu nepatrné trhliny.“</i>
1,35 až 1,7	UHPC	Bez tkaniny	3a, 3b, 3c <i>Horizontální bednění.</i>
1,2 až 2,3	HSC	S čedičovou tkaninou	4a, 4b, 4c <i>Horizontální bednění.</i> <i>„Při porušení desky bylo zjištěno, že se</i>



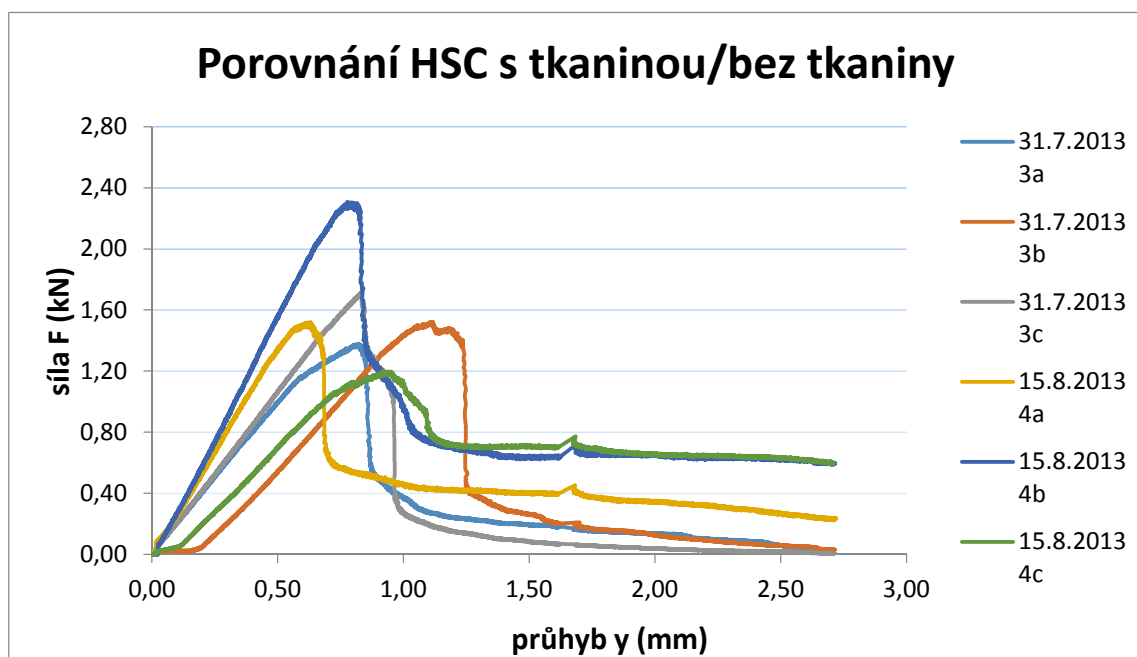
			<i>tkaniny posunula ke středu desky. Dále bylo zjištěno, že deska měla při horním povrchu nepatrné trhliny.“</i>
0,9 až 1,1	HSC	S čedičovou tkaninou	<i>5a, 5b, 5c</i> <i>Horizontální bednění.</i> <i>„Při porušení desky bylo zjištěno, že se tkaniny posunula ke středu desky. Dále bylo zjištěno, že deska měla při horním povrchu nepatrné trhliny.“</i> <i>Změna hmotnosti plastifikátoru, než u předchozích HSC.</i>

Porovnání desek s tkaninou a bez tkaniny [63]

„Aby bylo možno říci, jaký vliv má vložená čedičová tkanina na desky, je zapotřebí porovnat jednotlivé výsledky. U desek vyrobených z betonu C40/50 jsou výsledky v porušení silou F obdobné. Přidaná čedičová tkanina neměla žádný nebo pouze minimální vliv na pevnost desky. Jak je viditelné, mají dokonce některé desky s tkaninou menší pevnost než desky bez tkaniny. Tento jev může být způsoben stářím desky, výrobou, ukládáním tkaniny nebo skladováním desek.“



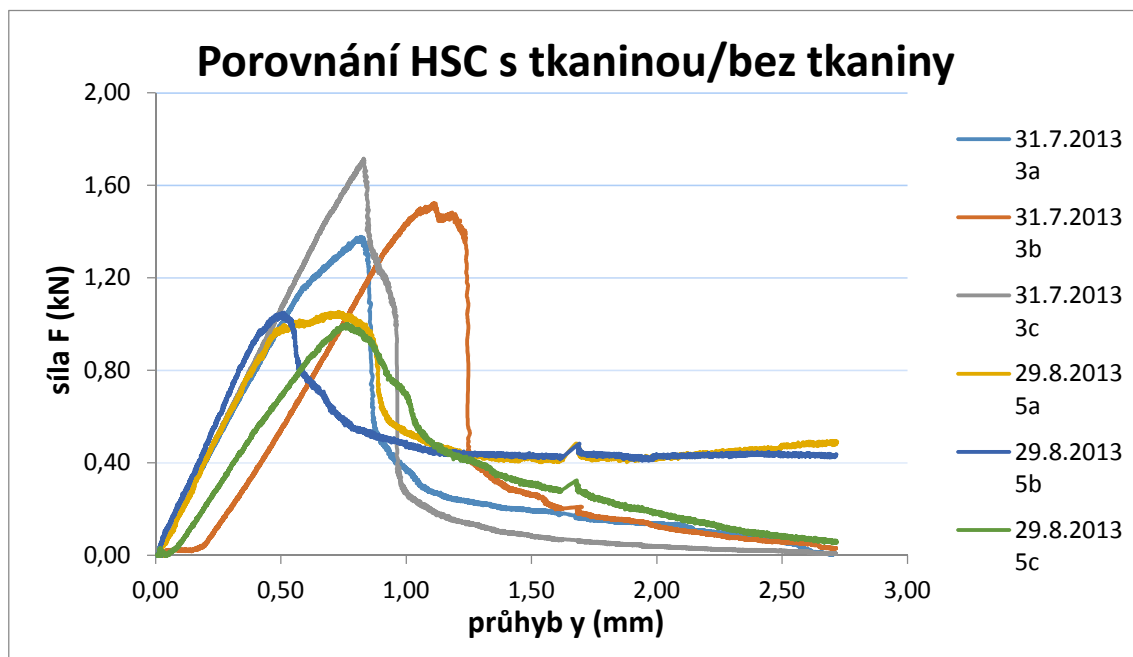
Obrázek 62- Porovnání desek C40/50. [63]



Obrázek 63- Porovnání desek HSC. [63]

„U desek vyrobených z vysokopevnostního betonu je viditelný příspěvek tkaniny. Deska ze dne 15.8.2013 4b má vysokou pevnost. Síla v porušení F je velikostně 2,35 kN. Porovnání ostatních desek

vyšlo podobně jako u desek z betonu C40/50. U desky ze dne 15.8.2013 4b je pevnost vyšší o cca 35 % než u desek bez tkaniny. U ostatních desek měly na pevnost vliv stejné faktory, které byly zmíněny již u porovnání desek z betonu C40/50.“ [63]



Obrázek 64- Porovnání desek HSC. [63]

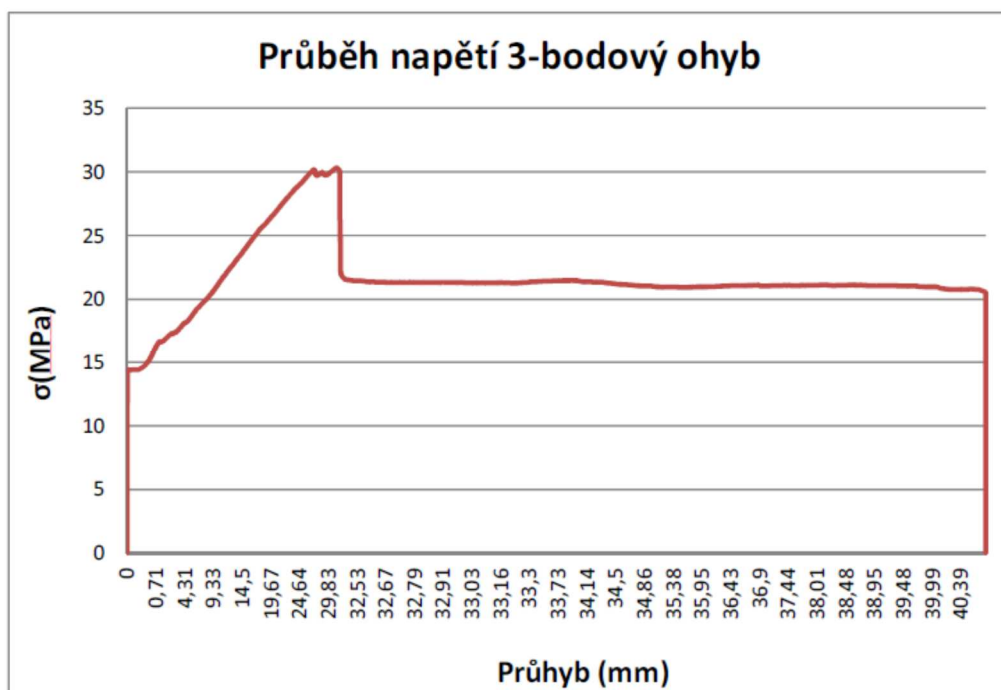
Data uvedená v následující tabulce jsou získána z diplomové práce Tomáše Zelenky, tedy ze zdroje č. 64.

Tabulka 14- Naměřené maximální síly při zkoušce tříbodovým ohybem na deskách o rozměrech 700/425/25 mm. [68]

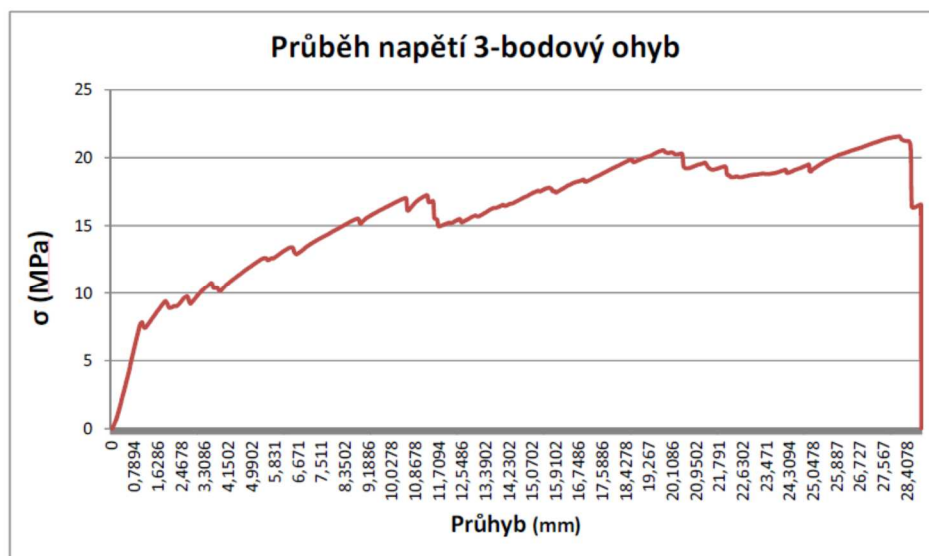
Naměřené maximální síly při zkoušce tříbodovým ohybem na deskách o rozměrech 700/425/25 mm. Hodnoty z diplomové práce Tomáše Zelenky- zdroj č. 64.			
F [kN]	Beton	Tkanina	Poznámka
10,03	UHPC	S uhlíkovou tkaninou	Vertikální bednění.
9,45	UHPC	S uhlíkovou tkaninou	„Bohužel byly formy při betonáži zatížením betonové směsi částečně



			zdeformovány a došlo v některých místech k vyboulení stěny formy.“
--	--	--	--



Obrázek 65- Průběh napětí desky $F= 10,03$ kN. [64]

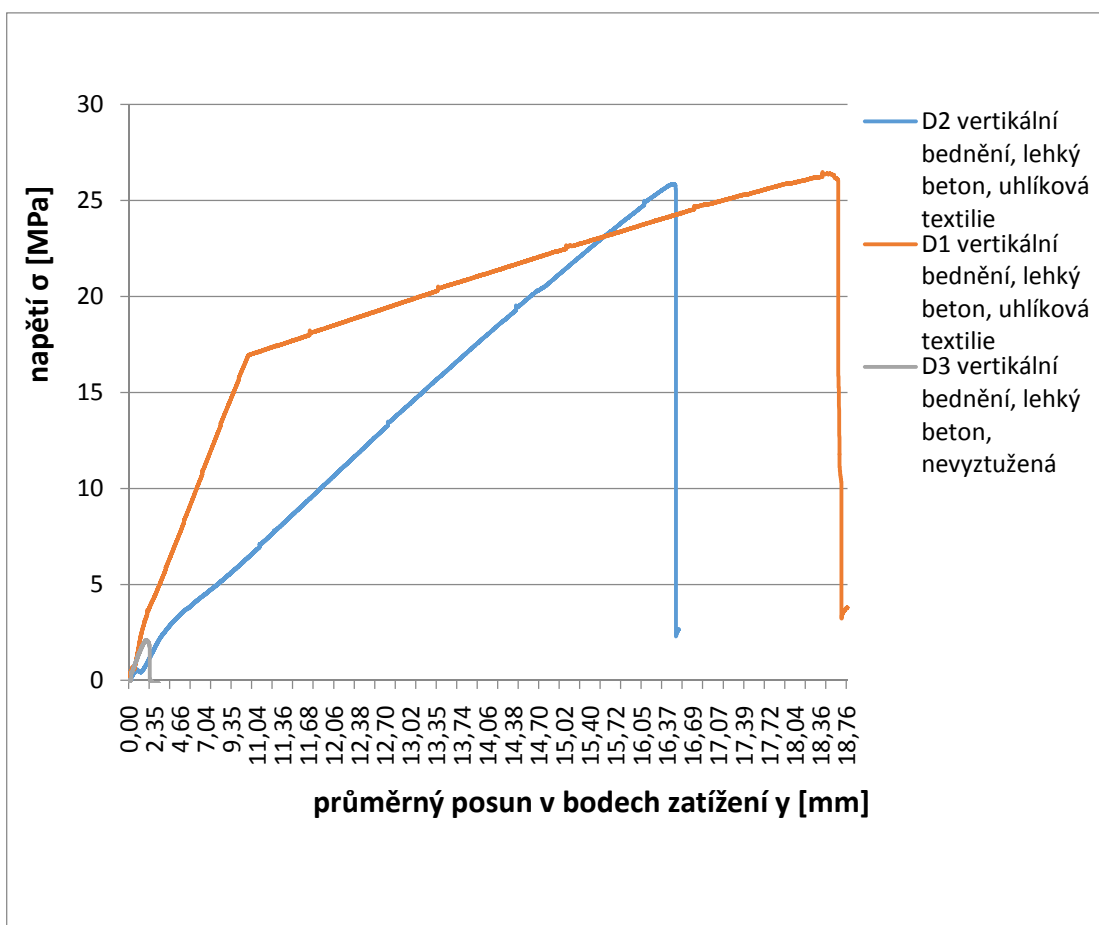


Obrázek 66- Průběh napětí $F= 9,47kN$. [64]

V následující tabulce 17 jsou uvedena data získaná z odborné rozpravy Terezy Hlaváčové, tedy ze zdroje č. 65.

Tabulka 15- Naměřené maximální síly při zkoušce čtyřbodovým ohybem na deskách o rozměrech 700/425/25 mm. [68]

Naměřené maximální síly při zkoušce čtyřbodovým ohybem na deskách o rozměrech 700/425/25 mm. Hodnoty z odborné rozpravy Terezy Hlaváčové- zdroj č. 65.			
F [kN]	Beton	Tkanina	Poznámka
1,1	LC	Bez tkaniny	Vertikální bednění ztužené proti boulení.
13,31	LC	S uhlíkovou tkaninou	
13,92	LC	S uhlíkovou tkaninou	



Obrázek 67-Srovnání výsledků zkoušek ve 4- bodovém ohybu. [65]



8 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Veškeré experimentální ověřování bylo prováděno v Experimentálním centru ČVUT či v laboratoři Katedry betonových a zděných konstrukcí na Fakultě stavební ČVUT.

Pro experimentální část této práce byla zhotovena série vzorků pro ověření materiálových charakteristik. Některé vzorky byly zhotoveny za spolupráce Ing. ach. Terezy Hlaváčové.

Pro zjištění základních charakteristik textilbetonu byly zhotoveny vzorky:

- 6x deska jednostranně vyztužená tkaninou z epoxidem spřažených uhlíkových vláken ve dvou směrech na sebe kolmých o průřezové ploše $140 \text{ mm}^2/\text{m}$.
Rozměry desek byly 425/700/20 mm.
Zkouška ve čtyřbodovém ohybu
Zkouška ve třibodovém ohybu
Dva vzorky znehodnoceny.

- Trámce z nevyztuženého lehkého betonu
Rozměry trámců 100/100/400 mm.
Zkouška ve čtyřbodovém ohybu



8.1 BEDNĚNÍ VZORKŮ DESEK

Při výzkumu, který probíhal v rámci diplomové práce Kateřiny Liškové, bylo původně vyrobeno horizontální bednění s lakovaným povrchem o vnitřních rozměrech 400/600/18 mm. Zhotovené bednění pro desky bylo vymazáno olejem pro usnadnění odbedňování. Vzorky desek byly během zrání chráněny potravinářskou fólií z důvodu nežádoucího odpařování vody. Takto byly zhotoveny jednostranně i oboustranně vyztužené desky, přičemž v případě oboustranně vyztužených desek byl velký problém s fixací výše položené výztužné sítě a došlo tedy k jejímu nežádoucímu posunu. Materiálem pro výztuž byla zvolena textilní síť z čedičových vláken. [63]



Obrázek 68- Bednění vzorků. [63]

Při zhotovování vzorků do diplomové práce Ing. Tomáše Zelenky bylo využito vertikálního bednění z dřevotřískových laminátových desek. Toto bednění nebylo nutno vymazávat olejem díky hladkému nepřilnavému povrchu laminátových desek z nich vyrobených. Jako výztuž do desek v tomto případě byla použita síť z uhlíkových vláken. Výsledné desky měly být o rozměrech 700/425/25 mm.[64]

„Bohužel byly formy při betonáži zatížením betonové směsi částečně zdeformovány a došlo v některých místech k vyboulení stěny formy. Proto vzorky nemají konstantní tloušťku. A dalším problémem se stala rychlost betonáže. Při betonáži poslední desky začala již betonová směs tuhnout.“ [64]



Obrázek 69- Připravené formy na betonáž. [64]

Z poučení u výše popsaných předchozích pokusů bylo při dalším pokusu Ing. ach. Terezy Hlaváčové využito vertikální bednění. Díky tomu bylo dosaženo lepšího upevnění tkaniny do bednění a tedy zabránění jejího nežádoucího posunu. Bednění bylo zhotoveno z dřevotřískových laminátových desek o vnitřních rozměrech 400/600/20 mm. Díky hladkému laminátovému povrchu nebylo již nutné formy opatřovat nátěrem proti přilnavosti betonu k bednění. Bednění bylo vyztuženo proti boulení stěn a opatřeno nálevkami pro snazší průběh betonáže. [65]

Na základě těchto získaných poznatků, byl shodný typ bednění pro zhotovování zkušebních vzorků desek použit v rámci mé diplomové práce. Toto bednění je zobrazeno následujícími obrázky.



Obrázek 70- Bednění desek shora. [65]



Obrázek 71- Bednění desek z boku. [65]



Výztuž z uhlíkových vláken byla zafixována v požadované poloze pod povrchem desky, tak aby bylo zajištěno krytí výztuže minimálně 2 mm. Tohoto bylo docíleno pomocí plastových distančních prvků umístěných po celé ploše. Tyto distance byly zhotoveny na 3D tiskárně. Dále bylo dosaženo správné polohy sítě pomocí plastových lišt (zelené na následujícím obrázku), které jsou umístěné na krajích desky a vypnutím sítě po obvodě.



Obrázek 72- Pohled do bednění desek, zelená část je lišta po okraji zajišťující správnou polohu výztuže. [68]



8.2 BETONOVÁ SMĚS

Z důvodu snahy o odlehčení betonovaných prvků byla použita receptura s lehkým kamenivem Liapor. Množství záměsové vody do betonové směsi bylo určeno dle předchozích pokusů.

S ohledem na malý objem prováděných zkušebních vzorků byla zvolena pouze jedna záměs na samotnou betonáž vzorků desek jedné etapy.

Betonová směs je volena jako jemnozrnná z důvodu malých rozměrů bednění, vzdáleností vláken výztužné sítě a malé krycí vrstvy.

Složení betonové pro betonáž o objemu 20 l směsi:

- Písek 0-1 10 kg
- Liapor 0-2 8 kg
- Cement I 52,5 7 kg
- Mikrosilika 0,3 kg
- Vápenná moučka 4,4 kg
- Plastifikátor 0,08 l
- Voda 4,5 l (přidání dle potřeby)

Jako plastifikační přísada byl využit výrobek STACHEMENT 2095 od firmy Stachema CZ s. r. o., technický list tohoto výrobku je v přílohách.

Jako přísada byla použita mikrosilika Stachesil S od firmy Stachema CZ s. r. o. technický list tohoto výrobku je v přílohách.



8.3 POSTUP BETONÁŽE

Nejprve se pečlivě odvážíly a odměřily veškeré potřebné suroviny a zkontrolovala se čistota míchačky. Následně se do míchačky jako první vložil Liapor, poté 2 l vody a promíchalo se to. Toto bylo rozhodnuto s ohledem na nevhodné odebrání záměsové vody Liaporem z betonové směsi během hydratace cementu, a tím složitého promíchání betonové směsi. Poté byly přidávány přísady v tomto pořadí: písek, vápenná moučka, cement, mikrosilika, 2 l vody, plastifikátor (pomalé přilévání za stálého míchání) a nakonec bylo pro potřebu přidáno ještě 0,5 l vody. Nakonec byla směs hutněna pomocí pýchování a krátkého zavibrování.

Stejným způsobem byla namíchána další záměs určená pro vybetonování trámců. Formy pro trámce byly před betonáží důkladně promazány. Po dvou dnech byly všechny zhotovené vzorky odformovány, poté ponořeny na 26 dní do vodní lázně, ze které byly vyjmuty 2 dny před provedením destruktivních zkoušek. Po destruktivním zkoušení byly na vzorcích, v místě rozlomení, viditelné mokré skvrny.

Stejně tak vzorky desek z první série byly odbedněny po dvou dnech a poté ponechány po dobu 24 dní ve vodní lázni. Z této vodní lázně byly vyjmuty také dva dny předem, ale oproti trámčům stihly díky své tloušťce pravděpodobně dostatečně vyschnout.

Při druhé etapě zhotovování vzorků byla nevhodně prodloužena doba míchání betonové směsi, což mělo za následek obtížné ukládání směsi do bednění. K tomuto zhoršenému stavu betonové směsi také přispělo nepřidání 0,5 l vody dle potřeby jako v první etapě betonáže. U těchto třech vzorků bylo po odbednění konstatováno jejich znehodnocení a byly z testů následně vyřazeny.

Třetí etapa betonáže probíhala téměř shodně jako první etapa. Jediným rozdílem bylo, že z důvodu lepší zpracovatelnosti betonové směsi bylo přidáno ještě dalších 0,5 l vody. A dalším rozdílem bylo ošetřování vzorků po dobu 28 dní. Vzorky byly ponechány v bednění téměř do doby provádění zkoušek. K odbednění došlo pouze pár hodin předem. Pro toto řešení bylo rozhodnuto z důvodu mírného prohnutí předchozích vzorků desek. Mohlo k tomuto prohnutí přispět i malé množství místa ve vodní lázni, kde vzorky nemohly být umístěny vodorovně. Předpokládalo se, že laminátové bednění bude daný vzorek dostatečně chránit před rychlým odpařováním vody a také bude zajišťovat požadovaný tvar prvku.



Obrázek 73- Navážené suroviny. [68]



Obrázek 74- Plastifikátor. [68]

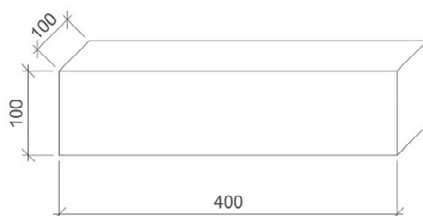


Obrázek 75- Pohled do míchačky. [68]

8.4 DESTRUKTIVNÍ ZKOUŠENÍ VZORKŮ

8.4.1 TRÁMCE

Jako první byly zkoušeny nevyztužené trámce, o rozměrech 100/100/400 mm, z lehkého betonu v tahu za ohybu. S ohledem na výslednou heterogenitu prvků byla zvolena u těchto vzorků zvolena zkouška ve čtyřbodovém ohybu. Rychlost nárůstu deformace byla standardně nastavena na 0,2 mm/min. Zkouška byla ukončena po vzniku trhliny při průměrném průhybu 0,045 mm při ustálené maximální průměrné síle 9,46 kN, která odpovídá napětí 2,84 MPa.

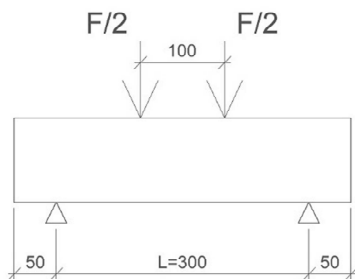


Obrázek 76- Náčrtek trámců. [68]

Tyto vzorky byly před destruktivní zkouškou uloženy ve vodní lázni. Po provedení destruktivní zkoušky byly na zbytcích trámek patrné mokré skvrny. Vzorky tedy byly z vodní lázně vyjmuty pozdě a nedošlo tak k jejich důkladnému vyschnutí. To bylo způsobeno vysokou nasákavostí lehkého kameniva Liapor. Pravděpodobně tak došlo k ovlivnění výsledků zkoušky ohybem.



Obrázek 77- Vlhké skvrny na rozlomených vzorcích trámců. [68]



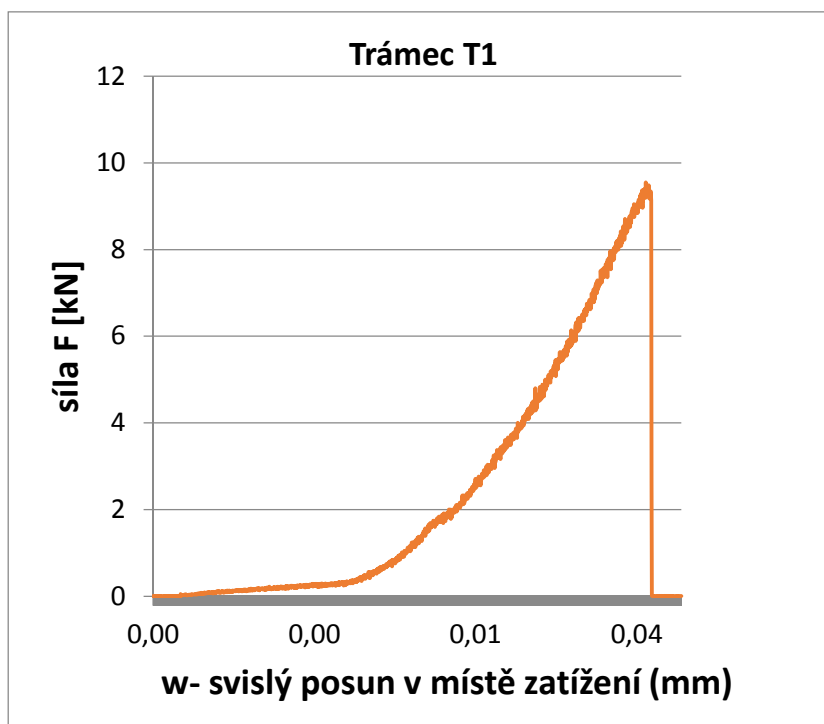
Obrázek 78-Schéma zatěžování trámčů při zkoušce čtyřbodovým ohybem. [68]

Tabulka 16- Výsledky zkoušky ohybem na trámčích. [68]

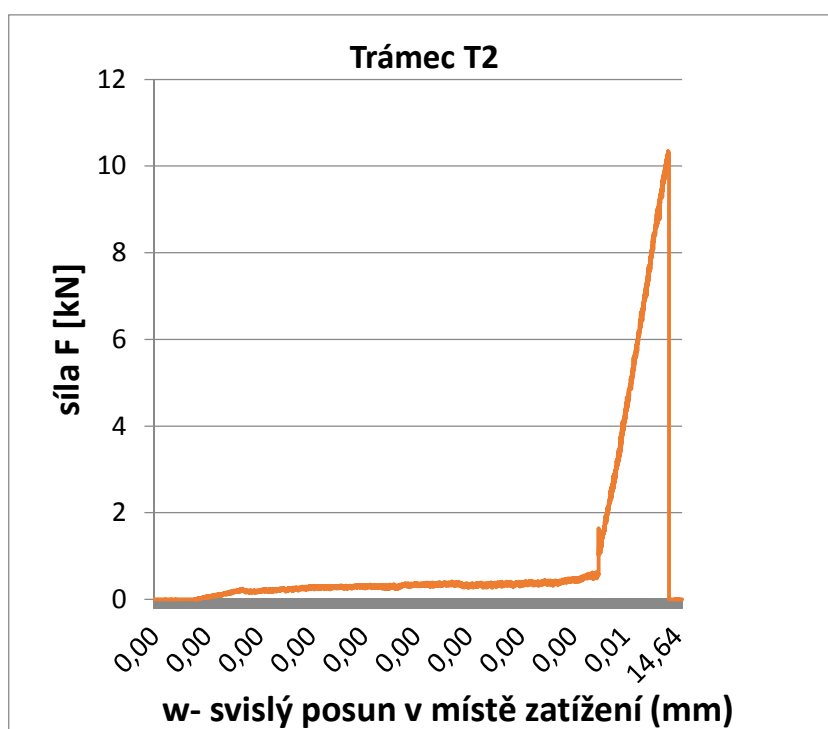
	Měření	Rozměry [mm]		hmotnost	Síla F	Moment M	Průřezový modul W	Napětí σ
		b	h					
				kg	kN	kNm	m ³	MPa
T1	1	98,66	99,90	6,069	9,551	0,4776	0,0001639	2,914
	2	98,39	99,98					
	3	98,10	100,02					
	Průměr	98,38	99,97					
T2	1	98,65	99,94	6,008	10,353	0,5177	0,0001642	3,153
	2	98,59	99,99					
	3	98,44	100,00					
	Průměr	98,56	99,98					
T3	1	99,28	99,86	5,998	8,472	0,4236	0,0001652	2,564
	2	99,41	99,87					
	3	99,27	99,96					
	Průměr	99,32	99,90					



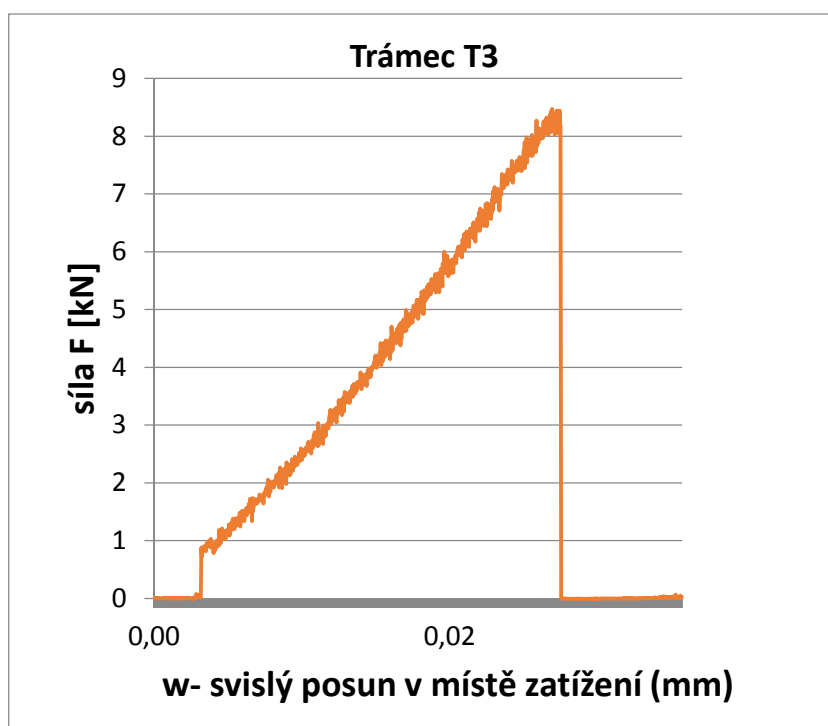
Obrázek 79- Zkouška ohybem na trémkách. [68]



Obrázek 80- Naměřená síla při zkoušce ohybem na trémci T1. [68]



Obrázek 81- Naměřená síla při zkoušce ohybem na trámci T2. [68]



Obrázek 82- Naměřená síla při zkoušce ohybem na trámci T3. [68]



Zbytky trámců byly také zkoušeny v tlaku. Jednalo se tedy celkem o 6 vzorků ze tří trámců. Hodnoty získané při této zkoušce jsou sepsány v tabulce 14. Výsledná průměrná pevnosti byla 20,6 MPa

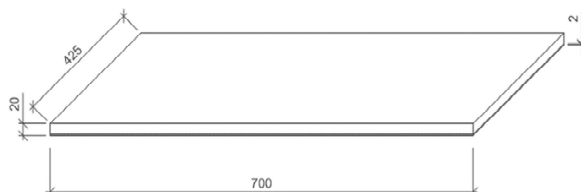


Obrázek 83- Zkouška v tlaku na zbytcích z trámců. [68]

Tabulka 17- Výsledky zkoušky v tlaku na zbytcích trámců. [68]

		Síla F	Pevnost	Průměrná pevnost trámce	Průměrná pevnost
		kN	MPa	MPa	MPa
T1	1	225,97	22,6	22,50	20,6
	1	224,13	22,4		
T2	2	205,90	20,6	19,75	
	2	188,80	18,9		
T3	3	195,67	19,6	19,60	
	3	195,85	19,6		

8.4.2 DESKY- ČTYŘBODOVÝ OHYB

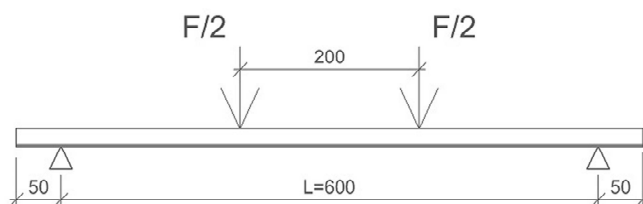


Obrázek 84- Náčrtek jednostranně vyztužených desek a umístění textilní výztuže v deskách. [68]

Při zkoušení desek v tahu za ohybu jednostranně vyztužených došlo k navýšení nárůstu deformace, z důvodu vysoké pevnosti, na 0,5 mm/min. Jednalo se, jak již bylo zmíněno, také o čtyřbodovou zkoušku. K ukončení zkoušky došlo v momentě vyčerpání pevnosti. Respektive v momentě přerušení soudržnosti mezi výztuží a betonem v místě trhliny. Podpory byly od sebe vzdáleny 600 mm a zatížení bylo symetricky rozděleno pomocí kovové desky na obě strany do vzdálenosti 100 mm od středu rozpětí desky. Působení tohoto zatížení bylo liniové.

Ke vzniku prvních viditelných trhlin došlo u obou zkoušených desek kolem zatížení o velikosti 5 kN. Došlo k okem viditelnému podrcení betonu v místě působícího zatížení. Tkanina po ukončení zkoušky zůstala neporušena.

U vzorků byla měřena působící síla a svislý posun v místě zatěžování. Nejedná se tedy o průhyb uprostřed rozpětí. Průhyb uprostřed rozpětí byl dopočítán pomocí Mohrovy věty.



Obrázek 85- Schéma zatěžování desek při zkoušce čtyřbodovým ohybem. [68]



Obrázek 86- Jednostranně vyztužená deska před destruktivním zkoušením. [68]

Na předchozím obrázku je zobrazen vzorek desky před destruktivní zkouškou. Povrch vzorku byl na dotyk hladký. Místy byl narušen důlky, což bylo zapříčiněno nedostatečným hutněním, nebo nižším vodním součinitelem.



Obrázek 87- Jednostranně vyztužená deska během destruktivní čtyřbodové zkoušky. [68]

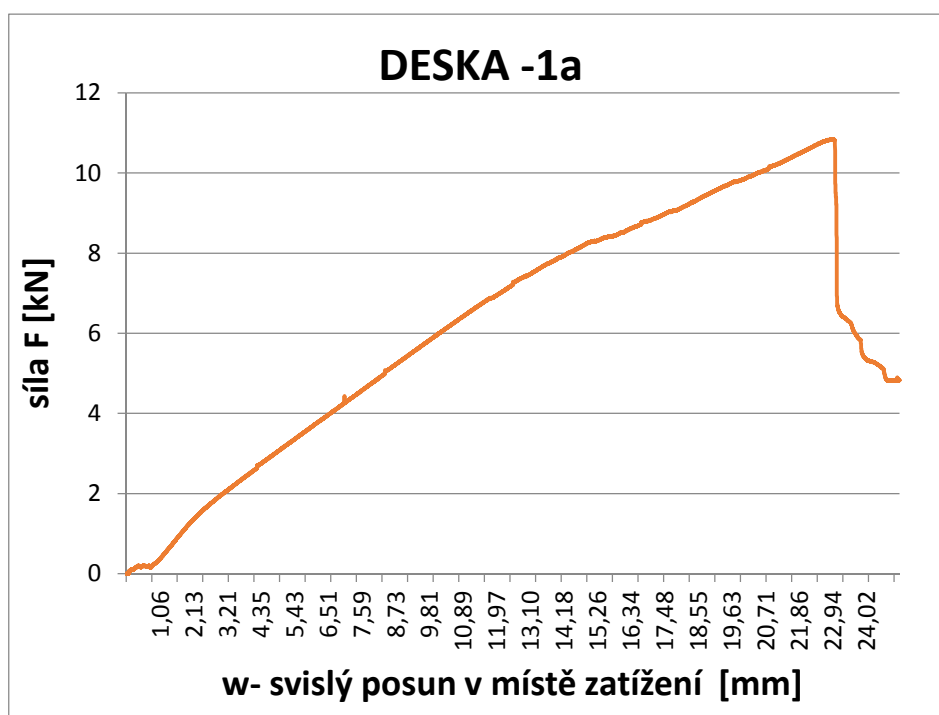


Obrázek 88- Trhliny na spodní ploše desky během čtyřbodové zkoušky. [68]



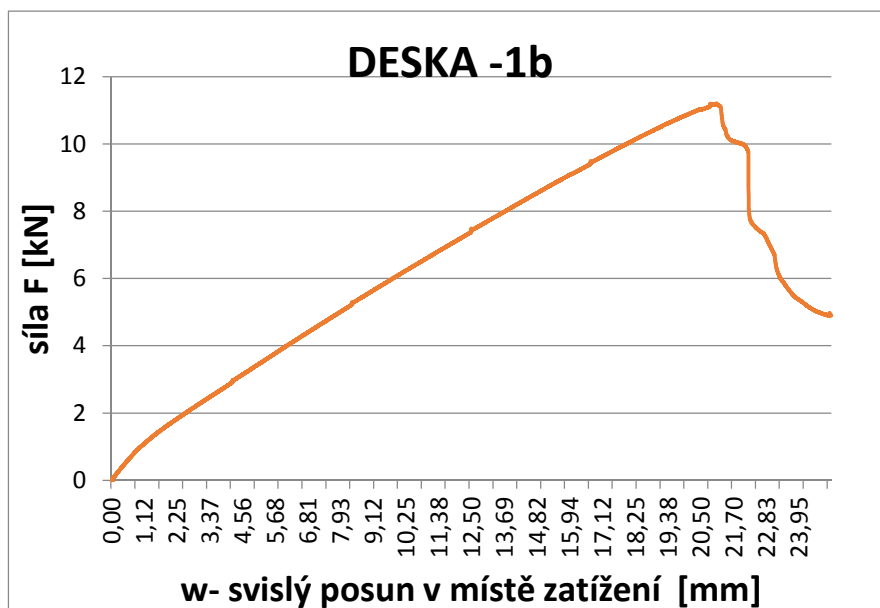
Obrázek 89- Jednostranně vyztužená deska po destruktivní zkoušce. [68]

→ VÝSLEDKY PRVNÍHO VROZKU



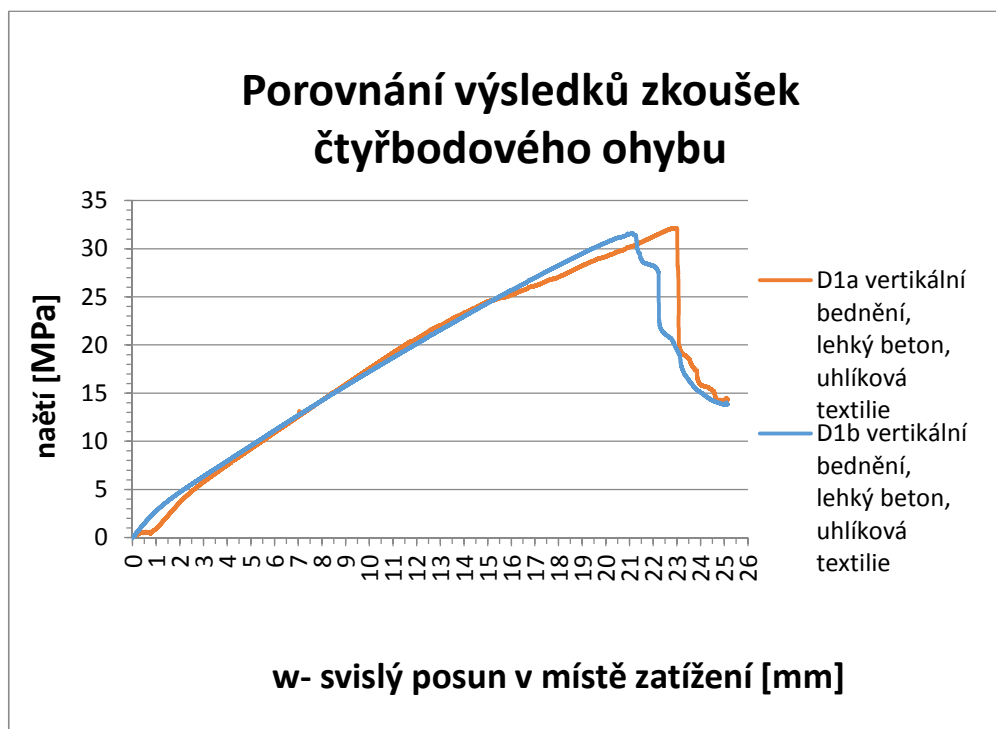
Obrázek 90- Deska jednostranně vyztužená 1a, závislost síly na průhybu, čtyřbodový ohyb. [68]

→ VÝSLEDKY DRUHÉHO VROZKU



Obrázek 91- Deska jednostranně vyztužená 1b, závislost síly na průhybu, čtyřbodový ohyb. [68]

→ VÝSLEDKY OBOU VZORKŮ



Obrázek 92- Napětí ve zkoušených deskách, čtyřbodový ohyb. [68]

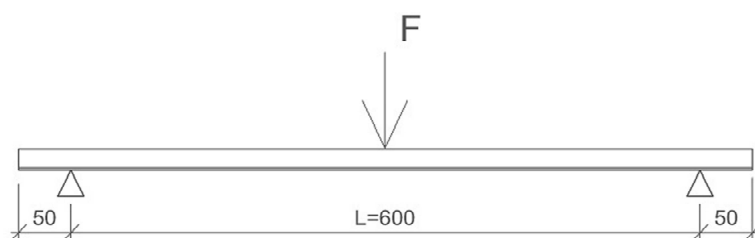


8.4.3 DESKY- TŘÍBODOVÝ OHYB

Při zkoušení desek v tahu za ohybu jednostranně vyztužených došlo k navýšení nárůstu deformace, z důvodu vysoké pevnosti na 0,5 mm/min. Jednalo se o tříbodovou zkoušku. K ukončení zkoušky došlo v momentě vyčerpání pevnosti. Respektive v momentě přerušení soudržnosti mezi výztuží a betonem v místě trhliny. Podpory byly od sebe vzdáleny 600 mm. Působení zatížení bylo liniové.

Ke vzniku prvních viditelných trhlin došlo u obou zkoušených desek kolem zatížení o velikosti 2 kN. Došlo k viditelnému podrcení betonu v místě působícího zatížení. Tkanina po ukončení zkoušky zůstala neporušena.

U vzorků byla měřena působící síla a svislý posun v místě zatěžování, tedy uprostřed rozpětí.



Obrázek 93- Schéma zatěžování desek při zkoušce tříbodovým ohybem. [68]



Obrázek 94- Zkouška tříbodovým ohybem, D1a. [68]



Obrázek 95- Viditelné trhliny na spodní straně desky v místech vláken sítě, D1a. [68]



Obrázek 96- Viditelný průhyb desky při zkoušce tříbodovým ohybem, D1a. [68]



Obrázek 97- Výrazná trhlina v polovině rozpětí při zkoušce tříbodovým ohybem, D1a. [68]



Obrázek 98- Viditelné podrcení betonu v místě zatížení, D1a po zkoušce, tříbodový ohyb. [68]



Obrázek 99- Detail z předchozího obrázku. 68]



Obrázek 100- Viditelné podrcení betonu v místě zatížení při zkoušce tříbodovým ohybem, D1b. [68]



Obrázek 101- Viditelné podrcení betonu v místě zatížení při zkoušce třibodovým ohybem, D1b. [68]

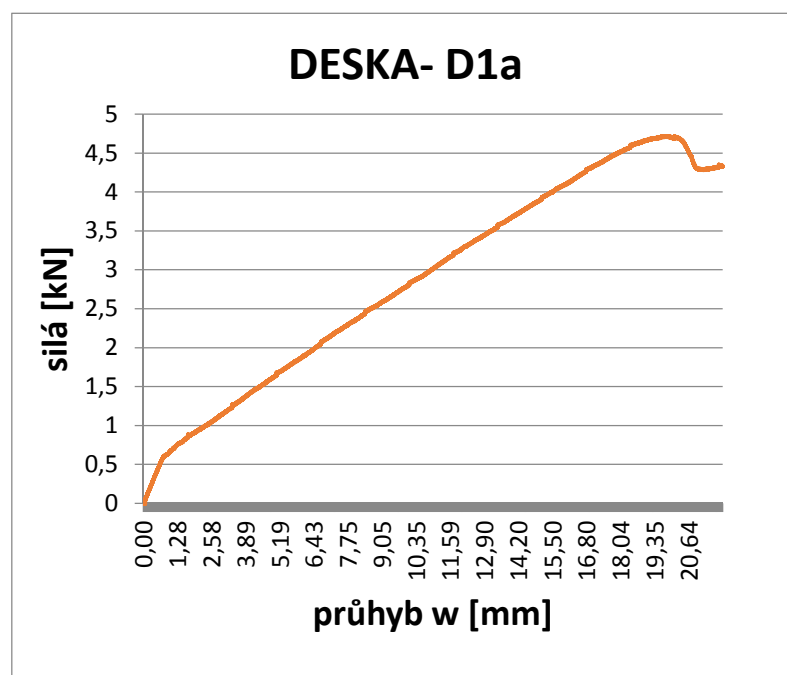


Obrázek 102- Viditelné trhliny na spodní straně desky při zkoušce třibodovým ohybem, D1b. [68]



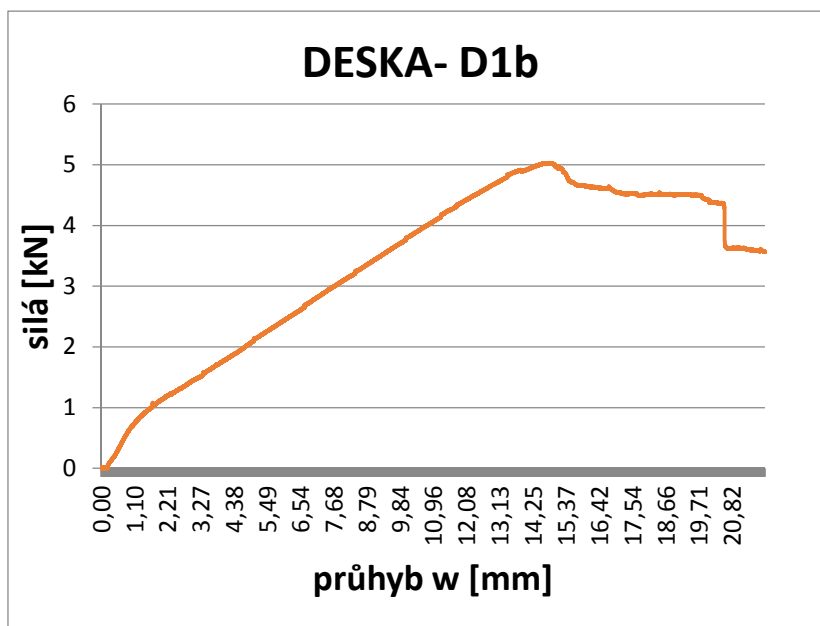
Obrázek 103- Viditelné trhliny na spodní straně desky při zkoušce tříbodovým ohybem, D1b. [68]

→ VÝSLEDKY PRVNÍHO VROZKU



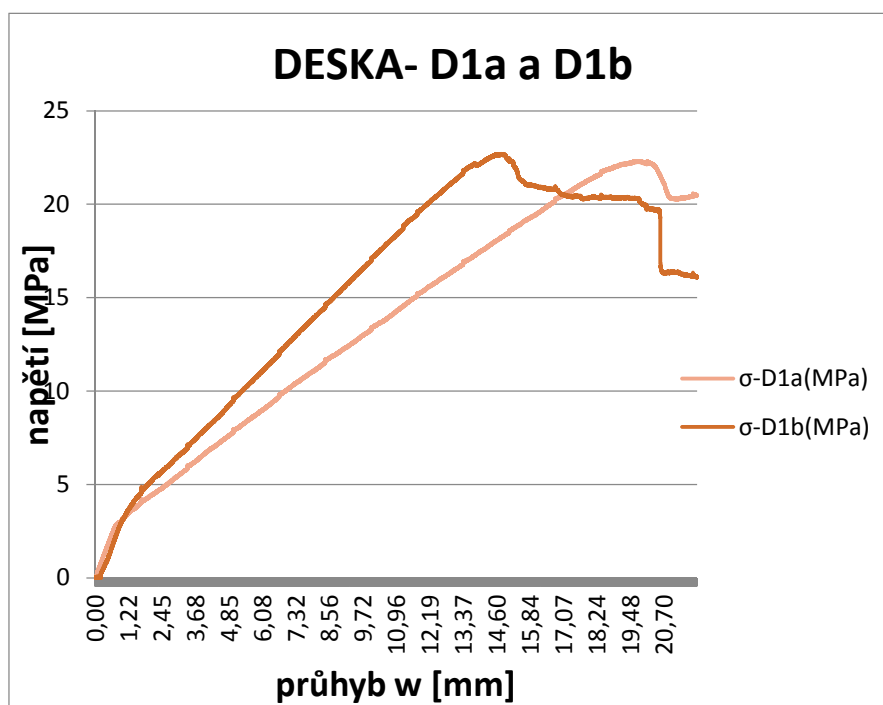
Obrázek 104- Deska jednostranně vyztužená D1a, závislost síly na průhybu, tříbodový ohyb. [68]

→ VÝSLED DRUHÉHOHO VROZKU



Obrázek 105- Deska jednostranně vyztužená D1b, závislost síly na průhybu, třibodový ohyb. [68]

→ VÝSLEDKY OBOU VZORKŮ



Obrázek 106- Napětí ve zkoušených deskách, třibodový ohyb. [68]



8.5 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKU EXPERIMENTÁLNÍHO MĚŘENÍ

Výpočet objemové hmotnosti LC:

Údaje získané z nevyztuženého trámce

Hmotnost: $m = 6,069 \text{ kg}$

Rozměry: $l = 0,4 \text{ m}$

$b = 0,09838 \text{ m}$

$h = 0,09997 \text{ m}$

Objem: $V = b \cdot h \cdot l = 0,003934 \text{ m}^3$

Objemová hmotnost: $\gamma = 1542,7 \text{ kg/m}^3$

Tabulka 18- Výsledky provedených zkoušek na vzorcích desek. [68]

		Měření	Rozměry [mm]		hmotnost	Síla F	Moment M	Průřezový modul W	Napětí σ
			b	h	kg	kN	kNm	m^3	MPa
D1a	Čtyřbodový ohyb	1	422	21,80	10,28	10,841	1,084	0,0000348	32,151
		2	423	21,75					
		3	423	22,09					
		Průměr	422,5	21,88					
D1b	Čtyřbodový ohyb	1	426	21,91	10,13	11,197	1,120	0,0000354	31,588
		2	424	22,02					
		3	425	23,18					
		Průměr	425	22,37					
D1a	Tříbodový ohyb	1	422	21,10	10,18	4,718	0,708	0,0000316	22,362
		2	419	21,33					
		3	422	21,17					



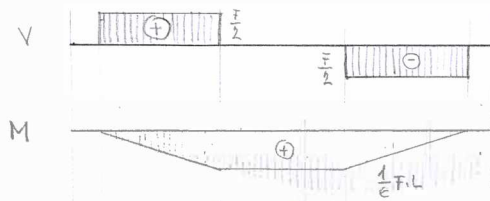
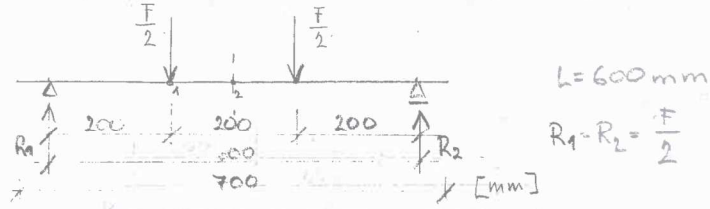
		Průměr	421,7	21,20					
D1 b	1	422	20,89		10,25	5,029	0,754	0,0000316	23,882
	2	422	21,49						
	3	423	21,21						
	Průměr	422,5	21,20						

Pro srovnání průhybů na vzorcích je potřeba dopočíst průhyb uprostřed rozpětí při zkoušce čtyřbodovým ohybem.



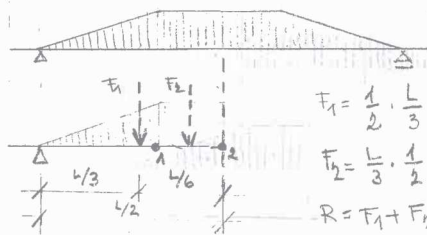
PŘEPÓČET PRŮHYBU U ZKOUSKY JTYRĚBODOVÝM OHYBEM

POZN. PŘI ZKOUSCE NAMĚŘEN PRŮHYB POD ZATÍŽENÍM
→ PŘEPÓČET NA PRŮHYB V POLOINĚ ROZPĚTÍ



MOHROVA VĚTA:

$$M_1 = \frac{\tilde{M}_1}{EI}$$



$$M = \int -v \cdot F \cdot dx = \frac{1}{6} \cdot F \cdot L$$

$$F_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{L}{3} \cdot \frac{1}{6} \cdot F \cdot L = \frac{1}{36} \cdot F \cdot L^2$$

$$F_2 = \frac{L}{3} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{6} \cdot F \cdot L = \frac{1}{36} \cdot F \cdot L^2$$

$$R = F_1 + F_2 = \frac{2}{36} \cdot F \cdot L^2 = \frac{1}{18} \cdot F \cdot L^2$$

$$\begin{aligned} \tilde{M}_2 &= \frac{1}{18} \cdot F \cdot L^2 \cdot \frac{L}{2} - \frac{1}{36} \cdot F \cdot L^2 \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot L + \frac{1}{6} \cdot L \right) - \frac{1}{36} \cdot F \cdot L^2 \cdot \frac{1}{12} \cdot L \\ &= \frac{1}{36} \cdot F \cdot L^3 - \frac{1}{36} \cdot F \cdot L^3 \cdot \frac{5}{18} - \frac{1}{36} \cdot F \cdot L^3 \cdot \frac{1}{12} \\ &= F \cdot L^3 \cdot \frac{1}{36} \cdot \left(1 - \frac{5}{18} - \frac{1}{12} \right) \\ &= F \cdot L^3 \cdot \frac{1}{36} \cdot \left(\frac{36}{36} - \frac{10}{36} - \frac{3}{36} \right) \\ &= F \cdot L^3 \cdot \frac{1}{36} \cdot \frac{23}{36} \\ &= \frac{23}{1296} \cdot F \cdot L^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tilde{M}_1 &= \frac{1}{18} \cdot F \cdot L^2 \cdot \frac{L}{3} - \frac{1}{36} \cdot F \cdot L^2 \cdot \frac{L}{9} \\ &= \frac{1}{18} \cdot F \cdot L^3 \cdot \left(\frac{1}{3} - \frac{1}{18} \right) \\ &= \frac{1}{18} \cdot F \cdot L^3 \cdot \frac{5}{18} \\ &= \frac{5}{324} \cdot F \cdot L^3 \end{aligned}$$

$$M_2 = \frac{\tilde{M}_2}{EI} \Rightarrow EI = \frac{\tilde{M}_2}{M_2}$$
$$M_1 = \frac{\tilde{M}_1}{EI} \Rightarrow EI = \frac{\tilde{M}_1}{M_1}$$



$$EI = EI$$

$$\frac{\tilde{M}_1}{W_1} = \frac{\tilde{M}_2}{W_2}$$

$$\frac{\frac{5}{824} \cdot F \cdot L^3}{W_1} = \frac{\frac{23}{1296} \cdot F \cdot L^3}{W_2}$$

PRO D1a:

$$\frac{\frac{5}{324} \cdot F \cdot L^3}{0,02291} = \frac{\frac{23}{1296} \cdot F \cdot L^3}{W_2}$$

$$W_2 = \frac{23}{1296} \cdot \frac{0,02291}{5} \cdot 324$$

$$\underline{W_2 = 0,026347 \text{ m}}$$

$$F = 10,841 \text{ kN}$$

$$W_1 = 22,91 \text{ mm}$$

$$W_2 = 26,35 \text{ mm}$$

PRO D1b:

$$\frac{\frac{5}{324} \cdot F \cdot L^3}{0,02111} = \frac{\frac{23}{1296} \cdot F \cdot L^3}{W_2}$$

$$W_2 = \frac{23}{1296} \cdot \frac{0,02111}{5} \cdot 324$$

$$\underline{W_2 = 0,024277 \text{ m}}$$

$$F = 11,197 \text{ kN}$$

$$W_1 = 21,11 \text{ mm}$$

$$W_2 = 24,28 \text{ mm}$$

POMĚR PRŮHYBŮ

$$\frac{W_1(D1a)}{W_1(D1b)} \approx \frac{W_2(D1a)}{W_2(D1b)}$$

$$\frac{22,91}{21,11} \approx \frac{26,35}{24,28}$$

$$1,085 \approx 1,085 \checkmark$$



Srovnání průhybů je zobrazeno v následující tabulce.

Tabulka 19- Naměřené průhyby v závislosti na zatížení z předchozích experimentů. [68]

Naměřené průhyby při maximální síle během zkoušky tříbodovým ohybem na deskách o rozměrech 600/400/18 mm. Hodnoty z diplomové práce Kateřiny Liškové- zdroj č. 63.			
F [kN]	Beton	Tkanina	Průhyb [mm]
0,9 až 1,1	C 40/50	Bez tkaniny	Cca 0,7
0,65 až 1,25	C 40/50	S čedičovou tkaninou	Až 0,8
1,35 až 1,7	UHPC	Bez tkaniny	Až 1,2
1,2 až 2,3	HSC	S čedičovou tkaninou	Až 0,9
0,9 až 1,1	HSC	S čedičovou tkaninou	Až 0,8

Tabulka 20- Naměřené průhyby v závislosti na zatížení z vlastních experimentů. [68]

Naměřené průhyby při maximální síle během zkoušky čtyřbodovým ohybem na deskách o rozměrech 700/425/20 mm. Vlastní měření a výpočty.			
F [kN]	Beton	Tkanina	Průhyb [mm]
0,690 teoretická	LC	Bez tkaniny	-
10,841	LC	S uhlíkovou tkaninou	26,34
11,197	LC	S uhlíkovou tkaninou	24,28

Zde je vidět, že díky uhlíkové tkanině dosáhla síla až 16x vyšší hodnoty.

Tabulka 21- Naměřené průhyby v závislosti na zatížení z vlastních experimentů. [68]

Naměřené průhyby při maximální síle během zkoušky tříbodovým ohybem na deskách o rozměrech 700/425/20 mm. Vlastní měření a výpočty.			
F [kN]	Beton	Tkanina	Průhyb [mm]



4,718	LC	S uhlíkovou tkaninou	19,4
5,025	LC	S uhlíkovou tkaninou	14,5

V předchozích tabulkách je viditelný výrazný rozdíl mezi mými vlastními výsledky na vzorcích desek a již dříve provedenými experimenty.

Nárůst síly u vyztužených vzorků u mě dosahoval při čtyřbodovém ohybu až 4,7x vyšších hodnot při 29x vyšším průhybu. A u tříbodového ohybu se jedná 2,2x vyšší zatížení při 21x vyšším průhybu.

V dalších výpočtech provedu výpočet předpokládaných sil působících na vzorky nevyztužených a jednostranně vyztužených desek a výsledky těchto výpočtů porovnáám s naměřenými hodnotami u destruktivních zkoušek.

K výpočtu desek vyztužených potřebuji získat plochu výtzuže- jednoho vlákna:

UHLÍKOVÉ VLÁKNO:

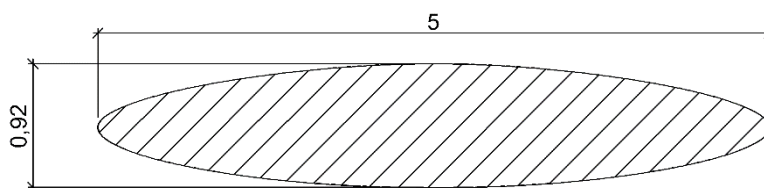
Jemnost f [tex]: $f = 6400$

Hustota uhlíku: $\rho = 1800\text{kg/m}^3$

Plocha jednoho vlákna: $A_1 = f/\rho = 6400/1800 = 3,55\text{ mm}^2$

Vzdálenost jednotlivých vláken je 25 mm v obou směrech sítě. Do jednoho metru prvku se pak vejde $n = 1000/25 = 40$ vláken.

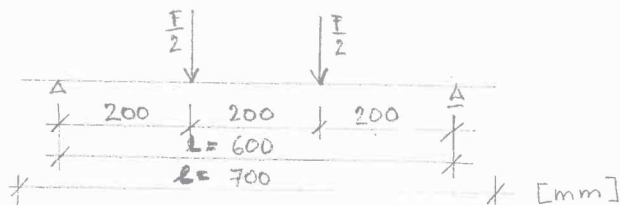
Jeden metr prvku pak tedy obsahuje: $A = 40 \cdot 3,55 = 140\text{ mm}^2/\text{m}$



Obrázek 107- Náčrtek průřezu vlákna. [68]

VÝPOČET PŘEDPOKLÁDANÉ F_{max} PŘI ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠCE

1. DESKA BEZ TKANINY - ČTYŘBODOVÝ OHYB



a.)

$$h = 0,025 \text{ m}$$

$$b = 0,425 \text{ m}$$

$$l = 0,700 \text{ m}$$

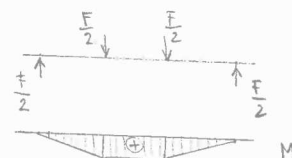
$$L = 0,600 \text{ m}$$

$$\sigma = \frac{M}{W}$$

$$2900 = \frac{\frac{1}{6} \cdot 0,6 \cdot F}{\frac{1}{6} \cdot 0,425 \cdot 0,025^2}$$

$$F = \frac{2900 \cdot 0,425 \cdot 0,025^2}{0,6} = \underline{\underline{1,28 \text{ kN}}}$$

$$\sigma_T = 2900 \text{ kPa}$$

ZE ZKOUŠKY NA TRÁMČÍCH
- ČTYŘBODOVÝ OHYBNAMĚŘENO PŘI ZKOUŠCE [63] $F = 1,1 \text{ kN}$

$$1,28 \approx 1,1 \text{ [kN]}$$

b.)

$$h = 0,020 \text{ m}$$

$$b = 0,425 \text{ m}$$

$$l = 0,700 \text{ m}$$

$$L = 0,600 \text{ m}$$

$$\sigma = \frac{M}{W}$$

$$2900 = \frac{\frac{1}{6} \cdot 0,6 \cdot F}{\frac{1}{6} \cdot 0,425 \cdot 0,02^2}$$

$$F = \frac{2900 \cdot 0,425 \cdot 0,02^2}{0,6} = \underline{\underline{0,8 \text{ kN}}}$$

NARŮST F_{max} PŘI NAVÝŠENÍ TLOUŠTKY DESKY O 5mm
MÁ BÝT DLE VÝPOČTU O 60%.

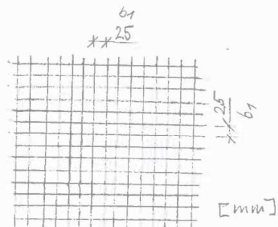
VYP.

$$\frac{1,28}{0,8} = \frac{1,1}{F_{teor}}$$

$$F_{teor} = 0,69$$



2. DESKA VYZTUŽENÁ UHLÍKOVOU TKANINOU
- ČTYŘBODOVÝ OHYB



$$A_{s1} = 3,55 \text{ mm}^2$$

cca 40 VLÁKEN NA 1m²

$$A_s = 3,55 \cdot 40 = 140 \text{ mm}^2/\text{m}$$

$$\frac{b}{b_1} = \frac{0,425}{0,025} = 17$$

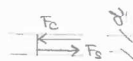
$$A_{s,b} = 3,55 \cdot 17 = 60,35 \text{ mm}^2/\text{b}$$

$$h = 0,020 \text{ m}$$

$$b = 0,425 \text{ m}$$

$$l = 0,700 \text{ m}$$

$$L = 0,600 \text{ m}$$



$$M_{ed} = M_{rd}$$

$$F_c = F_s$$

$$M_{rd} = F_c \cdot z = F_s \cdot z$$

$$F_s = A_s \cdot \sigma_s$$

$$F_c = 0,8 \cdot x \cdot b \cdot f_c$$

$$f_c = 20,62 \text{ MPa}$$

ZE ZKOUSKY NA TRAMČÍCH
- TLAK

$$x = \frac{A_s \cdot \sigma_s}{0,8 \cdot x \cdot b \cdot f_c} = \frac{60,35 \cdot 1600}{0,8 \cdot 425 \cdot 20,62} = 13,77 \approx 13,8 \text{ mm}$$

$$F_c = 0,8 \cdot x \cdot b \cdot f_c = 0,8 \cdot 13,77 \cdot 425 \cdot 20,62 = 96,54 \text{ kN}$$

$$F_s = 60,35 \cdot 1600 = 96,56 \text{ kN}$$

$$z = d - \frac{0,8 \cdot x}{2} = 18 - \frac{0,8 \cdot 13,77}{2} = 12,49 \approx 12,5 \text{ mm}$$

$$M_{rd} = F_c \cdot z = 96,54 \cdot 0,01249 = 1,206 \text{ kNm}$$

$$M_{ed} = \frac{1}{6} \cdot F \cdot l$$

$$F = \frac{6 \cdot M_{ed}}{l} = \frac{6 \cdot 1,206}{0,6} = \underline{\underline{12,06 \text{ kN}}}$$

DLE VÝPOČTU MÁ F_{max} DOSAHOVAT PŘI ZKOUSCE
ČTYŘBODOVÝM OHYBEM HODNOTY 12,06 kN.

PRŮMĚRNÁ HODNOTA NAMĚŘENÁ NA VZORCÍCH BYLA 11,02 kN.

NAMĚŘENÁ HODNOTA NA VZORCÍCH SE OD VÝPOČTENÉ HODNOTY
LIŠÍ O 8,6%.

VÝPOČTENO	F [kN]
BEZ TKANINY	0,8
S TKANINOU	12,06

15x VĚTŠÍ

NAMĚŘENO	F [kN]
BEZ TKANINY	0,69
S TKANINOU	11,02

TEORETICKÁ
HODNOTA

16x VĚTŠÍ



9 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo navázat na výsledky předchozích experimentálních činností, které byly prokazovány zkouškami ohybem na deskách jednostranně vyztužených textilními sítěmi.

V mém případě se jednalo o ověření kombinace vlivu čedičových textilních sítí v lehkém betonu s užitím kameniva Liapor.

V rámci práce bylo zhotoveno několik vzorků (viz. Tabulky 16 a 19), ve kterých jsem využila lehké kamenivo Liapor a v případě desek jednostranně vyztužených textilní sítí z uhlíkových vláken.

Získané výsledky ukázaly výrazný vliv užitých sítí na únosnost zkoušených desek ohybem, dále byl prokázán velký vliv na únosnost zajištěním správné polohy těchto vyztužných sítí, dále také vhodným bedněním. O tomto je pojednáno v kapitole č. 7 a č. 8.1.

Experimentální prací se prověřila reálnost výroby tenkých desek při zachování správné polohy vyztužné textilie.

Současně byly zkoušeny vzorky na pevnost (tlak, ohyb). Jednalo se v případě ohybu o zkoušku ve čtyřbodovém ohybu na normových zkušebních tělesech. V případě tlaku se jednalo o zjišťování pevnosti v tlaku na zbytcích trámů. Tyto získané fyzikálně-mechanické vlastnosti byly využity k různému porovnání pevností zjištěných na deskách při zkouškách ohybem. Byla dopočítána příslušná zatížení, při těchto výpočtech byly využity základní teorie výpočtů. Ty byly také porovnány s výsledky předchozích prací.

V každém případě výsledky práce ukazují, že využití textilních sítí i v lehkých betonech je reálné.

Doporučuji ve zkouškách pokračovat na vhodně vytipovaných prvcích mobiliáře, kde by získané výsledky z experimentů desek mohly být vhodně aplikovány.



10 ZDROJE

- [1] Mineral Information Institute, © 2002 www.mii.org. *Historie cementu a betonu*. Cemex. www.cemex.cz [Online] 2002. [Cit. 2016-9-30]. Dostupné z: http://www.cemex.cz/historie_cementu_a_betonu.aspx.
- [2] *John Smeaton*. In: Wikipedia: the free encyclopedia. cs.wikipedia.org [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [Cit. 2016-11-03]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/John_Smeaton
- [3] *Textilbeton*. In: Wikipedia: the free encyclopedia. cs.wikipedia.org [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2013 [cit. 2016-11-03]. Dostupné z: <https://de.wikipedia.org/wiki/Textilbeton>
- [4] Motler, M.; Hegger, J. Zum Tragverhalten von textildbewehrtem Beton. Lehrstuhl und Inst. für Massivbau. Aachen. 2005. ISBN3-9807302-7-1.
- [5] *Drátkobeton a vláknobeton*. Cemex. www.cemex.cz [online]. Copyright © 2016 CEMEX S.A.B. de C.V., 2016 [Cit. 2016-11-3]. Dostupné z: <http://www.cemex.cz/dratkobeton-a-vlaknobeton.aspx>
- [6] *Betonové konstrukce*. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební [online] © 2008 [Cit. 2016-10-22]. Dostupné z http://concrete.fsv.cvut.cz/esf/presentace/2225_BETON.pdf
- [7] *Složení betonu*. EBETON. www.ebeton.cz [online]. Praha: SVB ČR [cit. 2016-11-20]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/slozeni-betonu-slozky-betonu>
- [8] KOHOUTKOVÁ, Alena, Karel TRTÍK, Jitka VAŠKOVÁ a Jan VODIČKA. *Betonové konstrukce I*. 2005. Praha: ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03197-7.
- [9] VUT V BRNĚ, *Betonářské oceli vyráběné v ČR zatříděné podle EN 1992-1-1 - charakteristická mez kluzu v MPa*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební [online]. © 2009 [cit. 2016-11-29]. Dostupné z: http://www.fce.vutbr.cz/bzk/simunek.p/prvky/02_cv1_materi%C3%A1ly_diagramy.pdf
- [10] Obr. železobeton; [online]. Dostupný z: <http://www.psttrebic.cz/glr/vyroba-sloupy-3.jpg>
- [11] Obr. Předpjatý beton; [online]. Dostupný z: <http://www.silnice-zeleznice.cz/clanek/video-elektricky-izolovane-predepnuti-estakady-sluncova/>
- [12] Obr. Předpjatý beton; Dostupný z: <http://www.asb.sk/inziniarske-stavby/mosty/predpinaci-system-dywidag>
- [13] Navrátil, Jaroslav. *Materiálové vlastnosti, srovnání ŽB a PŘB*; [online]. © 2016. [Cit. 2016-11-01]. Dostupné z: <http://www.idea-rs.com/cs/prednasky-a-clanky/predpjaty-beton/materialove-vlastnosti-srovnani-zb-a-prb/>



- [14] *Pokrok jménem vláknobeton*. Podzemní stavby beton [online]. ©2010 [Cit. 2016-11-28]. Dostupné z: <http://www.psbrno.cz/cs/pokrok-jmenem-vlaknobeton-67><http://www.psbrno.cz/cs/pokrok-jmenem-vlaknobeton-67>
- [15] Kouhoutková, doc. Ing. Alena. *Uplatnění vláknobetonu v prefabrikovaných prvcích*. Realizace staveb [online]. 13.8.2009 [Cit. 2016-11-1]. Dostupné z: <http://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/materialy-a-vyroby/beton/uplatneni-vlaknobetonu-vprefabrikovanych-prvcich>
- [16] KOLEKTIV; garanti KLEČKA, Tomáš; KOLÁŘ, Karel: *Speciální betony*. Praha: SEKURKON, 2002.259 s. ISBN: 80-6604-00-4
- [17] Obr. Fasádní panely z textilbetonu; www.textilbeton-aachen.de[online]Dostupný z: <http://www.textilbeton-aachen.de/anwendungen/huellsysteme/hinterlueftete-fassaden/fassade-imb-2/>
- [18] *Polymerová vlákna do betonu*. Svaz výrobců betonu, www.ebeton.cz [online]. © 2016 [cit. 2016-11-3] Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/polymerova-vlakna-do-betonu>
- [19] Dahinter, K.; Kolísko, J.; Vacek, V.; Vich, O.; Mařík, P.; Šťastný, J.; Macháček, P. *Vláknobeton desky mostovky spřaženého ocelobetonového mostu přes Lochkovské údolí*. BETON TKS, Konstrukce 2/2010, [online]. [Cit. 2016-10-13]. Dostupný z: http://www.betontks.cz/sites/default/files/2010-2-10_0.pdf
- [20] Obr. Drátkobeton; Vláknobeton. Svaz výrobců betonu, www.ebeton.cz [online]. ©2016 [cit. 2016-11-3]. Dostupný z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/vlaknobeton>
- [21] PLAGGENBORG, B. *Textile-reinforced concrete with high-performance carbon fibre grids*, JEC magazine #44 [online], Deutsches Zentrum Textilbeton.
- [22] Obr. Textilbeton; V. Fraas. *Zulassung für Textilbeton* [online]. © 2014 [cit. 2016-11-4]. Dostupné z: <http://www.bba-online.de/fachartikel/gebaeudehuelle/zulassung-fuer-textilbeton/>
- [23] VODIČKA, J.; VESELÝ, V.; KRÁTKÝ, J. *Specifika z technologie vláknobetonu*, Beton TKS. 2, 38-42, ISBN 1213-3116, 2010.
- [24] JESSE, F.; CUBRACH, M. *Verstärken mit Textilbeton*, Sonderdruck Studentenausgabe aus Beton Kalender, Inst. für Massivbau. 2010. 107 S.
- [25] KULAS, Ch. a HEGGER, J. *Zum Tragverhalten getraenkter textiler Bewehrungselemente fuer Betonbauteile*. Lehrstuhl und Institut fuer Massivbau -IMB-, Rheinisch-Westfaelische Technische Hochschule Aachen. Aachen (Deutschland). 2013. VIII,374 S. ISBN: 978-3-939051-17-6.
- [26] LEPENIESD, INGOLF G.; *Zur hierarchischen und simultanen Multi-Skalen-Analyse von Textilbeton* [Online]. 2007-11-15 [cit. 2016-10-10]. Dostupné z: <http://www.qucosa.de/fileadmin/data/qucosa/documents/116/1231842928873-7170.pdf>



- [27] Autorský kolektiv. *Skani*. www.skolatextilu.cz [online]. [cit. 2016-10-28]. Dostupné z: [http://www.skolatextilu.cz/elearning/416/zaklady-textilnich-technologie-tkani/Skani.html](http://www.skolatextilu.cz/elearning/416/zaklady-textilnich-technologie/technologie-tkani/Skani.html)
- [28] Autorský kolektiv. *Stříž*. www.skolatextilu.cz [online]. [cit. 2016-10-29]. Dostupné z: <http://www.skolatextilu.cz/abc/heslo.php?nr=1231>
- [29] *Filament*. In: Wikipedia: the free encyclopedia. cs.wikipedia.org [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, © 2015 [cit. 2016-11-26]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Filament>
- [30] SACHR, P. Kompozitní materiály. Ústav materiálového inženýrství, ČVUT, umi.fs.cvut.cz [online] © 2014. [cit. 2016-11-28]. Dostupné z: http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/6_kompozitni-materialy.pdf
- [31] RWTHAACHEN UNIVERSITY, *Dreidimensionale Textilien*. Material kataloge, www.textilbeton-aachen.de [online]. Aachen: RWTH, © 2011 [cit. 2016-11-15]. Dostupné z: www.textilbeton-aachen.de/kataloge/materialkataloge/textilien/dreidimensionale-textilien/
- [32] *Skleněná textilní vlákna*. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, © 2016 [cit. 2016-10-14]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Sklen%C4%9Bn%C3%A1_textiln%C3%AD_vl%C3%A1kna
- [33] KOŘÍNEK, Z. *Vlákna pro kompozity*, [online] [cit. 2016-10-13]. Dostupné z: <http://mujweb.cz/zkorinek/vlakna.pdf>
- [34] KIEBLING, A. [online] [cit. 2016-11-22]. Dostupné z: http://www.baumann-online.de/ho_alois-kiessling/default.htm
- [35] HKO [online]. HKO Group, © 2016 [cit. 2016-10-15]. Dostupné z: http://www.hko.de/?option=com_content&task=view&id=22&Itemid=71&lang=de
- [36] *Čedičová vlákna*. In: Wikipedia: the free encyclopedia. cs.wikipedia.org [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, © 2015 [cit. 2016-11-09]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/%C4%8Cedi%C4%8Dov%C3%A1_vl%C3%A1kna
- [37] *Aramidová vlákna*. In: Wikipedia: the free encyclopedia. cs.wikipedia.org [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, © 2015 [cit. 2017-01-09]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Aramidov%C3%A1_vl%C3%A1kna
- [38] JANOVEC, J., CEJP, J., - STEIDL J. *Perspektivní materiály*. 2. vydání Praha: ČVUT, 2001. 135 s. ISBN 80-01-02341-9.
- [39] JANČÁŘ, J. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. 1. vydání Brno: FCH VUT v Brně, 2003. 194 s. ISBN 80-214-2443-5.
- [40] SOHIM, *Carbon materials*, www.sohim.by [online] © 2016 [cit. 2016-12-10]. Dostupné z: <http://www.sohim.by/en/catalog/carbon/>



- [41] GÉGR, J. *Zpráva pro výzkumné centrum „Textil! LN00B090*. [online]. © 2004 Katedra chemie, TU v Liberci [cit. 2016-12-10] Dostupné z: http://centrum.tul.cz/centrum/centrum/3Aplikace/3.1_zaverecne_zpravy/%5B3.1.09%5D.pdf
- [42] ZOLTEK. www.zoltek.com [online]. US: ZOLTEK™ Carbon Fiber, © 2016 [cit. 2016-12-11]. Dostupné z: <http://www.zoltek.com/carbonfiber/made.php>
- [43] EFIN. *Laminování – materiály*. www.rcmodely.com [online]. © 2016 [cit. 2017-01-09]. Dostupné z: <http://www.rcmodely.com/index.php/technika/nae-dilna/73-laminovani-materialy>
- [44] MILITKÝ, J. VANÍČEK, J. *Ultimativní mechanické chování a porušení vláken*. Studijní opory pro podporu samostudia. TU Liberec, FT, Katedra textilních materiálů, 10 s. [online]. [Cit. 2016-11-29]. Dostupné z: http://www.kmi.tul.cz/studijni_materialy/data/2013-04-17/08-30-15.pdf
- [45] STADO, *Zesilování konstrukcí pomocí CFRP lamel (uhlíkové lamely)*, www.stado.cz [online]. Děčín: STADO CZ s.r.o, 2014 [cit. 2016-10-08]. Dostupné z: <http://www.stado.cz/index.php/technologie/statika-staveb/carbo-lamely>
- [46] Obr. Fasádní panely z textilbetonu. Alfons Oebbeke, TU Dresden Pilotprojekt für 3 cm dicke 3D-textilbewehrte Betonelemente [online]. © 2011 [cit. 2016-11-4]. Dostupné z <http://www.baulinks.de/webplugin/2011/1504.php4>
- [47] Obr. fasádní panely z textilbetonu. 2016 [Online]. Dostupný z: <https://www.google.cz/maps>
- [48] GRAVELLI. *Nábytek*, www.gravelli.com/cz [online]. [cit. 2016-10-01]. Dostupné z: <https://shop.gravelli.com/collections/nabytek>
- [49] GRAVELLI. *Umyvadla*, www.gravelli.com/cz [online]. [cit. 2016-10-01]. Dostupné z: <https://shop.gravelli.com/collections/umyvadla>
- [50] Obr., Blog Techtextil [online]. Frankfurt, 2014 [cit. 2016-10-09]. Dostupné z: <http://www.techtextil-blog.com/en/lightness-the-key-to-the-future/>
- [51] Obr., BFT International, *Shell elements made of carbon-fiber reinforced concrete with functional integration* [online]. 2016, 1 [cit. 2016-11-06]. Dostupné z: http://www.bft-international.com/en/artikel/bft_Shell_elements_made_of_carbon-fiber_reinforced_concrete_with_functional_2550275.html
- [52] RWTHAACHEN UNIVERSITY, *Rautenfachwerk*, www.textilbeton-aachen.de [online]. Aachen: RWTH, 2011 [cit. 2016-11-08]. Dostupné z: <http://www.textilbeton-aachen.de/anwendungen/tragsysteme/stabwerke-gekruemmt/rautenfachwerk/>
- [53] Obr. lávky v Kemptenu, BETON-CAMPUS, www.beton-campus.de[online]. Dostupný z: http://www.beton-campus.de/wordpress_b7z6d7fDS/wp-content/uploads/2013/08/20130815_Textilbetonbr%C3%BCcke_Kempten_grau-2.jpg
- [54] GROZ-BECKERT, *Die textilbewehrte betonbrücke*, [online] 12-s. [cit. 2016-10-10]. dostupný z: http://www.machines-for-textiles.com/documents/7634257/8277426/Groz_Beckert_die_textilbewehrte_betonbruecke_groz-beckert_2.pdf/8f0fdd17-78ac-4e38-b991-0bddf8a197b3



- [55] Obr. lávky v Albstadt, GROZ-BECKERT, *WENIGER GEWICHT – LÄNGERE LEBENSDAUER* [online]. 2016, [cit. 2016-10-09]. Dostupné z: https://www.groz-beckert.com/cms/de/groz_beckert/diversity/technical_textiles/textile_reinforced_concrete_b_ridge
- [56] ČSN EN 206 *Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*, 200-7-1
- [57] DROCHYTKA, R. *Lehké stavební látky*. 1. vydání. Brno: Nakladatelství VUT, 1993, 124 s
- [58] CEMEX. *Příručka liaporbeton*, www.cemex.cz [online] Praha, 2006 [cit. 2016-10-09] s. 20 Dostupné z: http://www.betonserver.cz/Katalogy/Readymix/Prirucka_liapor.pdf
- [59] PYTLÍK, Petr. *Technologie betonu*. 2. vyd. Brno: VUTIUM, 2000, 390 s. ISBN 80-214-1647-5.
- [60] BEHNAM Vakhshouri. Mix design of light-weight self-compacting concrete, [online]. Australia, [cit. 2016-11-01], 14 s. Dostupné z: http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S22145_09515300115
- [61] LIAPOR, Lias Vintířov, lehký stavební materiál k.s. *Lehké kamenivo Liapor*, www.liapor.cz [online]. [cit. 2016-10-13]. Dostupné z: <http://www.liapor.cz/cz/keramicke-kamenivo-liapor>
- [62] WIEG, CH. *Brücke aus Textilbeton quert die Rottach in Kempten*, bauingenieur24® Informationsdienst Information Service, [online] 2007-10-17. [cit 2016-10-20]. Dostupné z: <http://www.bauingenieur24.de/fachbeitraege/massivbau/bruecke-aus-textilbeton-quert-die-rottach-in-kempten/1892.htm>
- [63] LIŠKOVÁ, K. *Chování tenkostěnných betonových desek vyztužených textilií*. Praha: ČVUT 2013. Diplomová práce, ČVUT, Fakulta stavební, Katedra betonových a zděných konstrukcí.
- [64] ZELENKA, T. *Návrh mostní lávky o rozpětí 17 m z předpjatého textilbetonu*. Praha: ČVUT 2015. Diplomová práce, ČVUT, Fakulta stavební, Katedra betonových a zděných konstrukcí.
- [65] HLAVÁČOVÁ, T. *Tenkostěnné betonové prvky vyztužené tkaninou*. Praha ČVUT 2015. Odborná rozprava, ČVUT, Fakulta stavební, Katedra betonových a zděných konstrukcí.
- [67] STACHEMA, *Přísady do betonu*. www.stachema.cz [online]. [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: <http://prisadydobetonu.stachema.cz/files/files/TL-Stachesil-S.pdf/>
- [68] Vlastní tvorba tabulek a obrázků
- [69] Obr. Uhlík. In: Wikipedia: the free encyclopedia, cs.wikipedia.org [online]. [cit. 2016-11-20]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Uhl%C3%ADk>
- [70] DÜBGEN, R. *Glassy carbon – a material for use in analytical chemistry*. Publication of Sigr, D8901 Meitingen, Germany, 1985.
- [71] KADLEC, J.; KRATOCHVÍL, M.; TERZIJSKIJ, I.; ZVOLÁNEK, L. *Vývoj a základní vlastnosti ultralehkého betonu*. FAST VUT Brno, 2014-01-20 [online] Tzbinfo. Beton, malty, omítky. [cit. 2016-10-23]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/10785-vyvoj-a-zakladni-vlastnosti-ultralehkeho-betonu>



- [72] BASALTEX, *Charakteristika čedičových vláken*. In: Basaltex a.s., www.basaltex.cz [online]. [cit. 2016-10-10]. Dostupné z: http://www.basaltex.cz/cedic/cedic_charakteristika_cz.htm



11 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1- Porovnání prvků s různým vyztužením- RC, FRC a TRC. [4].....	13
Obrázek 2- Pracovní diagram betonu v tlaku. [6].....	16
Obrázek 3- Řez prostým betonem. [7].....	16
Obrázek 4- Pracovní diagram oceli v tahu s výraznou a se smluvní mezí kluzu. [9].....	17
Obrázek 5- Železobeton. [10]	17
Obrázek 6- Předpjatý beton. [11]	18
Obrázek 7- Předpjatý beton. [12]	18
Obrázek 8- Pracovní diagram předpínacích lan. [13]	19
Obrázek 9- Polymerová vlákna do betonu. [18]	20
Obrázek 10- Ocelové drátky do betonu. [20]	21
Obrázek 11- Trámec z drátkobetonu. [20]	21
Obrázek 12- Textilbeton. [21]	22
Obrázek 13- Graf závislosti nákladů na stroje v závislosti na množství produkce textilních vláken. [24]	24
Obrázek 14- Pracovní diagram textilbetonu v tahu. [25]	25
Obrázek 15- Oblast IIa z pracovního diagramu textilbetonu v tahu, oblast vzniku trhlin. Obr. a) Uhlíková vlákna spřažená epoxidem, $\omega_l = 1,94\%$ b) Uhlíková vlákna spřažená styrol- butadienem, $\omega_l = 1,37\%$. [25].....	26
Obrázek 16- Textilní vlákno skládající se z elementárních vláken. [24].....	27
Obrázek 17- Porovnání napětí v mezi nespřaženým a epoxidem spřaženým průřezem textilního vlákna. [24].....	27
Obrázek 18- Rozdíl nespřaženého a epoxidem spřaženého textilního vlákna pod mikroskopem. [25].....	28
Obrázek 19- Příklady uspořádání vláknové výztuže v kompozitech: a) jednosměrné uspořádání, b) tkanina, c) rohož, d) víceosá výztuž z kontinuálních vláken, e) krátká vlákna jednosměrně orientovaná, f) krátká vlákna s nahodilou orientací. [30].....	28



Obrázek 20-Textilní síť, "3D-Sandwitch". [31]	29
Obrázek 21-Textilní síť, "3D-Waffel". [31]	29
Obrázek 22-Textilní síť, "3D-Gitter". [31]	29
Obrázek 23-Textilní síť, 2D. [31]	30
Obrázek 24- Svazek skleněných filamentů, roving. [32]	32
Obrázek 25- Aramidová stříž. [37]	33
Obrázek 26- Uhlíkové vlákno o průměru 6 μm v porovnání s lidským vlasem. [42]	33
Obrázek 27- Textilní síť z uhlíkových vláken. [68]	36
Obrázek 28- Vrstvy ve struktuře grafitu. [69]	36
Obrázek 29- Grafit. [69]	36
Obrázek 30- Skelný grafit. [69]	37
Obrázek 31- Uhlík krystalizující v krychelné soustavě- diamant. [69]	37
Obrázek 32- Broušené diamanty. [69]	37
Obrázek 33- Křehký lom skleněného vlákna. [44]	42
Obrázek 34- Křehký lom uhlíkového vlákna. [44]	42
Obrázek 35- Houževnatý lom PES vláken. [44]	43
Obrázek 36- Houževnatý lom PES vláken. [44]	43
Obrázek 37- Axiální štěpení u PBO vláken. [44]	43
Obrázek 38- Axiální štěpení u aramidového vlákna- Kevlar. [44]	44
Obrázek 39- Axiální štěpení u aramidového vlákna- Nomex. [44]	44
Obrázek 40- Granulární lom u lyocelových vláken. [44]	44
Obrázek 41- Dodatečné vyztužení konstrukce pomocí uhlíkových lamel. [45]	45
Obrázek 42- Dodatečné vyztužení konstrukce pomocí uhlíkových tyčí. [45]	46
Obrázek 43- Fasádní panely z textilbetonu. [46]	46
Obrázek 44- Fasádní panely z textilbetonu. [17]	46



Obrázek 45- Fasádní panely z textilbetonu, TU Dresden. [47]	47
Obrázek 46- Textilbetn, „Trio set“ od Gravelli. [48]	47
Obrázek 47- Textilbetn, "Simply" od Gravelli. [48].....	48
Obrázek 48- Textilbeton "Zephyr" od Gravelli. [48]	48
Obrázek 49- Textilbeton, "SLANT 07 double" od Gravelli. [49]	48
Obrázek 50-Textilbeton, pavilon v Löbau. [50].....	49
Obrázek 51- Textilbeton, pavilon. [51]	49
Obrázek 52- Textilbeton, příhradová konstrukce. [52]	49
Obrázek 53- Textilbeton, příhradová konstrukce. [52]	50
Obrázek 54- Textilbeton, příhradová konstrukce. [52]	50
Obrázek 55-Textilbeton, lávka ve městě Kempten. [53]	51
Obrázek 56- Textilbeton, pohled na most v Lautingen. [54]	51
Obrázek 57-Textilbeton, pohled zespodu na most v Lautingen. [54].....	51
Obrázek 58Textilbeton, náčrtek řezu mostu v Lautingen. [54]	52
Obrázek 59Textilbeton,vrchní pohled na most v Lautingen. [55]	52
Obrázek 60Textilbeton, skleněná výztuž mostu v Lautingen. [55].....	52
Obrázek 61- Lehké kamenivo Liapor. [61]	59
Obrázek 62- Porovnání desek C40/50. [63].....	63
Obrázek 63- Porovnání desek HSC. [63]	63
Obrázek 64- Porovnání desek HSC. [63]	64
Obrázek 65- Průběh napětí desky F= 10,03 kN. [64]	65
Obrázek 66- Průběh napětí F= 9,47kN. [64]	66
Obrázek 67-Srovnání výsledků zkoušek ve 4- bodovém ohybu. [65]	67
Obrázek 68- Bednění vzorků. [63]	69
Obrázek 69- Připravené formy na betonáž. [64]	70



Obrázek 70- Bednění desek shora. [65].....	70
Obrázek 71- Bednění desek z boku. [65]	70
Obrázek 72- Pohled do bednění desek, zelená část je lišta po okraji zajišťující správnou polohu výztuže. [68].....	71
Obrázek 73- Navážené suroviny. [68].....	73
Obrázek 74- Plastifikátor. [68]	74
Obrázek 75- Pohled do míchačky. [68]	74
Obrázek 76- Náčrtek trámců. [68]	75
Obrázek 77- Vlhké skvrny na rozlomených vzorcích trámců. [68]	75
Obrázek 78-Schéma zatěžování trámců při zkoušce čtyřbodovým ohybem. [68]	76
Obrázek 79- Zkouška ohybem na trámcích. [68]	77
Obrázek 80- Naměřená síla při zkoušce ohybem na trámci T1. [68].....	77
Obrázek 81- Naměřená síla při zkoušce ohybem na trámci T2. [68].....	78
Obrázek 82- Naměřená síla při zkoušce ohybem na trámci T3. [68].....	78
Obrázek 83- Zkouška v tlaku na zbytcích z trámců. [68].....	79
Obrázek 84- Náčrtek jednostranně vyztužených desek a umístění textilní výztuže v deskách. [68].....	80
Obrázek 85- Schéma zatěžování desek při zkoušce čtyřbodovým ohybem. [68].....	80
Obrázek 86- Jednostranně vyztužená deska před destruktivním zkoušením. [68]	81
Obrázek 87- Jednostranně vyztužená deska během destruktivní čtyřbodové zkoušky. [68]...	81
Obrázek 88- Trhliny na spodní ploše desky během čtyřbodové zkoušky. [68].....	81
Obrázek 89- Jednostranně vyztužená deska po destruktivní zkoušce. [68]	82
Obrázek 90- Deska jednostranně vyztužená 1a, závislost síly na průhybu, čtyřbodový ohyb. [68]	82
Obrázek 91- Deska jednostranně vyztužená 1b, závislost síly na průhybu, čtyřbodový ohyb. [68]	83
Obrázek 92- Napětí ve zkoušených deskách, čtyřbodový ohyb. [68]	83



Obrázek 93- Schéma zatěžování desek při zkoušce tříbodovým ohybem. [68]	84
Obrázek 94- Zkouška tříbodovým ohybem, D1a. [68]	84
Obrázek 95- Viditelné trhliny na spodní straně desky v místech vláken sítě, D1a. [68].....	85
Obrázek 96- Viditelný průhyb desky při zkoušce tříbodovým ohybem, D1a. [68]	85
Obrázek 97- Výrazná trhлина v polovině rozpětí při zkoušce tříbodovým ohybem, D1a. [68]..	85
Obrázek 98- Viditelné podrcení betonu v místě zatížení, D1a po zkoušce, tříbodový ohyb. [68]	86
Obrázek 99- Detail z předchozího obrázku. [68].....	86
Obrázek 100- Viditelné podrcení betonu v místě zatížení při zkoušce tříbodovým ohybem, D1b. [68].....	86
Obrázek 101- Viditelné podrcení betonu v místě zatížení při zkoušce tříbodovým ohybem, D1b. [68].....	87
Obrázek 102- Viditelné trhliny na spodní straně desky při zkoušce tříbodovým ohybem, D1b. [68].....	87
Obrázek 103- Viditelné trhliny na spodní straně desky při zkoušce tříbodovým ohybem, D1b. [68].....	88
Obrázek 104- Deska jednostranně vyztužená D1a, závislost síly na průhybu, tříbodový ohyb. [68].....	88
Obrázek 105- Deska jednostranně vyztužená D1b, závislost síly na průhybu, tříbodový ohyb. [68].....	89
Obrázek 106- Napětí ve zkoušených deskách, tříbodový ohyb. [68].....	89
Obrázek 107- Náčrtek průřezu vlákna. [68].....	95



12 SEZNEM TABULEK

Tabulka 1- Mechanické vlastnosti kompozitů a textilních vláken.[30].....	30
Tabulka 2-Vlastnosti skleněných vláken. [43].....	38
Tabulka 3- Vlastnosti aramidových vláken. [43].....	38
Tabulka 4- Vlastnosti uhlíkových vláken. [43]	39
Tabulka 5- Srovnání pevností, modulu pružnosti a hustoty vláken. [43]	39
Tabulka 6-Vlastnosti epoxidových pryskyřic (Epoxidová pryskyřice LF a tvrdidla řady LF firmy R&G). [43]	40
Tabulka 7- Výsledné vlastnosti vytvrzelé pryskyřice. [43]	40
Tabulka 8- Výsledné vlastnosti kompozitu: Pryskyřice LF + skleněná vlákna: 16 vrstev tkaniny Interglas 92 626 (296 g/m ²), vytvrzeno 24 hodin za pokojové teploty a dotvrzeno 15 hodin za teploty 50-55 °C. [43].....	41
Tabulka 9- Pryskyřice LF + uhlíková vlákna: 8 vrstev R&G uhlíkové tkaniny 200g/m ² , vytvrzeno 24 hodin za pokojové teploty a dotvrzeno 15 hodin za teploty 50-55 °C. [43]	41
Tabulka 10- Pryskyřice LF + aramidová vlákna: 8 vrstev R&G kevlarové tkaniny, vytvrzeno 24 hodin za pokojové teploty a dotvrzeno 15 hodin za teploty 50-55 °C. [43]	41
Tabulka 11- Porovnání vyztužených betonů. [68]	53
Tabulka 12- Tabulka značení LC dle objemové hmotnosti. [56].....	57
Tabulka 13- Naměřené maximální síly při zkoušce tříbodovým ohybem na deskách o rozměrech 600/400/18 mm. [68]	61
Tabulka 14- Naměřené maximální síly při zkoušce tříbodovým ohybem na deskách o rozměrech 700/425/25 mm. [68]	64
Tabulka 15- Naměřené maximální síly při zkoušce čtyřbodovým ohybem na deskách o rozměrech 700/425/25 mm. [68]	66
Tabulka 16- Výsledky zkoušky ohybem na trámčích. [68]	76
Tabulka 17- Výsledky zkoušky v tlaku na zbytcích trámčů. [68].....	79
Tabulka 18- Výsledky provedených zkoušek na vzorcích desek. [68]	90



Tabulka 19- Naměřené průhyby v závislosti na zatížení z předchozích experimentů. [68].....	94
Tabulka 20- Naměřené průhyby v závislosti na zatížení z vlastních experimentů. [68]	94
Tabulka 21- Naměřené průhyby v závislosti na zatížení z vlastních experimentů. [68]	94



13 SEZNEM PŘÍLOH

Příloha 1- Čedičová vlákna od firmy Basaltex. [72]

Příloha 2- Lehké kamenivo Liapor. [61]

Příloha 3- Technický list plastifikační přísady. [66]

Příloha 4- Technický list práškové příměsi do betonových směsí. [67]