



Fakulta stavební

Katedra konstrukcí pozemních staveb

Bakalářská práce

Vliv různých výztužných vláken na způsob porušení textilního betonu

Eliška Kafková

Obor: Architektura a stavitelství
Vedoucí práce: Ing. Tomáš Vlach
Květen 2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Kafková Jméno: Eliška Osobní číslo: 476956
Zadávající katedra: K124 - Katedra konstrukcí pozemních staveb
Studijní program: (B3502) Architektura a stavitelství
Studijní obor: (3501R011) Architektura a stavitelství

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Vliv různých výztužných vláken na způsob porušení textilního betonu
Název bakalářské práce anglicky: Influence of different fiber reinforcement on the failure of textile reinforced concrete

Pokyny pro vypracování:

Na daných druzích vláken a dané receptuře vysokohodnotného betonu navrhnout a vyzkoušet optimální množství vláken s ohledem na zpracovatelnost samozhutnitelné směsi a maximální výztužný efekt vláken. Vytvořit vzorky destiček a provést zatěžovací zkoušku 4 bodovým ohybem. Aplikovat vlákennou výztuž do destiček kombinovaných s uhlíkovou textilní výztuží a provést zatěžovací zkoušku. Vyhodnocení zkoušek, popis způsobu porušení a vlivu vlákenné výztuže.

Seznam doporučené literatury:

BRAMESHUBER, Wolfgang (ed.). Report 36: textile reinforced concrete-state-of-the-art report of RILEM TC 201-TRC. RILEM publications, 2006.
HEGGER, J., et al. Load-bearing behaviour and simulation of textile reinforced concrete. Materials and structures, 2006, 39.8: 765-776.

Jméno vedoucího bakalářské práce: Ing. Tomáš Vlach

Datum zadání bakalářské práce: 15. 2. 2021 Termín odevzdání bakalářské práce: 16. 5. 2021
Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně, pouze za odborného vedení vedoucího Ing. Tomáše Vlacha. Taktéž prohlašuji, že všechny zdroje, ze kterých jsem čerpala, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

V Praze, 16. května 2021

Kafková Eliška

Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala především mému vedoucímu, Ing. Tomáši Vlachovi, za cenné rady, trpělivost a ochotu při psaní této bakalářské práce a taktéž za pomoc při přípravách a betonáži vzorků. Za pomoc v laboratoři bych také ráda poděkovala Ing. Jakubovi Řepkovi.

Abstrakt

Tato bakalářská práce pojednává o možnostech vláknobetonu a jeho kombinaci s textilní výztuží. Jako výztužná vlákna zde byly použity čtyři dostupné materiálové varianty. V této práci je podrobně popsáno vyhodnocení všech použitých vláken na základě zpracovatelnosti daného množství vláken ve směsi a zároveň maximálního výztužného efektu vláken pro volbu výsledné optimální varianty. Textilní výztuž byla použita z uhlíkových rovingů impregnovaných epoxidovou pryskyřicí s povrchovou úpravou křemičitým pískem, a to ve dvou variantách lišících se množstvím textilní výztuže v průřezové ploše. Kombinace textilní výztuže s vláknobetonem a vliv vláken na způsob porušení byl zkoumán a vyhodnocen pomocí zkoušky čtyřbodovým ohybem na vzorcích různě vyztužených destiček.

Klíčová slova:

vláknobeton, textilní beton, vysokohodnotný beton, vlákenná výztuž, textilní výztuž

Abstract

This bachelor thesis deals with the properties of fiber-reinforced concrete and its combination with textile reinforcement. Four available materials were used as a reinforcing fibers. This thesis provides a detailed description of the assessment of all used fibers considering the processability of the given amount of fibers in a mixture together with their maximal reinforcing effect. Based on this an optimal final option was chosen. A textile reinforcement made from carbon rovings impregnated with an epoxy resin with a silicon sand surface finish was used in two options, differing in the amount of textile reinforcement in the cross-sectional area. The combination of textile reinforcement with fiber-reinforced concrete and the effects the fibers had on breaching were examined and assessed by four-point bend on samples of differently reinforced plates.

Keywords:

Fiber-reinforced concrete, textile-reinforced concrete, high performance concrete, fiber reinforcement, textile reinforcement

Použité zkratky

ČVUT	České vysoké učení technické v Praze
FRC	Fiber-reinforced concrete – vláknobeton, beton s rozptýlenou výztuží
HPC	High performance concrete – vysokohodnotný beton
HSC	High-strength concrete – vysokopevnostní beton
MF	MasterFiber (označení výztužných vláken, vždy doplněné o číselné označení)
PP	Polypropylen
PVA	Polyvinylalkohol
SFRC	Steel fiber-reinforced concrete – drátkobeton
TRC	Textile-reinforced concrete – beton vyztužený textilní výztuží
UCEEB	Univerzitní centrum energeticky efektivních budov

Použité symboly

a	Šířka
A_c	Zatěžovaná plocha vzorku
b	Šířka
f_c	Pevnost v tlaku
$\bar{\sigma}_c$	Průměrná pevnost v tlaku
f_{cf}	Pevnost v tahu
$\bar{\sigma}_{cf}$	Průměrná pevnost v tahu
F_{max}	Maximální působící síla
h	Výška
l	Délka
m	Hmotnost
V	Objem
ρ	Objemová hmotnost

Obsah

1	Úvod	16
1.1	Motivace.....	16
1.2	Cíl práce	17
2	Rešerše	18
2.1	Vysokohodnotný beton.....	18
2.2	Vláknobeton	19
2.2.1	Vlákna.....	19
2.2.2	Materiály vláken do betonu.....	20
2.2.3	Použití vláken.....	22
2.3	Textilní beton	22
2.3.1	Textilní výztuž	22
2.3.2	Materiály	23
2.3.3	Použití	24
2.4	Kombinace TRC a FRC – stávající řešení.....	24
3	Materiály.....	25
3.1	Směs	25
3.2	Vlákna	26
3.2.1	MasterFiber 012	26
3.2.2	MasterFiber 401	27
3.2.3	MasterFiber 230	28
3.2.4	MasterFiber 482	28
3.3	Uhlíková textilie – HTC 10/15-40.....	29
3.3.1	Pryskyřice – Sikafloor 150.....	30
4	Stanovení optimálního množství vláken.....	31
4.1	Příprava a zkoušení vzorků	31
4.1.1	Tlaková zkouška	31
4.1.2	Zkouška v tahu za ohybu	32
4.1.3	Zkouška rozlité kužele dle ČSN EN 1015-3 [28]	33
4.2	Zkoušení referenčních těles.....	33

4.2.1	Zkouška trámečků v tahu za ohybu a v tlaku na úlomcích.....	33
4.2.2	Zkouška krychlí v tlaku.....	34
4.3	MasterFiber 012	35
4.3.1	Použitá množství a zpracovatelnost	35
4.3.2	Struktura betonové směsi	36
4.3.3	Zkoušení vzorků, způsob porušení.....	36
4.3.4	Vyhodnocení a návrh optimálního množství vláken	38
4.4	MasterFiber 401	38
4.4.1	Použitá množství a zpracovatelnost	38
4.4.2	Struktura betonové směsi	39
4.4.3	Zkoušení vzorků, způsob porušení.....	39
4.4.4	Vyhodnocení a návrh optimálního množství vláken	41
4.5	MasterFiber 230	41
4.5.1	Použitá množství a zpracovatelnost	41
4.5.2	Struktura betonové směsi	42
4.5.3	Zkoušení vzorků, způsob porušení.....	42
4.5.4	Vyhodnocení a návrh optimálního množství vláken	44
4.6	MasterFiber 482	45
4.6.1	Použitá množství a zpracovatelnost	45
4.6.2	Struktura betonové směsi	45
4.6.3	Zkoušení vzorků, způsob porušení.....	45
4.6.4	Vyhodnocení a návrh optimálního množství vláken	47
4.7	Porovnání daných druhů vláken	47
5	Kombinace vláknenné výztuže s uhlíkovou textilní výztuží.....	50
5.1	Příprava a zkoušení vzorků	50
5.1.1	Zkouška čtyřbodovým ohybem.....	51
5.1.2	Příprava uhlíkové textilie	52
5.2	Zkoušení a vyhodnocení těles se slabým vyztužením technickou textilií	53
5.2.1	Zkouška referenčních destiček čtyřbodovým ohybem s nižší průřezovou plochou výztuže	53
5.2.2	MasterFiber 012	55
5.2.3	MasterFiber 401	56

5.2.4	MasterFiber 230	57
5.2.5	MasterFiber 482	59
5.3	Zkoušení a vyhodnocení těles se silným vyztužením technikou textilií	60
5.3.1	Zkouška referenčních destiček čtyřbodovým ohybem s vyšší průřezovou plochou výztuže	61
5.3.2	MasterFiber 012	63
5.3.3	MasterFiber 401	64
5.3.4	MasterFiber 230	65
5.3.5	MasterFiber 482	67
5.4	Vyhodnocení a porovnání vlivu jednotlivých vláken	68
5.4.1	Vzorky s nižší průřezovou plochou uhlíkové výztuže	68
5.4.2	Vzorky s vyšší průřezovou plochou uhlíkové výztuže.....	70
5.5	Zkoušení doprovodných těles.....	71
5.5.1	Zkouška trámečků v tahu za ohybu a v tlaku na úlomcích.....	71
5.5.2	Zkouška krychlí v tlaku.....	72
6	Diskuze	73
7	Závěr	75
8	Seznam tabulek	76
9	Seznam obrázků	77
10	Reference	79

1 Úvod

1.1 Motivace

Textilní beton (TRC, neboli textile reinforced concrete) je pojem, označující prostý beton vyztužený pomocí nekonvenčních materiálů. Oproti vyztužení běžnou ocelovou výztuží zde odpadá problém koroze, díky vyztužení materiály, které jsou chemicky odolné. Jeho potenciál tak díky tomu spočívá hlavně v možnosti realizace o poznání subtilnějších prvků, než je běžné, kvůli zmenšení potřebné krycí vrstvy. Z architektonického hlediska je tak textilní beton perspektivní materiál rozšiřující možnosti realizací.

TRC je běžně používán ve spojitosti s vysokohodnotným betonem, a to hlavně kvůli své struktuře. Betonová matrice u HPC (z angl. high performance concrete – vysokohodnotný beton) se, mimo jiné, vyznačuje velmi nízkou frakcí kameniva a nízkou hodnotou vodního součinitele, což celkově zlepšuje mechanické vlastnosti betonu a umožňuje tak použití se síťovou textilní výztuží a její snadné probetonování. Zároveň dochází díky jemnosti matrice k lepšímu spolupůsobení výztuže a betonu. Oproti tomu však z výše popsaných vlastností vyvstává problém křehkosti tohoto materiálu, a to zejména u textilií stabilizovaných (homogenizovaných) například epoxidovou pryskyřicí. Z tohoto důvodu se nabízí použití rozptýlené vláknenné výztuže v textilním betonu pro zlepšení duktility textilního betonu a pro možnou kontrolu trhlin. Zároveň se předpokládá pozitivní vliv vláknenné výztuže na porušení smykem. [1] [2]

Jak již bylo zmíněno výše, v architektonické sféře najde textilní beton širokou škálu využití hlavně pro subtilní a tvarově rozmanité realizace, což mne osobně, jako studentku architektury, velmi zaujalo. Ačkoliv prvotní zájem pramenil hlavně vizuálně z realizací z TRC, i samotný architekt potřebuje mít určitý náhled do konstrukčních principů a materiálů obecně, bez čehož nemůže být schopný realistické tvůrčí práce.

Dalším důvodem pro volbu tohoto tématu pro mě byla celkově možnost práce s těmito méně běžnými materiály, za účelem lepšího pochopení jejich chování a získání uceleného pohledu na danou problematiku. Jako velmi přínosnou zde vnímám i práci v laboratoři, která poskytuje pohled na věc z úplně jiné perspektivy, než pouhá teorie.

1.2 Cíl práce

Cílem této práce je ověření potenciálu kombinace vlákenné výztuže s uhlíkovou textilní výztuží. Vlákenná výztuž ve čtyřech dostupných variantách byla optimalizována, co se týče množství vláken, v návaznosti na dobrou zpracovatelnost samozhutnitelné směsi a maximální možný výztužný efekt vláken. Po provedení této optimalizace porovnáním různých množství dostupných rozptýlených vláken v referenční směsi vysokohodnotného betonu byla vlákenná výztuž použita do vzorků společně s uhlíkovou textilní výztuží. Dále byla provedena zatěžovací mechanická zkouška čtyřbodovým ohybem, přičemž byl sledován právě vliv vlákenné rozptýlené výztuže na způsob porušení vzorků textilního betonu. Výsledky byly vyhodnoceny ve smyslu porovnání vzorků vyztužených pouze uhlíkovou textilií, vůči vzorkům obohacených o vlákennou výztuž, ale také ve smyslu vzájemného porovnání jednotlivých typů použitých vláken. Navíc bylo použito dvojí vyztužení textilní výztuží lišící se množstvím uhlíku v průřezové ploše. U slaběji vyztužených vzorků bylo předpokládáno porušení čistě ohybem – přetržením výztuže, u silně vyztužených vzorků bylo předpokládáno porušení vzorků smykem. Součástí práce je také rešeršní část, věnující se obecně principům TRC a FRC a rozbohem stávajícího stavu podobných řešení kombinací obou typů vyztužení.

2 Rešerše

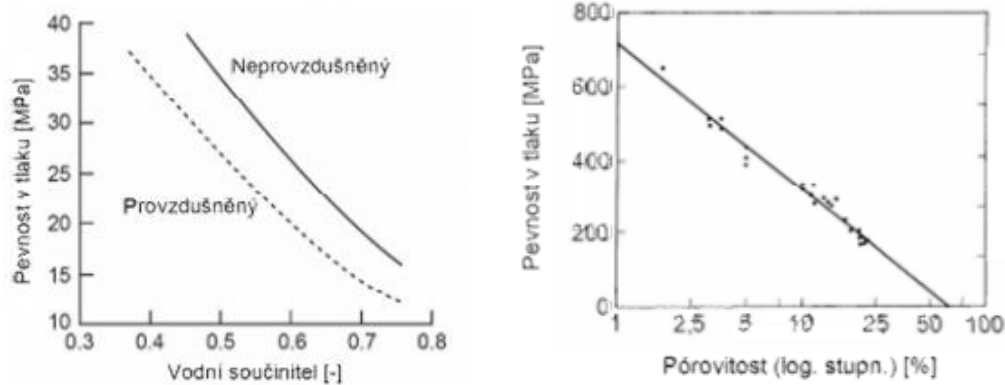
2.1 Vysokohodnotný beton

Za vysokohodnotný beton (HPC) se v dnešní době považuje takový beton, který se vyznačuje oproti běžnému alespoň nějakými zlepšenými vlastnostmi – např. tlaková pevnost, trvanlivost, odolnost vůči agresivnímu prostředí atd.

Vysokopevnostní beton (zkráceně HSC, z angl. High-strength concrete) je v tomto smyslu podkategorií vysokohodnotného betonu. Jak už vyplývá z názvu, zlepšenou a sledovanou vlastností tohoto betonu je pevnost v tlaku. Za vysokopevnostní betony považujeme betony třídy C55/67 až C100/115, celkově však betony s pevností do 150MPa. Betony s vyšší tlakovou pevností jsou považovány za ultra vysokopevnostní (UHSC, z angl. Ultra high-strength concrete), betony nižších tříd (do C50/60 včetně) za betony běžných pevností. [3]

HSC je díky svým vlastnostem používán na nejvíce zatěžované části konstrukcí klasických budov, či například na složitější mostní konstrukce. Na druhou stranu je však velmi křehký, proto je vhodné zlepšit houževnatost např. rozptýlenými ocelovými vlákny. [4] Kvůli své struktuře je tento druh betonu využíván v kombinaci s textilní výztuží.

Obecně lze říci, že pro dosažení vyšších pevností betonu je potřeba celkově zlepšit strukturu směsi. Jedním z důležitých parametrů je zde pórovitost, která má za následky snižování pevnosti betonu. Pro omezení pórovitosti materiálu je nutné snížení hodnoty vodního součinitele, viz. obr. 2.1. [5] To však může mít negativní dopad na dobu zpracovatelnosti čerstvé směsi, která se tímto krátí. Snížení hodnoty vodního součinitele a zároveň také zpomalení tuhnutí směsi se dá docílit tzv. plastifikátory a superplastifikátory, jejichž použití je pro vysokohodnotné betony typické. Vodní součinitel může klesnout až na hodnoty, kde není dostatečné množství vody pro kompletní hydrataci cementu. Tím dojde k tomu, že cement částečně hraje roli plniva a napomáhá žádoucí hutnosti směsi. [6]



Obrázek 2.1: Vliv vodního součinitele a pórovitosti na pevnost betonu [7]

2.2 Vlákno-beton

Vlákno-beton, tzv. fiber concrete, nebo také fiber-reinforced concrete (FRC), je kompozitní materiál skládající se z prostého betonu a rozptýlených výztužných vláken. Počátky vlákno-betonu, jak ho známe dnes můžeme datovat někdy okolo roku 1960. V té době byly uveřejněny poznatky o tomto materiálu od tří vědců (Romualdi, Batson, Mandel), které dostaly vlákno-beton do povědomí odborníků a rozšířily zájem o zkoumání tohoto materiálu. [8] V dnešní době má vlákno-beton poměrně širokou škálu využití.

2.2.1 Vlákna

Vlákna do betonu jsou používána za účelem zlepšení některých jeho vlastností, ale nikoliv jimi nelze zcela nahradit běžně používanou výztuž. Nejčastějšími důvody pro použití vláken do betonu může být např. snížení účinků objemových změn (smršťování), zvýšení požární odolnosti betonu či zlepšení vlastností betonu v tahu. Vliv na různé vlastnosti betonu závisí na několika faktorech – materiál vláken, geometrie vláken, rozmístění vláken (a jejich orientace) a jejich množství. [8] Právě kvůli různému rozmístění a orientaci vláken nelze zcela přesně předvídat a namodelovat vlastnosti materiálu. Svou roli může sehrát i např. soudržnost vláken s betonovou směsí - při nedostatečné soudržnosti obou materiálů může dojít k vytažení vláken z betonu.

Klíčovou schopností vláken je zlepšení vlastností při tahovém namáhání. Oproti prostému betonu můžeme vidět razantní rozdíl po vzniku prvních trhlin. Vlákna se aktivují a jsou schopna přenášet tahová namáhání. Eliminuje a zpomalí se díky tomu celkově následné rozevírání trhlin. [9] [10]

Aby vlákna plnila správně svou funkci, musí být co nejvíce rovnoměrně rozptýlena ve směsi. Právě směr a množství vláken na namáhaném průřezu udává míru schopnosti přenášet tahové síly a zpomalovat rozevírání trhlin. Vliv na směr a polohu (rovnoměrné rozložení) vláken má mnoho faktorů - např. konzistence směsi, doba míchání betonu či kombinace s klasickou nebo textilní výztuží. [11]

Velkou roli hraje také použité množství vláken. Je třeba určit, jaké množství je vhodné pro zlepšení vlastností materiálu, aniž by to bylo na úkor dobré zpracovatelnosti betonu.

2.2.2 Materiály vláken do betonu

Vlákna mají široké spektrum materiálového řešení. Uplatnění zde nachází především vlákna ocelová (tzv. drátkobeton), skelná vlákna a vlákna syntetická. Každá vlákna mohou sloužit v betonu rozdílným způsobem a budou vykazovat rozdílné chování.

Pro každý materiál je třeba upravit hodnoty ideálního množství vláken do směsi. Nejvyšší hodnoty použitelného množství vláken můžeme přiřadit ocelovým vláknům, a to díky tomu, že na sebe nevážou cementovou kaši jako vlákna z jiných materiálů a směs se tak dá i při vysokém množství snadno zpracovávat.

Ocelová vlákna

Beton vyztužený ocelovými vlákny nazýváme též drátkobeton, případně označujeme SFRC-z anglického názvu steel fiber-reinforced concrete. Ocelová vlákna především zvyšují houževnatost a tažnost materiálu. Nevýhodou u tohoto typu vláken může být, stejně jako u klasické železové výztuže, koroze. [12]

Dávkování ocelových vláken se liší podle typu vláken, tuto informaci můžeme získat od výrobce. Při překročení optimálního množství ocelových vláken mohou vznikat tzv. ježci.

Ocelová vlákna mají širokou škálu variací. Mohou se lišit tvarem, průřezem, povrchovou úpravou či délkou. Dobré soudržnosti s betonovou směsí lze dosáhnout v zásadě dvěma základními způsoby: vlákny se zahnutými konci (koncová úprava), či vlákny se strukturovanou povrchovou úpravou.

Vlákna by měla být dostatečně tuhá, aby při zpracování betonu nedošlo k jejich deformaci (změně původního tvaru). Na základě toho by měl být vybrán vhodný materiál co se týče pevnosti, a zároveň by měl být navržen optimální průřez z hlediska ohybové tuhosti. [11]

Ocelová vlákna značně zlepšují vlastnosti betonu v tahu. Pevnostem v tlaku napomáhají také, ne však příliš výrazně. Ačkoliv pevnost v tlaku není nijak výrazně zlepšena, vlákna napomáhají materiálu při porušení tlakem udržet si celistvost. [13]

Polypropylenová vlákna

Polypropylenová vlákna mají na rozdíl od výše zmíněných ocelových velmi malou pevnost a zároveň disponují nízkou hmotností. Mezi jejich hlavní benefity patří odolnost vůči alkáliím, některým kyselinám a jejich nenasákavost. [14] Dále jsou pak PP vlákna schopna omezit vznik a zpomalit rozvoj trhlin. [15]

PP vlákna můžeme podle způsobu výroby rozdělit na 2 druhy: monofilamentní a fibrilovaná. Monofilamentní vlákna vznikají tažením vytlačované taveniny-vznikají vlákna kruhového průřezu. Fibrilovaná vlákna vznikají nařezáním materiálu-vznikají pásy. [16]

Polyvinylalkoholová vlákna

Polyvinylalkoholová vlákna se též někdy označují jako Kuralon. PVA vlákna se vyznačují výraznou mechanickou pevností, odolností vůči chemikáliím a jsou hydrofilní. Vyrábějí se tzv.gelovým zvlákněním. Používají se také k výrobě lan a sítí. [17]

Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna se vyznačují vysokou pevností a tepelnou odolností. Zároveň disponují velmi dobrou odolností vůči agresivnímu prostředí. Nevýhodou těchto vláken je jejich malé přetvoření. To má za následek, že po dosažení meze pevnosti nastane v podstatě křehký lom. [18]

Skelná vlákna

Skelná vlákna, stejně jako vlákna z ostatních materiálů, zlepšují pevnost betonu v tahu a částečně i v tlaku. Nevýhodou skelných vláken může být nižší odolnost vůči alkalickému prostředí. Zlepšení odolnosti vůči alkáliím lze dosáhnout lubrikací vláken nebo úpravou betonové směsi. Lubrikace vláken slouží zároveň ke spojení jednotlivých vláken do provazců. [19] [12]

2.2.3 Použití vláken

Napříč všemi materiálovými variantami vláken se dá obecně říci, že využití rozptýlené vlákenné výztuže je nejčastěji za účelem omezení vzniku a šíření trhlin, tzn. celkové zlepšení vlastností betonu v tahu. Nejčastěji se vláknobeton používá na podlahy (hlavně i průmyslové, s předpokládaným velkým zatížením), základové desky či jako stříkaný beton (torkretovaný). Aplikace vláknobetonu torkretováním je ideální pro různě zakřivené a subtilní prvky – od nábytku až po tunelová ostění. [20]

Dalším důvodem pro použití vláknobetonu může být případ, kdy není použití klasické výztuže úplně vhodné. Příčinou může být nedostatek místa pro ukládání prutů, či například nedostatek času na jejich přípravu. Zároveň se tak uplatní i u velmi subtilních prvků, kde je použití klasické výztuže omezené. [21]

2.3 Textilní beton

Textilní beton (TRC) je kompozitní materiál skládající se z prostého betonu (nejčastěji HPC) a textilní (nekovové) výztuže. Za největší benefit textilního betonu se dá určitě považovat možnost realizovat o poznání subtilnější prvky než s využitím klasické ocelové výztuže. Tato skutečnost vychází primárně především z minimalizace krycí vrstvy výztuže, která zde není náchylná na korozi. V dnešní době se textilní beton dočkává postupně větší oblibě a častějšího uplatnění. [6]

2.3.1 Textilní výztuž

Co se impregnované textilní výztuže (použité v této práci) týče, funguje prakticky na stejném principu, jako klasická ocelová výztuž. Jak již bylo zmíněno výše, u textilní výztuže postačí značně menší krytí než u výztuže ocelové díky její chemické odolnosti. Zároveň jsou materiály textilních výztuží celkově tenčí a lehčí než běžná výztuž, což usnadňuje i manipulaci s nimi. Dají se snadno řezat či stříhat a upravovat do rozmanitých tvarů. [22] Možnou nevýhodou u malé krycí vrstvy výztuže může být například delaminace.

Možnosti textilní výztuže jsou široké. Vlákna (filamenty) jsou spojovány do svazků (rovingů) ze kterých se potom tvoří síť. Síť se používají jako 2D i 3D prvky (vrstvení 2D sítí s distancí užitím plastových vláken). Aby došlo k úplnému probetonování výztuží,

je potřeba použít vhodné složení betonové matrice. Optimálně by oka sítí měla být zhruba alespoň trojnásobně velká, než je maximální zrno kameniva ve směsi. Z tohoto důvodu se nejčastěji používá vysokohodnotný beton, kde je výrazně nižší maximální frakce kameniva, než u běžných betonů. Zároveň s nízkou frakcí kameniva se zlepšuje spolupůsobení matrice a textilie. [6] [23]

Textilie se vyrábí v různých rastroch sítí či pouze jako role nezapletených rovingů. Používá se zde jednotka tex, která udává váhu svazku v gramech na 1 km délky.

Aby rovingy tvořené jednotlivými vlákny dosáhly lepších vlastností, je potřeba zajistit spolupůsobení a celkové spojení jednotlivých prvků. První možností je stočení rovingu, tzv. twistování. Druhou možností je nasycení textilie pryskyřicí epoxidovou, polyesterovou, apod.). Prosycením jednotlivých vláken dojde k lepšímu spojení a roving začíná působit jako tuhá prutová výztuž. [23] [24] [25] Prosycení výztuže může posloužit zároveň ke snadné povrchové úpravě - opískování výztuže za účelem zlepšení soudržnosti s cementovou maticí.

2.3.2 Materiály

Při výrobě textilních výztuží se využívají především nekorozivní materiály disponující velkou pevností v tahu a vyšším modulem pružnosti. Největší uplatnění zde nachází rovingy z uhlíku, čediče, skla či aramidů. Ačkoliv zde odpadá problém s korozí výztuže, degradaci materiálu může způsobit agresivní prostředí betonu. Některé z materiálů jsou schopné odolávat takovému prostředí, jiné naopak potřebují dodatečnou ochranu. Náchylné k degradaci mohou být např. skelné textilie. [22] [23], proto se používá při aplikaci do betonu sklo alkalivzdorné – tzv. zirkoničitého typu s lubrikací odolnou silně alkalickému prostředí.

V podstatě by se zjednodušeně dalo také říci, že textilní beton můžeme považovat za zvláštní druh vláknobetonu, a to zejména u výztuží bez prosycení polymerní maticí. Zásadní rozdíl ovšem zůstává v rozmístění výztuže, buďto cíleném u TRC, nebo náhodném jako u FRC. V tomto směru můžeme TRC považovat za efektivnější, co se využitelnosti materiálu týče. [26]

2.3.3 Použití

Použití textilního betonu má již poměrně široké spektrum odpovídající jeho možnostem a výhodám. TRC je primárně využíván pro nenosné prvky. Vzhledem ke schopnosti vytvářet subtilní prvky nachází využití v nejrůznějších designových prvcích od interiérového nábytku až po fasádní panely. Celkově má TRC v tomto směru potenciál pro uplatnění v jinak těžko realizovatelných architektonických návrzích, například různé skořepinové prvky s funkcí zastřešení. Velmi často je také využíván pro zesilování stávajících konstrukcí (např. pilířů).

Dále nachází textilní beton uplatnění např. jako venkovní městský mobiliář, či u lávek pro pěší (Albstadt, 2010). [22] [27]

2.4 Kombinace TRC a FRC – stávající řešení

Jak již bylo zmíněno výše, textilní beton klade požadavky, mimo jiné, na strukturu betonové matrice z hlediska maximální frakce zrn kameniva, a tak bývá nejčastěji používána směs HPC. Jemnozrnná matrice umožňuje bezproblémové probetonování ok sítí a zároveň zajišťuje lepší spolupůsobení betonu s textilií. [6] Struktura takové směsi je velmi odolná, hlavně díky minimální pórovitosti, vůči agresivnímu prostředí a zároveň vykazuje vysokou pevnost. I přesto je zde však zásadním problémem křehkost materiálu, zejména impregnované textilie, kterou způsobuje právě materiálová povaha dokonale elastických vláken bez plastické části pracovního diagramu, ale také absence větších zrn kameniva – která by zajišťovala tzv. zámkový efekt. Pro zlepšení duktility betonu se přidávají například ocelová vlákna, která jsou zároveň schopná eliminovat rozevírání trhlin. [1]

U samotného TRC se po vzniku první trhliny a rozvoji trhlin v průřezu začíná zvyšovat napětí ve výztuži a dochází k rozevírání trhlin, a to až do překročení její tahové pevnosti. Přidaná vlákna mohou pozitivně ovlivnit vlastnosti kompozitu jak před vznikem první trhliny, tak i po ní. Ke vzniku viditelné první trhliny může docházet u některých typů vláken při vyšším napětí, než u samotného TRC bez vláken, kde je využití textilní výztuže do vzniku první trhliny minimální. [6] [28] Následně nastává tzv. multiple cracking, kdy dochází ke vzniku velkého počtu mikrotrhlin, u kterých je však omezeno jejich rozevírání a tím i spojení do větších trhlin. Ke vzniku těchto mikrotrhlin dochází ve větší ploše, než ke vzniku trhlin u TRC bez vláken. [6] [28]

3 Materiály

3.1 Směs

Pro účely tohoto experimentu byla použita již dříve vyvinutá receptura vysokohodnotného betonu (HPC) na Katedře konstrukcí pozemních staveb Fakulty stavební ČVUT v Praze. Krychelná pevnost prostého betonu po 28 dnech zrání dosahuje 130 MPa na krychlích o délce hrany 100 mm. Pevnost v tahu za ohybu měřená na trámečcích o rozměrech 40 x 40 x 160 mm tříbodovým ohybem dosahuje přibližně 9,5 MPa. Rozliti kužele směsi na rozlivkovém stolku je 30 cm, dle ČSN EN 1015-3 [29]. Beton je navržen jako samozhutnitelný. Zastoupení jednotlivých složek ve směsi je uvedeno v tabulce 3.1. Maximální zrno kameniva v receptuře bylo použito 1,2 mm.

Složka	ρ [kg/m ³]	m [kg]	V [m ³]
CEM I 42,5R	3000	650	0,217
Technický písek	2650	1200	0,453
Mikrosilika (křemičitý úlet)	2200	75	0,034
Křemenná mouka ST 6	2650	265	0,100
Superplastifikátor na bázi PCE	1084	18	0,017
Voda	1000	180	0,180
Celkem		2388	1,000

Tabulka 3.1: Složení použité směsi

Cement

Cement je základní složkou pro betonovou směs. Druhy cementu lze základně dělit na 5 tříd, a to označením CEM I-V. Za tímto označením nalezneme číslici, která udává tlakovou pevnost cementu po 28 dnech na úlomcích trámečků o rozměrech 40x40x160 mm. Tzn., že zde použitý cement s označením 42,5 vykazuje po 28 dnech pevnosti 42,5 MPa. Cement dosahující vysoké počáteční pevnosti nazýváme jako rychlovazný a tuto informaci označuje přídatné písmeno R za číslicí označující pevnost cementu.

Zde použitý cement třídy CEM I se označuje jako portlandský cement. Tento druh cementu se vyznačuje strmým nárůstem počáteční pevnosti v tlaku a umožňuje tak brzké odbednění prvků. Stejně tak dochází k rychlému hydratačnímu procesu, během kterého

se uvolňuje velké množství tepla. To může být bráno jako výhoda pro použití při nižších teplotách, zároveň však může teplo uškodit betonu na výsledných vlastnostech a trvanlivosti. [30]

Křemičitý úlet (mikrosilika)

Křemičitý úlet, známý též jako mikrosilika, je jemná příměs obsahující primárně amorfni oxid křemičitý. Zrna mikrosiliky dosahují maximálního průměru 0,001 mm. Jako příměs do betonu se přidává kvůli vylepšení vlastností betonové směsi jako např. zlepšení soudržnosti, zpracovatelnosti či kvůli lepší odolnosti vůči agresivnímu prostředí. Celkově pozitivně ovlivňuje pórovitost betonu, což má za následek i např. vodotěsnost a vyšší pevnost. Právě to je důvodem použití mikrosiliky u vysokopevnostních betonů. [31]

Superplastifikátor

Superplastifikátor je přísada která je přidávána do betonu za účelem výrazného snížení vodního součinitele. To způsobuje zlepšení parametrů betonu ve smyslu výrazného snížení pórovitosti, a tím pádem i zlepšení mechanických vlastností. [31] Superplastifikátory na bázi polykarboxylátů (PC) prodlužují dobu zpracovatelnosti čerstvé směsi betonu. [23]

3.2 Vlákna

Byly použity 4 různé typy vláken do betonu. Vlákna se liší materiálem, délkou i průřezem a tím pádem vykazují rozdílné chování v betonové směsi.

3.2.1 MasterFiber 012

MasterFiber 012 je polypropylenové monofilní vlákno určené přímo pro použití v betonu. Vlákno je bezbarvé, po délce rovné a má kruhový průřez. Délka tohoto vlákna činí 12 mm.

Vlákno je velmi jemné a snadno se díky tomu rozptýlí v betonové směsi. Výsledkem je trojrozměrná síť rozprostřená v celém objemu směsi. Na základě toho dochází ke snížení účinků objemových změn (eliminuje tvorbu trhlin), snížení průsaku a zvýšení odolnosti vůči působení mrazu. V případě požáru lépe udržuje celistvost betonu a zabraňuje odlupování. Zároveň vlákno disponuje vysokou odolností vůči chemickým látkám.

Vlákno má díky své jemnosti velký měrný povrch, s čímž souvisí možná vyšší spotřeba vody. Dávkování vlákna výrobce doporučuje cca 1 kg/m³ betonu, maximálně však 3 kg/m³.

MasterFiber 012 se doporučuje používat např. klasicky na podlahy, ale díky odolnosti vůči vodě i na konstrukce zadržující vodu a v dalších oblastech. Vlákno lze použít i do klasického železobetonu, nikoliv však jako primární nosná výztuž. (informace převzaty z technického listu výrobce Master Builders Solutions CZ s.r.o.)



Obrázek 3.1: MasterFiber 012

3.2.2 MasterFiber 401

MasterFiber 401 je barvou nažloutlé monofilní vlákno z polyvinylalkoholu. Vlákno je po délce rovného tvaru a má kruhový průřez. Délka tohoto vlákna činí 12 mm.

Vlákno najde uplatnění jako konstrukční výztuž pro (ultra)vysohodnotné betony. Předností vlákna je vysoká pevnost ideální pro omezení rozvoje trhlin. Zároveň je vhodné do agresivního či korozivního prostředí.

Dávkování vláken výrobce doporučuje od 15 kg/m³ do cca 45 kg/m³.

MasterFiber 401 lze využít na fasádní panely či na různé prefabrikované prvky. (informace převzaty z technického listu výrobce Master Builders Solutions CZ s.r.o.)



Obrázek 3.2: MasterFiber 401

3.2.3 MasterFiber 230

MasterFiber 230 je strukturální polypropylenové vlákno. Vlákno je dlouhé 30 mm, po délce zvlněné pro lepší ukotvení v matici a má eliptický průřez. Toto vlákno je znatelně delší než ostatní zkoušená vlákna.

Vlákno je vhodné do alkalického prostředí, tzn. disponuje vysokou odolností vůči chemikáliím a hodí se do korozivního i agresivního prostředí.

Optimální dávkování se u výrobce uvádí mezi 1,5 kg/m³ až 9 kg/m³.

Použití vláken se doporučuje do desek, průmyslových podlah či prefabrikovaných prvků. (informace převzaty z technického listu výrobce Master Builders Solutions CZ s.r.o.)



Obrázek 3.3: MasterFiber 230

3.2.4 MasterFiber 482

MasterFiber 482 je vlákno z vysokouhlíkové oceli potažené mosazí. Po délce jsou vlákna rovná a mají kruhový průřez. Vlákna dosahují délky 13 mm.

Vlákna jsou určena především pro vyztužování (ultra)vysokohodnotných betonů. Disponují vysokou pevností v tahu a dokáží tak eliminovat trhliny a zároveň přenesou větší zátěž i na již porušeném průřezu. Těmto účinkům napomáhá taktéž i možnost výrazně vyšší koncentrace vláken než u předešlých materiálů, aniž by byla snížena schopnost míchání betonu. Vlákna jsou taktéž vhodná pro zásaditá prostředí.

Dávkování vláken je od výrobce doporučeno od 60 kg/m^3 do cca 150 kg/m^3 .

Vlákna se uplatní na sloupy, předpjaté nosníkové trámy, prefabrikované prvky jako lávky apod., či obecně jako konstrukční výztuž. (informace převzaty z technického listu výrobce Master Builders Solutions CZ s.r.o.)



Obrázek 3.4: MasterFiber 482

3.3 Uhlíková textilie – HTC 10/15-40

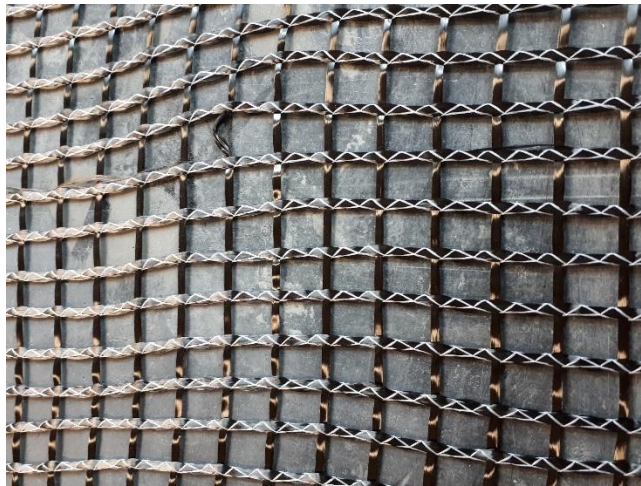
Uhlíková vlákna jsou obecně velmi tenká, jejich průměr je asi 10 x menší než u lidského vlasu. Navzdory tak malému průřezu jsou vlákna i tak velmi pevná, ačkoliv s relativně nízkým modulem pružnosti. Nevýhodou může být zkracování vlákna za zvýšené teploty či poměrně vysoká cena. [6]

Pro vyztužení vzorků v kombinaci s vláknennou výztuží byla použita karbonová síť od české firmy Frisiverto o rozměrech oka $10 \times 15 \text{ mm}$. Síť má rozdílné parametry v obou směrech. Podélný nosný směr je opletený, z materiálu Carbon 48K a s hustotou $1,78 \text{ g/cm}^3$. Příčný směr je z materiálu Carbon 12K a hustotou se neliší.

Nosný podélný směr obsahuje 78 nití na metr a plocha výztuže činí 142 mm^2 , přičemž ve směru opačném klesá počet nití na 55 na metr a plocha výztuže na pouhých 5 mm^2 .

Tato uhlíková textilie nalezne uplatnění ať už v jednodušších realizacích u podlah či fasádních prvků, tak u náročnějších dopravních staveb jako výztuha mostů, tunelů či

silničních desek. (informace převzaty z technického listu výrobce Frisiverto) Síť byla aplikována do vzorků v obou směrech, kde vzorky budou prezentovat slabě vyztužený průřez, a naopak silněji vyztužený průřez výhodným použitím jedné stejné textilie. Pro použití v experimentu byla textilie sycena epoxidovou pryskyřicí popsanou níže a dále opískována křemičitým pískem frakce 0,1-0,6 mm za účelem zlepšení soudržnosti výztuže v betonu.



Obrázek 3.5: Uhlíková textilie před impregnací

3.3.1 Pryskyřice – Sikafloor 150

Pro tento experiment byla použita dvousložková epoxidová pryskyřice Sikafloor 150. Pryskyřice je nízkoviskózní a je primárně určena pro penetraci betonových podkladů či jako vyrovnávací stěrka a osvědčila se v různých předchozích aplikacích. Poměr pryskyřice(plnidla) a tvrdidla je 3:1 pro dosažení nejlepších mechanických vlastností. (informace převzaty z technického listu výrobce Sika CZ, s.r.o.)

4 Stanovení optimálního množství vláken

4.1 Příprava a zkoušení vzorků

Pro stanovení optimálního množství jednotlivých výztužných vláken byly prováděny dva typy základních destruktivních zkoušek HPC, a to zkouška tlaková a zkouška v tahu za ohybu (tříbodovým ohybem). Všechny mechanické zkoušky v rámci této práce byly prováděny v laboratoři Univerzitního centra energeticky efektivních budov (UCEEB).

V každé sadě byly připraveny tři vzorky o velikosti 40x40x160 mm (dále trámečky) a též tři vzorky o velikosti 100x100x100 mm (dále krychle). Krychle byly standardně zkoušeny po 28 dnech stáří, trámečky však pouze po 7 dnech stáří. Hlavním důvodem tohoto nestandardního kroku byl omezený čas na zpracování práce, kdy bylo nutné pro provedení zbylých částí experimentu stanovit optimální množství vláken v kratším časovém horizontu a pokračovat s výrobou vzorků.

Formy na trámečky i kostky byly před betonáží vymazány odbedňovacím olejem. Po betonáži byly vzorky do odbednění přikryty fólií pro zamezení odpařování vody a následného nežádoucího popraskání vzorků vysycháním.

Vzorky byly po odformování označeny číslem a datumem betonáže a uloženy do vodní lázně v klimatické místnosti tak, aby byly dodrženy požadavky ČSN EN 13670 [32]. Před prováděním zkoušek byly následně vzorky vyjmuty, osušeny, změřeny a zváženy. Zároveň byla každá čerstvě umíchaná směs aplikována na zkoušku zpracovatelnosti - stanovení konzistence čerstvé malty dle ČSN EN 1015-3 [29], a to pro číselné zhodnocení zpracovatelnosti směsi pro různé koncentrace výztužných vláken v porovnání s referenční směsí bez vláken, a zároveň pro vizuální posouzení při míchání směsi a jejím ukládání do forem.

4.1.1 Tlaková zkouška

Běžná destruktivní zkouška tlakem byla prováděna dle normy ČSN EN 12390-3. [33] Zkouška spočívá v postupném zvyšování zatížení až po limitní hodnotu, při které dochází k destrukci vzorku. Z tohoto maximálního zatížení se poté vypočítá pevnost betonu v tlaku, udávající vztah (4.1). [33] [23]

$$f_c = \frac{F_{max}}{A_c} [MPa] \quad (4.1)$$

Kde F_{max} je maximální síla při porušení vzorku [N]

A_c je zatěžovaná plocha vzorku [mm²]

Tlaková zkouška byla aplikována na úlomky trámečků (40 x 40 x 160 mm) zkoušené po 7 dnech a taktéž na krychle o rozměrech 100 x 100 x 100 mm zkoušené po 28 dnech stáří.

4.1.2 Zkouška v tahu za ohybu

Zkouška v tahu za ohybu (tříbodový ohyb) na trámečcích 40 x 40 x 160 mm byla prováděna dle normy ČSN EN 12390-5. [34] Po odzkoušení v tahu za ohybu se oba úlomky vzorku dále použily ještě na tlakovou zkoušku. Pevnost v tahu za ohybu při zkoušce tříbodovým ohybem je dána vztahem (4.2). [35]

$$f_{cf} = \frac{3 \times F_{max} \times l}{2 \times b \times h^2} [MPa] \quad (4.2)$$

Kde F_{max} je maximální síla při porušení vzorku [N]

l je vzdálenost mezi podporami [mm]

b šířka průřezu [mm]

h výška průřezu [mm]

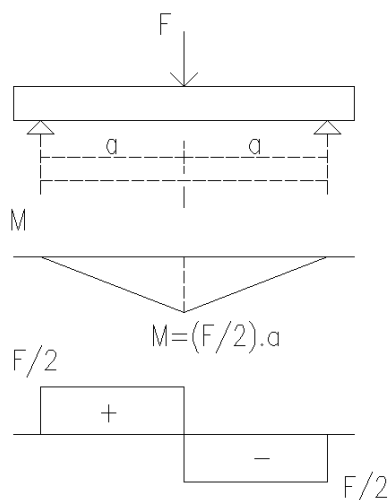


schéma zkoušky (levý obrázek), vzorek po provedení zkoušky (pravý obrázek)

Obrázek 4.1: Schéma zkoušky tříbodovým ohybem a reálná zkouška

4.1.3 Zkouška rozlité kužele dle ČSN EN 1015-3 [29]

Tato zkouška byla volena s ohledem na frakci kameniva, která je zde znatelně menší než u běžných betonů. HPC se tímto blíží spíše cementovým maltám. Čerstvá směs se nalije do formy o tvaru komolého kužele s průměrem dolní podstavy 10 cm, který se následně odejme kolmo vzhůru. Po roztečení betonu se změří největší průměr ve dvou na sebe kolmých směrech, kdy průměr těchto dvou hodnot je brán jako výsledná hodnota rozlité (max. 30 cm). [29]

4.2 Zkoušení referenčních těles

4.2.1 Zkouška trámečků v tahu za ohybu a v tlaku na úlomcích

Zkoušení trámečků bez výztužných vláken jako reference o rozměrech 40 x 40 x 160 mm v tahu za ohybu se provádělo dle již výše zmíněné normy ČSN EN 12390-5 ve stáří 7 dní. [34] Vzorky prostého betonu dosahovaly průměrné pevnosti v tahu za ohybu 9,58 MPa. Následně byly úlomky trámečků zkoušeny tlakovým namáháním, kdy průměrná tlaková pevnost dosahovala hodnoty 97,1 MPa. Tato pevnost je mírně nižší než v 28 dnech a odpovídá stáří vzorku 7 dní, nicméně ukazuje rychlý nárůst pevností typický pro čisté portlandské cementy. Krychle budou následně zkoušeny ve standardních 28 dnech stáří. Při zkoušení těchto referenčních těles se neprojevil žádný výrazný odchylky či anomálie. Podrobné výsledky popisují tabulky 4.1 a 4.2.

Název vzorku	a [mm]	b [mm]	l [mm]	m [kg]	V [m ³]	ρ [kg/m ³]	F _{max} [kN]	f _{cf} [MPa]	Øf _{cf} [MPa]
0.0.1	40,5	40,0	160,00	0,595	0,000259	2297	4,60	10,7	
0.0.2	39,6	40,0	160,00	0,583	0,000253	2302	3,82	9,1	9,58
0.0.3	39,9	40,0	160,00	0,587	0,000255	2299	3,84	9,0	

Tabulka 4.1: Tabulka pevností v tahu za ohybu měřená na trámečcích

Název vzorku	a [mm]	b [mm]	l [mm]	m [kg]	V [m ³]	ρ [kg/m ³]	F _{max} [kN]	f _c [MPa]	øf _c [MPa]
0.0.1a	40,5	40,0	160,00	0,595	0,000259	2297	157,02	97,0	
0.0.1b	40,5	40,0	160,00	0,595	0,000259	2297	156,33	96,6	96,8
0.0.2a	39,6	40,0	160,00	0,583	0,000253	2302	155,27	98,1	
0.0.2b	39,6	40,0	160,00	0,583	0,000253	2302	159,10	100,5	99,3
0.0.3a	39,9	40,0	160,00	0,587	0,000255	2299	151,48	94,9	
0.0.3b	39,9	40,0	160,00	0,587	0,000255	2299	152,02	95,3	95,1
									97,1

Tabulka 4.2: Tabulka pevností v tlaku měřená na trámečcích

4.2.2 Zkouška krychlí v tlaku

Zkoušení krychlí bez výztužných vláken jako reference v tlaku bylo provedeno dle již výše zmíněné normy ČSN EN 12390-3. [33] Krychle o rozměrech 100 x 100 x 100 mm byly zkoušeny ve stáří 28 dní. Průměrná tlaková pevnost dosahovala 131,74 MPa.

Při zkoušení těchto referenčních těles se neprojeví žádné výrazné odchylky či anomálie. Souhrnné výsledky popisuje tabulka 4.3.

Název vzorku	a [mm]	b [mm]	h [mm]	m [kg]	V [m ³]	ρ [kg/m ³]	F _{max} [kN]	f _c [MPa]	øf _c [MPa]
0.0.4	100,0	100,0	100,4	2,395	0,00100	2385	1312,3	130,7	
0.0.5	100,0	100,0	98,9	2,360	0,00099	2386	1431,3	144,7	131,74
0.0.6	100,0	100,0	99,3	2,353	0,00099	2370	1189,4	119,8	

Tabulka 4.3: Tabulka pevností v tlaku měřená na krychlích



Krychle z prostého betonu po odzkoušení (levý obrázek), trámeček po odzkoušení (pravý obrázek)

Obrázek 4.2: Tlaková zkouška vzorků

4.3 MasterFiber 012

4.3.1 Použitá množství a zpracovatelnost

Pro zjištění ideálního množství vláken ve směsi bylo odrazovým můstkem doporučení výrobce z technického listu (Master Builders Solutions CZ s.r.o.), na základě kterého byly stanoveny 3 různé koncentrace těchto polypropylenových vláken. Výrobce udává jako vhodné množství rozmezí 600 g až 1 kg/m³ betonu, při optimalizaci směsi zvýšení až na 3 kg/m³ betonu.

Vzhledem ke konzistenci použité směsi a účelu vláken bylo první množství zvoleno na 2 kg/m³. Dále bylo množství navyšováno vždy se stejným odstupem pro lepší vzájemné porovnání výsledků. Celkově tedy byly vybetonovány sady vzorků s množstvím PP vláken 2 kg/m³, 4 kg/m³ a 6 kg/m³.

Díky tomu, jak jsou tato vlákna jemná, je zpracovatelnost i při vyšších koncentracích relativně dobrá. Při nejvyšší realizované koncentraci (6 kg/m³) už ale bylo možné po zvednutí kužele při zkoušce zpracovatelnosti pozorovat, že směs se vůbec nerozlila z původního rozměru podstavy 10 cm. Vizually bylo znatelné pouze drobné sednutí po výšce a zároveň byly vidět jednotlivé vrstvy betonu, které se při plnění kužele již nepropojily. Toto množství vláken bylo vyřazeno z důvodu potřeby zkombinování s textilní výztuží, kdy by mohl být problém s probetonováním sítě, protože směs již nebyla vůbec tekutá, natož samozhutnitelná, působila spíše plasticky.



Použité množství 2 kg/m³ (levý obrázek), použité množství 6 kg/m³ (pravý obrázek)

Obrázek 4.3: Rozlití kužele MasterFiber 012

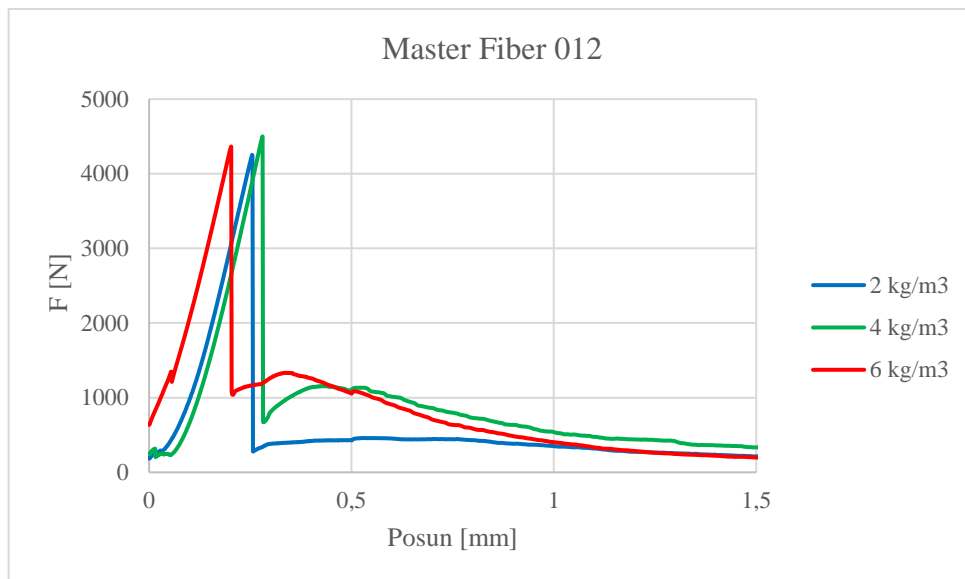
4.3.2 Struktura betonové směsi

U těchto vláken bylo při zkoušce rozlití patrné, že na sebe vážou cementovou kaši. Na okrajích rozlitého kužele však bylo možné pozorovat v malém množství unikající volnou vodu s cementovou suspenzí, lze vidět na obrázku 4.3 výše. Ve struktuře bylo znatelné, že se vlákna dokonale rozptýlila a díky své jemnosti udržovala směs celistvou. Hodnoty rozlití kužele uvádí tabulka 4.4.

4.3.3 Zkoušení vzorků, způsob porušení

Nejprve byly zkoušeny trámečky (40 x 40x 160 mm) v tahu za ohybu a následně jejich úlomky v tlaku. U nejnižšího použitého množství bylo chování v tahu za ohybu velmi podobné jako u prostého betonu. Po první trhlině již nedošlo k výraznému nárůstu zatížení, které by vlákna přenášela. Při zvýšení koncentrace na 4 kg/m³ je možné z grafu pozorovat výrazně lepší aktivaci vláken po první trhlině, kdy dochází k jejímu přemostění mnohem efektivněji než u nižší koncentrace. Zároveň zde byla síla potřebná k porušení průřezu nejvyšší ze všech zkoušených koncentrací.

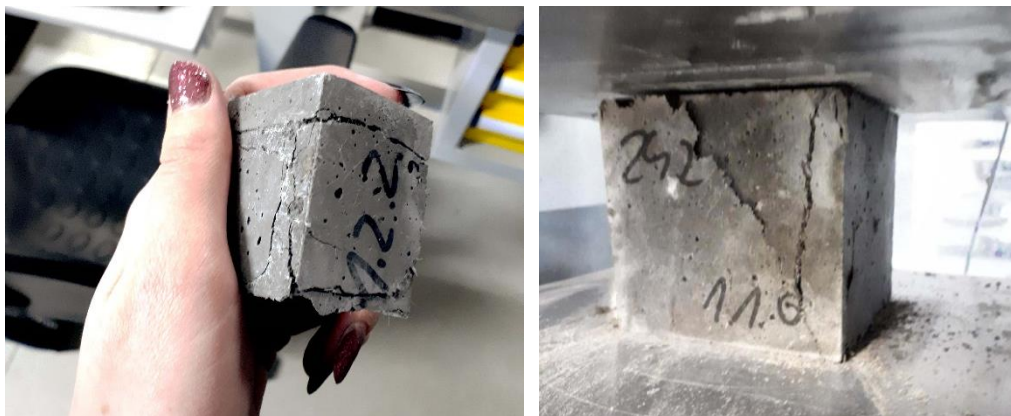
U nejvyššího použitého množství byl průřez porušen dříve a ve fázi po první trhlině nedošlo k výraznému zlepšení. Vše výše popsané je znázorněno na grafu, obrázek 4.4. Za každé zkoušené množství byl vybrán průběh křivky typického vzorku.



Obrázek 4.4: Graf závislosti síly na posunu MF 012

Zásadním rozdílem u obou zatěžovacích zkoušek oproti prostému betonu byl způsob porušení již zmíněný výše. U zkoušky v tahu za ohybu vzorek po první trhlině neztratil zcela únosnost, jeho pevnost poté klesala postupně, což je žádoucí jev pro bezpečnost konstrukce.

Při tlakovém namáhání trámečků i krychlí se vždy s rostoucím množstvím vláken zlepšovala integrita vzorků po dosažení maximálního zatížení. Vzorek byl viditelně porušený vždy po vrstvách, ale vlákna ho stále udržovala celistvý, konkrétně lze vidět na obrázku 4.5. Manuálně pak však již bylo snadné vrstvy oddělit.



Porušení trámečku (levý obrázek), porušení krychle (pravý obrázek)

Obrázek 4.5: Porušené vzorky po zkoušce tlakem MF 012

Průměrné tahové pevnosti jednotlivých množství se pohybovaly na podobných hodnotách, převážně o něco vyšších než referenční vzorky z prostého betonu. Dále byly

zkoušeny úlomky trámečků v tlaku, kdy mezi 2 kg/m³ a 4 kg/m³ došlo k určitému nárůstu tlakové pevnosti. S dalším zvýšením množství se již pevnost výrazně neměnila. U zkoušení krychlí v tlaku docházelo s narůstajícím množstvím vláken ve směsi k postupnému snižování tlakové pevnosti. Průměrné hodnoty pevností v tahu za ohybu i tlaku za každé tři zkoušené vzorky popisuje tabulka 4.4. Podrobné výsledky jsou zahrnuty v příloze A.

Množství	Rozlití kužele [cm]	Trámečky σ_{cf} [MPa]	Trámečky σ_c [MPa]	Krychle σ_c [MPa]
2 kg/m ³	19	9,76	91,80	119,42
4 kg/m ³	12	9,46	93,27	112,83
6 kg/m ³	10	9,93	93,97	93,49

Tabulka 4.4: Souhrnné výsledky MasterFiber 012

4.3.4 Vyhodnocení a návrh optimálního množství vláken

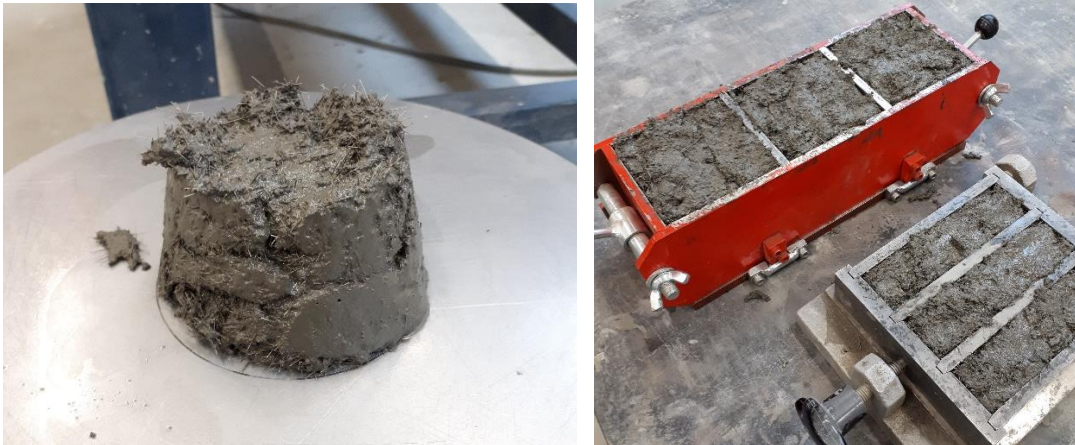
Na základě výše popsaných výsledků a vlastností bylo jako nejvhodnější množství zvoleno 4 kg/m³. Tato směs vykazovala v souhrnu nejlepší chování a bude vhodná pro použití v kombinaci s textilní výztuží.

4.4 MasterFiber 401

4.4.1 Použitá množství a zpracovatelnost

U těchto PVA vláken výrobce uvádí jako vhodné dávkování vláken od zhruba 15 kg/m³ do cca 45 kg/m³, přičemž jako ideální dávkování je zde uvedena hodnota 32,5 kg/m³. Použitá množství v rámci tohoto experimentu byla 10, 20, 30 a 40 kg/m³.

Na základě posouzení zpracovatelnosti čerstvé směsi bylo nejvyšší množství 40 kg/m³ rovnou vyřazeno z výběru optimálního množství vláken pro použití s textilní výztuží. Vlákna mají celkově velmi dobrou soudržnost s cementovou maticí, avšak směs nebyla při tomto množství již vůbec tekutá, naopak velmi tuhá a nepoddajná. Bylo obtížné vyplnit touto směsí formu, což se projevilo výrazně i na vzhledu vzorků, viz obrázek 4.6. Nižší použitá množství byla, co se týče zpracovatelnosti, v pořádku a tím pádem bylo pro celkové vyhodnocení optimálního množství poté již použito výsledků ze zatěžovacích zkoušek.



Zkouška rozlití kužele (levý obrázek), směs uložená do forem (pravý obrázek)

Obrázek 4.6: Struktura směsi MF 401 při množství 40 kg/m³

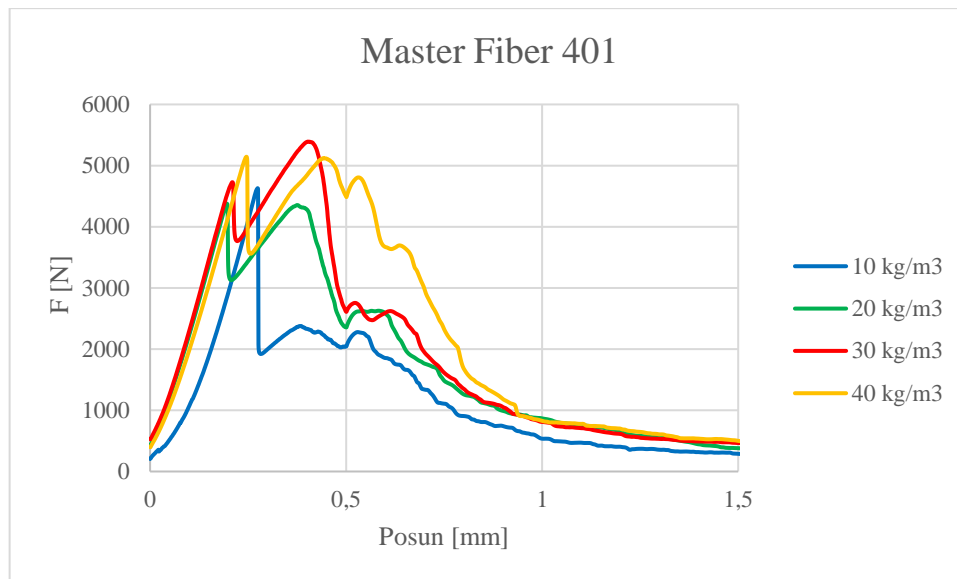
4.4.2 Struktura betonové směsi

U těchto vláken lze pozorovat naprosto dokonalou soudržnost s cementovou kaší, což ale postupně zhoršuje manipulaci a je obtížnější směs oddělit. Při rozlití kužele bylo viditelné, že směs postupně ztrácí svou tekutost při zvyšování množství vláken. Rozptýlení vláken v rozlitém betonu bylo rovnoměrné. Hodnoty rozlití kužele jsou uvedeny v tabulce 4.5 níže.

4.4.3 Zkoušení vzorků, způsob porušení

Stejně jako u přechozích vláken byly nejprve zkoušeny trámečky v tahu za ohybu ve stáří 7 dní. Průběh zkoušky je znázorněn na grafu, obrázek 4.7. Za každé aplikované množství byla vybrána křivka typického vzorku.

U těchto vláken lze pozorovat ve značné míře jejich účinek po první trhlině. Postupně se zde efekt navyšoval od nejnižší dávky 10 kg/m³ až do třetí, tj. 30 kg/m³. Při dalším zvýšení množství již nedošlo ke zlepšení. Mez pevnosti je zde celkově na vysokých hodnotách, což zapříčiňuje samotný materiál vláken, který je velmi pevný a odolný. O houževnatosti materiálu svědčí také koncová část diagramu těsně před postupnou ztrátou únosnosti. Zároveň je zde vidět i rychlé přemostění vláknů, kdy zatížení při porušení betonového průřezu příliš výrazně neklesne.



Obrázek 4.7: Graf závislosti síly na posunu MF 401

Porušení vzorků bylo při zatěžovacích zkouškách velmi podobné jako u předchozích vláken. Vzorky si držely svou celistvost i po destrukci a díky pevnosti materiálu bylo obtížné úplně manuálně oddělit části v místě porušení. Porušení je viditelné na obrázku 4.8.



Vzorek po zkoušce v tahu za ohybu (levý obrázek), vzorek po odzkoušení tlakem (pravý obrázek)

Obrázek 4.8: Porušení vzorků MF 401

Průměrné tahové pevnosti postupně narůstaly až do množství 30 kg/m³. Nejvyšší použité množství mělo již opačný efekt. Zároveň se u tohoto množství projevil výrazný propad tlakové pevnosti měřené na trámečcích. Ostatní tlakové pevnosti měřené na trámečcích se pohybovaly na podobných hodnotách. Tlakové pevnosti změřené na krychlích klesaly ztelněji, přičemž u nejvyššího množství došlo taktéž k velkému poklesu pevnosti.

Příčinou toho zřejmě byl již velký objem vláken v betonu což způsobilo značné snížení pevnosti. Souhrnné hodnoty jsou sepsány v tabulce 4.5. Podrobné výsledky jsou uvedeny v příloze A.

Množství	Rozlítí kužele [cm]	Trámečky σ_{cf} [MPa]	Trámečky σ_c [MPa]	Krychle σ_c [MPa]
10 kg/m ³	30	9,70	105,13	119,56
20 kg/m ³	23	10,69	103,33	114,25
30 kg/m ³	13	13,02	102,30	107,13
40 kg/m ³	10	11,38	81,87	69,49

Tabulka 4.5: Souhrnné výsledky MasterFiber 401

4.4.4 Vyhodnocení a návrh optimálního množství vláken

Na základě výše uvedených výsledků a vlastností bylo jako optimální množství pro použití v kombinaci s uhlíkovou textilií vybráno 30 kg/m³. Tato směs vykazovala nejlepší parametry ve všech směrech.

4.5 MasterFiber 230

4.5.1 Použitá množství a zpracovatelnost

Toto strukturální polypropylenové vlákno lze dle výrobce ideálně dávkovat v mezích 1,5 kg/m³ až 9 kg/m³. Z toho vychází zvolené množství počínající hodnotou 2 kg/m³. Další sady vzorků byly vždy betonovány se stejným přírůstkem množství a to 5 kg/m³, 8 kg/m³ a přesah přes doporučenou hranici dávkování – 11 kg/m³. U tohoto typu vlákna lze předpokládat zhoršenou manipulaci kvůli poměru velikosti vzorků k délce vlákna, která je zde okolo 30 mm.

Na základě posouzení zpracovatelnosti čerstvé směsi bylo nejvyšší množství 11 kg/m³ rovnou vyřazeno z výběru pro optimální množství vláken pro použití v kombinaci s textilní výztuží. Tuto směs bylo komplikované uložit do forem kvůli již viditelně nevhodně zvolenému množství vláken, lze vidět na obrázku 4.9. Je viditelné jiné chování dlouhých vláken v porovnání s ostatními, kdy jsou sice ve směsi po zamíchání rovnoměrně rozptýlena, ale na rozlívkovém stolku zůstávají ve hmotě v jeho středu.

Vlákna budou zřejmě vhodná spíše pro objemnější tělesa bez tvarových složitostí, protože by ve formě nebyla rovnoměrně rozptýlena.



Použité množství vláken 2 kg/m³ (levý obrázek), použité množství vláken 11 kg/m³ (pravý obrázek)

Obrázek 4.9: Zkouška rozlití kužele MF 230

4.5.2 Struktura betonové směsi

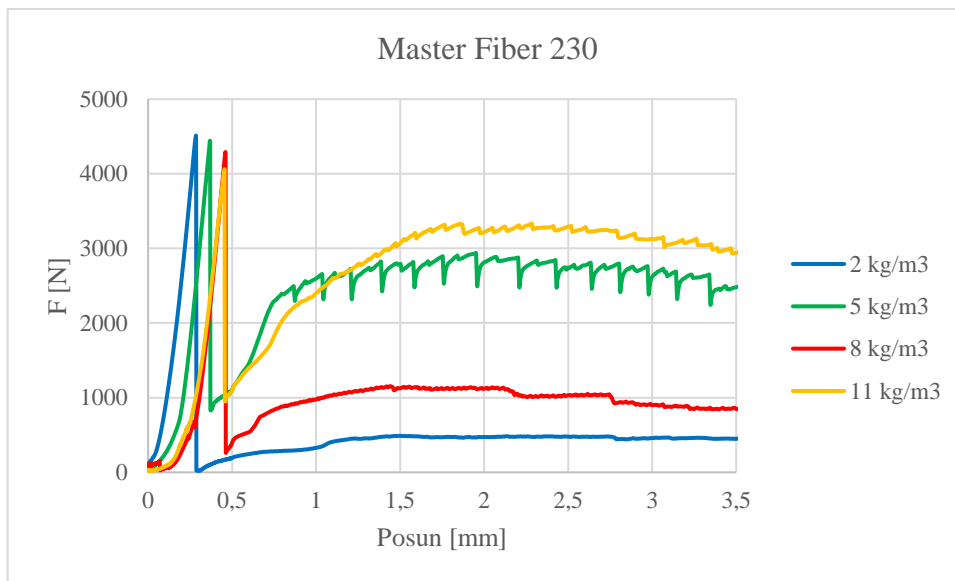
U těchto vláken bylo možné pozorovat vytváření shluků. Nedocházelo zde příliš k navázání cementové kaše na vlákna, naopak směs byla při rozlití zadržována jen ve shluku vláken a postupně odtékala ven. Toto zřejmě zapříčinila hlavně délka vláken, která je výrazně větší než u ostatních zkoušených vláken.

4.5.3 Zkoušení vzorků, způsob porušení

První v řadě byly zkoušeny trámečky o rozměrech 40x40x160 mm v tahu za ohybu ve stáří 7 dní. Průběhy zkoušek za každé aplikované množství znázorňuje graf, obrázek 4.10. Za každou skupinu byl vybrán typický vzorek.

U nejnižšího aplikovaného množství nebyl výztužný efekt vláken nijak razantní, křivka je velmi podobná jako u MasterFiber 012 při zcela stejném množství vláken ve směsi. Při zvýšení množství na 5 kg/m³ dochází ve fázi otevírání trhliny k výrazně efektivnějšímu přemostění. Následně docházelo k postupnému přetrhávání vláken na průřezu.

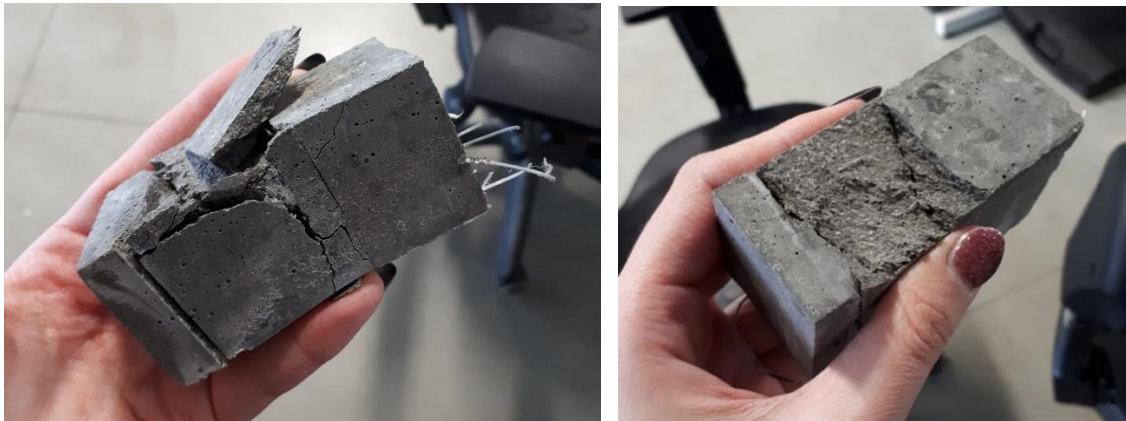
U následného zvýšení množství na 8 kg/m³ došlo v zásadě zpět k opačnému efektu kdy efektivita vláken rapidně klesla oproti předchozímu zkoušenému množství. U nejvyššího množství (11 kg/m³) došlo sice znovu na znatelně lepší využití vláken, avšak nárůst nebyl vůči množství 5 kg/m³ poměrově příliš efektivní a směs byla velmi obtížně zpracovatelná, jak již bylo zmíněno výše.



Obrázek 4.10: Graf závislosti síly na posunu MF 230

Po zkoušce třibodovým ohybem bylo možné na tělesech pozorovat vlákna přetrhaná pod vlivem síly, ale zároveň místy i vlákna vytažená z betonu. Vytažení vláken mohla způsobit zřejmě nízká soudržnost s cementovou maticí, která byla znatelná již při zkoušce rozlité kužele. Zároveň byla viditelná větší koncentrace vláken na nálevné straně vzorku než na spodní straně. To bylo zřejmě způsobeno opět strukturou vláken, která na sebe příliš nevážou kaši a dochází tak potom k nerovnoměrnému rozlité betonu a rozptýlení vláken. Zároveň lze toto přisoudit možná i ne zcela vhodnému poměru délky vláken a rozměrů trámečku, kdy průřez trámečku disponuje rozměry průřezu 40 x 40 mm a vlákna jsou dlouhá 30 mm.

Při tlakových zkouškách se trámečky i krychle porušily velmi obdobně jako předchozí již popsaná vlákna. Byla zde převážně zachována celistvost a porušení bylo znatelné po vrstvách v závislosti na orientaci a rozptýlení vláken. Kvůli velikosti vláken zřejmě nedošlo k ideálnímu rozptýlení u okrajů vzorků, kde následně docházelo k odpadávání vrstev prostého betonu, ukazuje obrázek 4.11. To potvrzuje, že tato vlákna budou vhodnější pro aplikace na objemnější tělesa, případně i pro jiné typy betonů, např. na konstrukce podlah.



Obrázek 4.11: Porušení vzorků po zkoušce tlakem MF 230

Průměrné tahové pevnosti na trámečcích postupně klesaly, rozdíly mezi hodnotami jsou však minimální. Při zkoušení trámečků v tlaku byl také zaznamenán postupný a již zřetelnější pokles. U nejvyššího množství již zřejmě vlákna zmenšovala plochu betonu přenášející tlak a došlo tím k výraznějšímu snížení pevnosti. Podobné chování je patrné i na zkoušených krychlích v tlaku. Vlákna jsou celkově objemná a tím ve vyšších množstvích ubírají betonu na pevnosti. Souhrnné hodnoty jsou sepsané v tabulce 4.6. Podrobné výsledky zkoušek jsou uvedeny v příloze A.

Množství	Rozlítí kužele [cm]	Trámečky σ_{cf} [MPa]	Trámečky σ_c [MPa]	Krychle σ_c [MPa]
2 kg/m ³	30	10,27	105,33	123,43
5 kg/m ³	23	9,78	105,80	124,41
8 kg/m ³	19	9,46	102,60	111,33
11 kg/m ³	16	9,59	97,67	112,79

Tabulka 4.6: Souhrnné výsledky MasterFiber 230

4.5.4 Vyhodnocení a návrh optimálního množství vláken

Na základě výše uvedených výsledků a vlastností bylo jako optimální množství pro použití v kombinaci s uhlíkovou textilií vybráno 5 kg/m³. Tato směs vykazovala nejefektivnější využití vláken v kombinaci s dobrou zpracovatelností, rozptýlením vláken a hutností směsi bez kaveren.

4.6 MasterFiber 482

4.6.1 Použitá množství a zpracovatelnost

Tato ocelová mikrovlákná lze dle výrobce dávkovat v opravdu širokém rozptylu, a to mezi 60-150 kg/m³. U ocelových vláken obecně díky jejich struktuře a materiálu lze používat razantně vyšší množství oproti dalším vláknům použitým v této práci. Byly zde vybetonovány sady vzorků obsahující 80 kg/m³, 100 kg/m³ a 120 kg/m³.

Zpracovatelnost byla u všech tří aplikovaných koncentrací velmi dobrá a při zkoušce rozlití kužele bylo vždy dosaženo hodnoty rozlití 30 cm. Na základě toho nebylo žádné množství po pouhé zkoušce rozlití kužele vyřazeno.

4.6.2 Struktura betonové směsi

Toto ocelové mikrovlákná disponuje velmi nízkou absorpcí vody, což zajistilo stále stejnou tekutost směsi při všech zkoušených množstvích vláken a tím pádem i snadné rozlévání do forem.

4.6.3 Zkoušení vzorků, způsob porušení

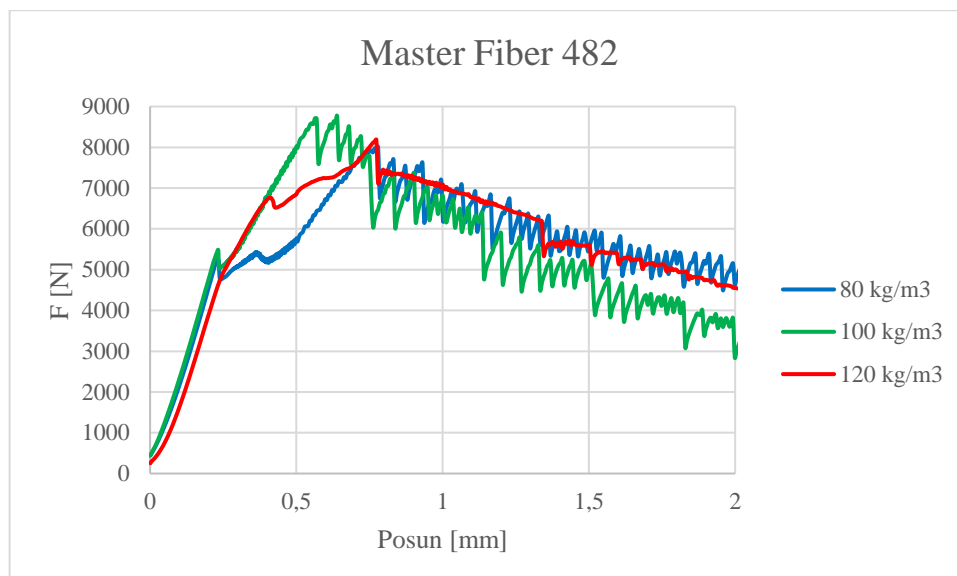
Stejně jako u předchozích typů vláken byly nejprve zkoušeny trámečky v tahu za ohybu. Průběh za každé aplikované množství znázorňuje graf, obrázek 4.13. Z každé skupiny byl vybrán typický vzorek.

Z grafu je viditelné, že po první trhlině dochází k nejefektivnějšímu využití vláken u střední hodnoty použitého množství, tzn. 100 kg/m³. Vlákná byla po porušení betonového průřezu schopná přenášet ještě výrazně větší zatížení. Zároveň zde došlo k prakticky okamžité aktivaci vláken, kdy zatížení po první trhlině betonu výrazně nekleslo a začalo opět razantně narůstat.

Po odzkoušení vzorků bylo viditelné, že vlákná byla postupně při narůstajícím zatížení vytahována z betonu, lze vidět jako jednotlivé poklesy na křivce v řadě za sebou, znázorňuje graf, obrázek 4.13.



Obrázek 4.12: Úlomky trámečků po zkoušce v tahu za ohybu MF 482



Obrázek 4.13: Graf závislosti síly na posunu MF 482

Průměrné tahové pevnosti trámečků postupně s navyšujícím se množstvím klesaly. Zároveň je však nutné zde zohlednit fakt, že u množství 100 kg/m³ byla tahová pevnost jednoho trámečku ze sady velmi výrazně nižší než u zbylých dvou vzorků. Tento vzorek dosahoval tahové pevnosti pouze 11,82 MPa, což značně snížilo průměrnou tahovou pevnost sady. Při následném vyhodnocení optimálního množství vláken byla tato skutečnost zohledněna a vzorek byl z výpočtu průměrné pevnosti vyřazen. Pro přesnější stanovení průměrné, případně i charakteristické pevnosti by byl samozřejmě optimální

výrazně větší počet vzorků, to však z řasových důvodů nebylo možné. Výsledky lze považovat za indikativní, což je pro účel této práce dostačující.

Po zkoušení trámeček v tahu za ohybu byly dále vystaveny jejich úlomky tlakovému namáhání. Průměrné tlakové pevnosti prvních dvou sad na úlomcích trámeček se výrazně nelišily, avšak u nejvyšší koncentrace vláken došlo k poklesu. Souhrnné výsledky znázorňuje tabulka 4.7. Podrobné výsledky zkoušek jsou uvedeny v příloze A.

Množství	Rozlité kužele [cm]	Trámečky σ_{cf} [MPa]	Trámečky σ_c [MPa]	Krychle σ_c [MPa]
80 kg/m ³	30	20,59	129,23	132,56
100 kg/m ³	30	21,30	133,60	142,63
120 kg/m ³	30	14,68	125,17	134,76

Tabulka 4.7: Souhrnné výsledky MasterFiber 482

4.6.4 Vyhodnocení a návrh optimálního množství vláken

Na základě výše uvedených výsledků a vlastností bylo jako optimální množství pro použití v kombinaci s uhlíkovou textilií vybráno 100 kg/m³. Tato směs vykazovala celkově nejlepší mechanické vlastnosti.

4.7 Porovnání daných druhů vláken

Pro celkové porovnání je zde využito výsledků předchozí optimalizace množství vláken ve směsi. Pro zhodnocení je zde vždy reprezentován typický vzorek ze sady, která obsahovala množství vláken vyhodnocené jako nejefektivněji využitelné společně se zachováním snadné zpracovatelnosti samozhutnitelné směsi.

V porovnání s prostým betonem bez hrubého kameniva a vlivu zámkového (hmoždinkového) efektu lze vidět výrazné účinky optimalizovaných množství vláken ve směsi. Obecně je zde viditelný efekt vláken na porušeném betonovém průřezu, kdy nedochází při vzniku první trhliny k náhlému kolapsu, ale vlákna jsou dále schopná přenášet tahová namáhání, podrobně znázorňuje graf, obrázek 4.14.

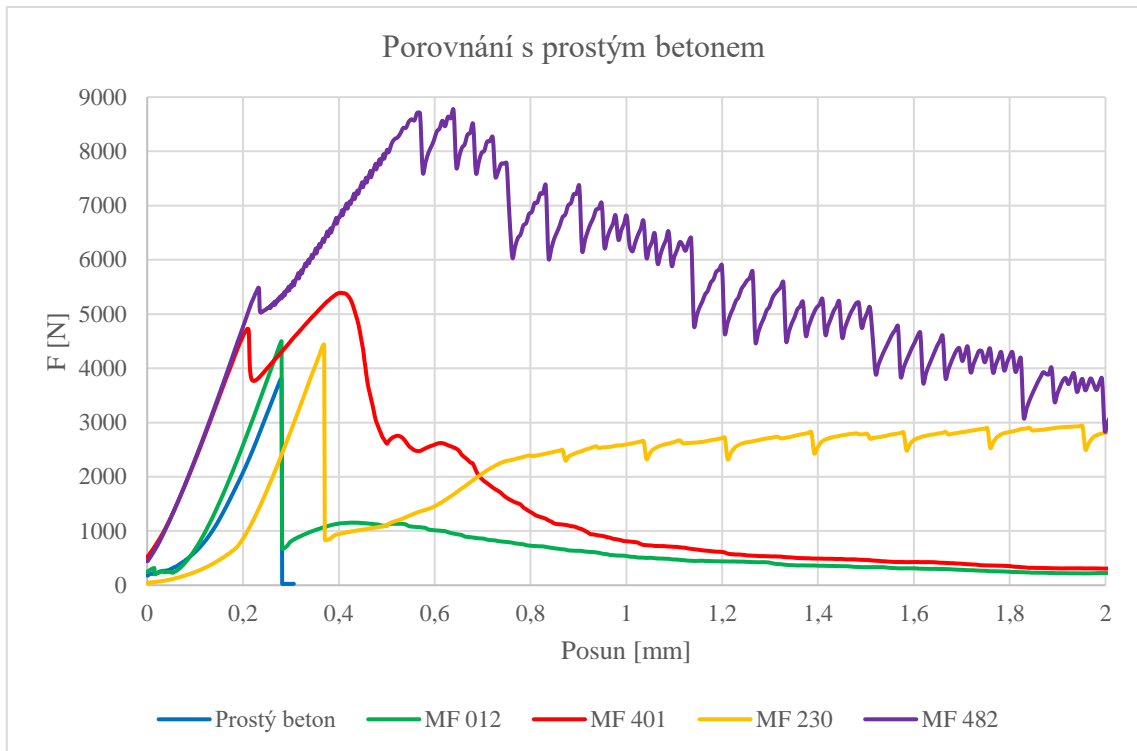
U všech použitých materiálových variant v přiměřených množstvích vláken je možné pozorovat mírně zvýšených hodnot zatížení při vzniku první trhliny, než u prostého

betonu. Nejvyšších hodnot v tomto místě porušení betonového průřezu však dosahují jednoznačně vlákna ocelová.

Po vzniku první trhliny se teprve ukazují zásadní rozdíly chování jednotlivých typů vláken. U MF 012 (jemné, polypropylenové vlákno) dochází k rapidnímu poklesu zatížení do hodnot blížících se nule, kdy následně dochází k opětovnému, ale spíše krátkodobému nárůstu zatížení. Oproti ostatním vláknům, toto PP vlákno přenášelo po porušení betonového průřezu již nejmenší zatížení a začalo postupně jako první ztrácet na únosnosti. Zde popsané chování vychází především z jemného, a ne příliš pevného materiálu oproti dalším zkoušeným vláknům. Na druhou stranu však bylo MF 012 rovnoměrně rozprostřeno ve směsi a udržovalo po odzkoušení vzorky kompletně celistvé. Z části podobné chování můžeme pozorovat u MF 230 (strukturální, PP vlákno, výrazně delší než ostatní). U tohoto vlákna došlo ke vzniku první trhliny nejpozději ze všech variant vláken, a to na srovnatelných hodnotách zatížení, jako u výše popsaného MF 012. Následně také dochází k razantnímu poklesu do doby, než se vlákna aktivují a trhlinu přemostí. Zde může mít na pomalejší opětovný nárůst zatížení vliv i délka vláken a jejich rozptýlení ve směsi s ohledem na rozměr vzorku. Efekt vláken zde nastává opravdu nejpomaleji ze všech variant, ale je o něco výraznější, než u jemných vláken MF 012.

Zásadním rozdílem u dalších zkoušených vláken oproti MF 012 a MF 230 popsaných výše je především výrazně nižší pokles zatížení po první trhlíně a téměř okamžitý nástup efektu vláken u zbylých dvou materiálových variant. MF 401, jakožto velmi pevné PVA vlákno, vykazuje schopnost rychlého přemostění trhliny v průřezu, kdy znovu narůstající hodnota zatížení znatelně přesahuje hodnoty zatížení při prvotním porušení průřezu, což je dalším výrazným rozdílem oproti MF 012 a MF 230. Rychlá aktivace vláken a schopnost přenesení vyššího zatížení, než při vzniku první trhliny, je dále výrazně umocněna při použití ocelových mikrovláken. Lze tedy jednoduše říci, že tyto popsané vlastnosti vychází úměrně z pevnosti materiálu vláken. Vše popsané zobrazuje graf, obrázek 4.14.

Z předchozích informací lze tedy konstatovat, že nejvyšší tahová namáhání z použitých variant vláken jsou schopna přenášet ocelová mikrovlákna (MF 482). Co se týče výsledků tlakových pevností, jsou ocelová mikrovlákna jediná, která dokážou zvýšit tlakovou pevnost betonu. U ostatních zde použitých materiálových variant vláken tlaková pevnost betonu v zásadě lineárně klesala s narůstajícím množstvím vláken ve směsi. Tento negativní efekt se nejvýrazněji projevil u PVA vláken (MF 401). Kompletní výsledky jsou uvedeny v příloze A.



Obrázek 4.14: Graf závislosti síly na posunu prostého betonu a vybraných množství vláken

5 Kombinace vláknenné výztuže s uhlíkovou textilní výztuží

5.1 Příprava a zkoušení vzorků

Pro tuto část experimentu byly betonovány vzorky o rozměrech 40 x 150 x 360 mm (dále destičky) v každé sadě po třech kusech. Postup pro přípravu vzorků byl totožný jako v první fázi experimentu. Destičky byly následně zkoušeny čtyřbodovým ohybem, uhlíková síť byla umístěna při obou površích, tedy ve dvou vrstvách. Dostupná uhlíková textilie, blíže popsána v kapitole 3.3, byla do vzorků použita vždy ve 2 variantách závisle na orientaci sítě. V první variantě bylo využito menší množství výztuže v příčném směru, kde je simulováno malé množství výztuže a předpokládá se porušení ohybem – přetržením výztuže. V druhé variantě je využito větší průřezové plochy výztuže v podélném směru a je tím simulován silně vyztužený průřez, kde se předpokládá porušení kombinované, ohybem a smykem. Pro obě varianty bude sledován vliv zvoleného množství rozptýlené vláknenné výztuže na porušení.

Spodní vrstva výztuže byla zajištěna distančníky proti změně polohy ve vzorku. Distančníky byly zhotoveny jednoduše z kostek polystyrenu, protože zde není prioritní pohledovost vzorku jako celku.

Krycí vrstva u spodního povrchu byla vždy provedena z prostého betonu jednak kvůli pohledovosti a zároveň kvůli kombinaci s vláknennou výztuží, která by v krycí vrstvě při vyšších koncentracích mohla působit problémy ve smyslu nedostatečného probetonování vzorku či nedodržení tloušťky krycí vrstvy z důvodu malé vzdálenosti mezi jednotlivými svazky výztuže. Jednoduše řečeno, vlákna by se skrz malá oka výztuže neměla šanci dostat.



Obrázek 5.1: Betonáž destiček

5.1.1 Zkouška čtyřbodovým ohybem

Zkouška čtyřbodovým ohybem byla prováděna na vzorcích o rozměrech 40x150x360 mm (dále destičky) dle normy ČSN EN 12390-5 [34]. U této zkoušky je oproti tříbodovému ohybu výhodou odlišný průběh vnitřních sil. V rámci středního pole mezi podporami probíhá konstantní ohybový moment. Posouvající síly jsou v tomto poli nulové, tzn. že prvek je vystaven v tomto místě čistě ohybovému namáhání bez smyku.

Pevnost v tahu za ohybu při zkoušce čtyřbodovým ohybem je dána vztahem (5.1).

$$f_{cf} = \frac{F_{max} \times l}{b \times h^2} \quad [MPa] \quad (5.1)$$

Kde F_{max} je maximální síla při porušení vzorku [N]

l je vzdálenost mezi podporami [mm]

b šířka průřezu [mm]

h výška průřezu [mm]

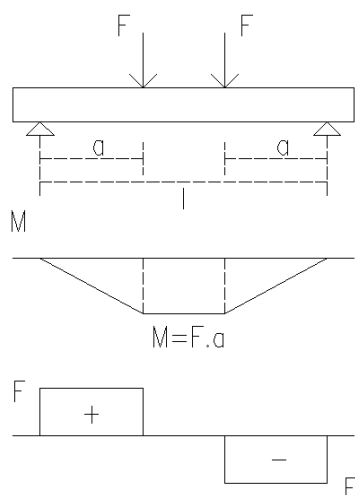


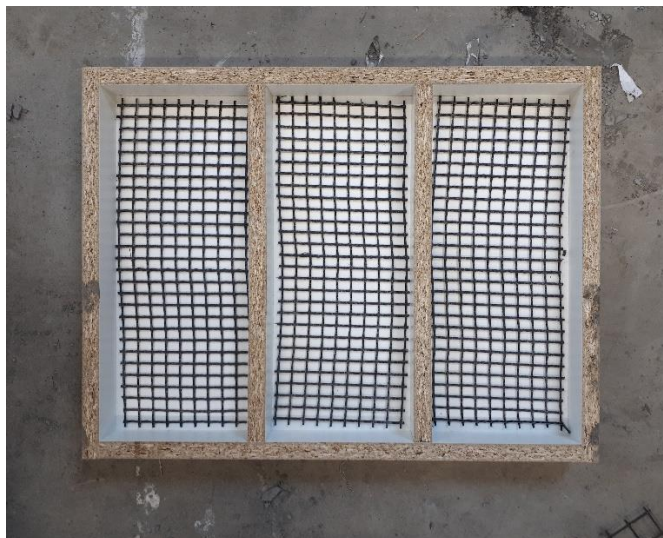
Schéma zkoušky (levý obrázek), provedení zkoušky (pravý obrázek)

Obrázek 5.2: Zkouška čtyřbodovým ohybem

5.1.2 Příprava uhlíkové textilie

Uhlíková textilie byla nařezána na násobky rozměrů použitých vzorků. Síť byla napnuta na rám za účelem možnosti nasycení textilie epoxidovou pryskyřicí. Nasycení bylo prováděno potíráním válečkem s rozmíchaným plnidlem a tvrdidlem. Pronikání pryskyřice do rovingu je postupné, je tedy třeba textiliu potírat opakovaně v řádu jednotek minut, dokud nedojde k úplnému prosycení. Po takovémto postupu lze pohledem zaznamenat zesklivatění povrchu sítě.

Následně byla uhlíková textilie posypána křemičitým pískem frakce 0,1-0,6 mm pro zlepšení soudržnosti – spolupůsobení výztuže s betonovou matricí. Pískový posyp byl proveden okamžitě po prosycení pryskyřicí pro lepší uchycení zrn na síti. Dále byla síť takto ponechána cca 24 hodin do ztvrdnutí pryskyřice a poté byla vyříznuta z podpůrného rámu. Na rovném povrchu byla síť následně uložena do úplného vytvrdnutí, dle technického listu minimálně celkově 72 hodin, a poté nařezána na potřebné rozměry ve dvou orientacích. Takto připravená impregnovaná textilní výztuž byla následně aplikována do forem pro betonáž vzorků.



Obrázek 5.3: Uhlíková výztuž připravená pro aplikaci do vzorků

5.2 Zkoušení a vyhodnocení těles se slabým vyztužením technickou textilí

Vzorky destiček o rozměrech 40 x 150 x 360 mm s nižší průřezovou plochou uhlíkové výztuže zkombinované s optimalizovaným množstvím vláknenné výztuže ve čtyřech variantách byly podrobeny zkoušce čtyřbodovým ohybem. Průřezová plocha uhlíkové výztuže zde činila tedy pouhých 5 mm²/m.

5.2.1 Zkouška referenčních destiček čtyřbodovým ohybem s nižší průřezovou plochou výztuže

Zkoušení destiček bez výztužných vláken jako reference z prostého betonu s uhlíkovou textilní výztuží o rozměrech 40 x 150 x 360 mm čtyřbodovým ohybem bylo prováděno dle normy ČSN EN 12390-5 [34] ve stáří 28 dní. Za každou skupinu byla zkoušena sada destiček o třech vzorcích. Zatěžovací zkoušky byly provedeny v laboratoři UCEEB.

Zkoušení destiček s nižší průřezovou plochou uhlíkové výztuže bez vláknenné výztuže bylo provedeno jako reference pro následné porovnání se vzorky s přidanou rozptýlenou vláknennou výztuží a stejným množstvím uhlíkové výztuže. Průřezová plocha uhlíkové výztuže zde činila pouhých 5 mm²/m. Průměrná pevnost vzorků v tahu dosahovala 14,66 MPa, podrobné výsledky popisuje tabulka 5.1. Při zkoušení těchto referenčních těles se neprojeví žádné výrazné odchylky či anomálie.

Z grafu (obrázek 5.4) můžeme vidět postupný nárůst zatížení, kdy po vzniku první trhliny došlo k aktivaci uhlíkové textilní výztuže a následnému rozvoji trhlin. Po určité době dochází ke kolapsu vzorku a jeho okamžité ztrátě únosnosti z důvodu přetržení uhlíkové výztuže při překročení její tahové pevnosti. Toto chování je pro impregnovanou uhlíkovou textilii typické, křehkost je způsobena absencí plastické deformace uhlíkových vláken, kdy při dosažení tahové pevnosti prvek ztrácí únosnost okamžitě a nedochází již k postupné deformaci.

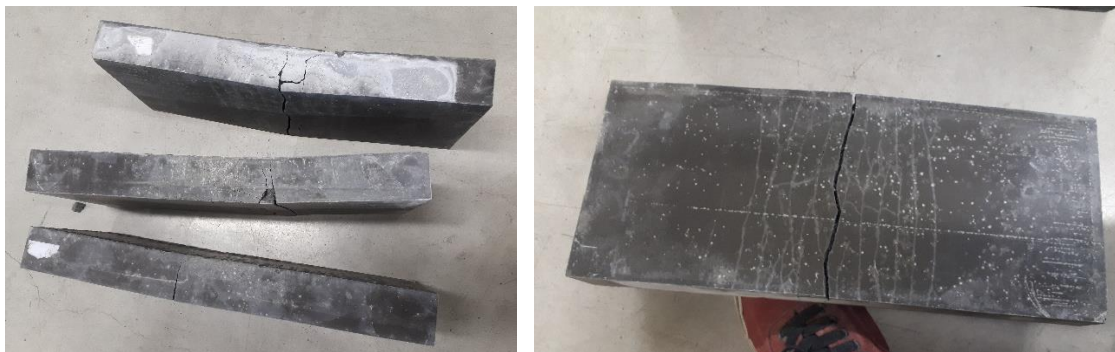


Obrázek 5.4: Graf závislosti síly na posunu pro slabě vyztužené referenční vzorky

Název vzorku	b [mm]	h [mm]	l [mm]	m [kg]	V [m ³]	ρ [kg/m ³]	F _{max} [kN]	f _{cf} [MPa]	ϕf _{cf} [MPa]
11.1	149,28	40,13	360,00	4,977	0,002157	2308	11,95	14,91	
11.2	150,28	40,76	360,00	5,016	0,002205	2275	11,86	14,25	14,66
11.3	149,49	40,0	360,00	4,845	0,002153	2251	11,81	14,81	

Tabulka 5.1: Podrobné výsledky slabě vyztužených referenčních vzorků

Na odzkoušených vzorcích můžeme vidět způsob porušení. Viditelná trhlina při kolapsu vznikla vždy ve středním poli mezi zatěžovacími podporami, tzn. že prvky byly porušeny vždy čistě ohybem, přetržením výztuže. Prvotní rozevření trhliny ukazuje na grafu první výrazný pokles zatížení, což značí její výraznější otevření. V blízkosti první a jediné otevřené trhliny bylo na všech vzorcích před kolapsem možné pozorovat navazující mikrotrhliny, které se po kolapsu v podstatě zavřely, lze vidět na obrázku 5.5.



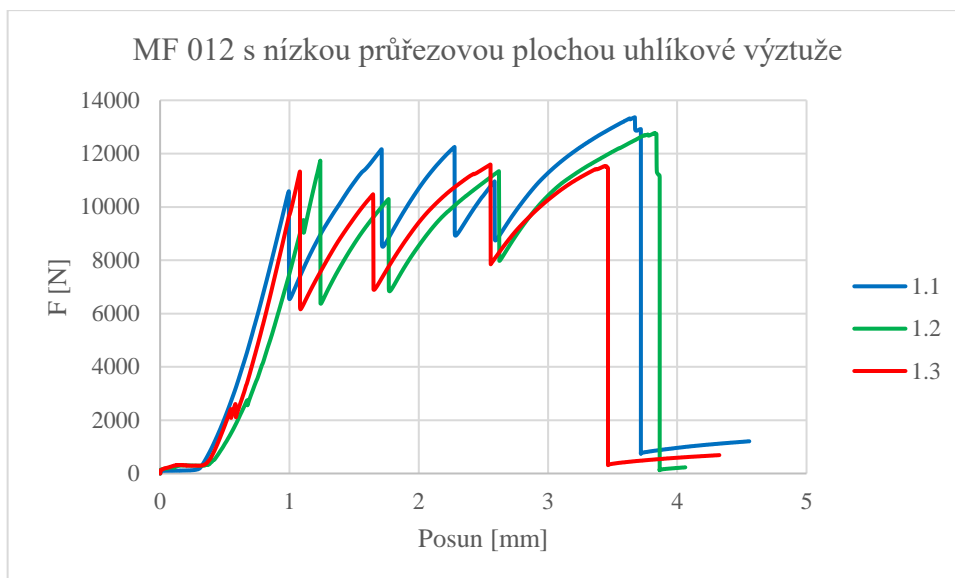
Obrázek 5.5: Porušení slabě vyztužených referenčních vzorků

5.2.2 MasterFiber 012

Jako první byla zkoušena sada vzorků s jemnými, polypropylenovými vlákny. Průměrná tahová pevnost těchto vzorků byla cca 15,42 MPa, kdy rozptyl všech tří hodnot byl velmi malý. Souhrnné výsledky popisuje příloha B. Všechny tři vzorky vykazovaly velmi podobný průběh křivek závislosti síly na posunu.

Oproti referenčnímu vzorku bez přidané vlákenné výztuže došlo u těchto vláken k první trhlině o něco dříve a při nižším zatížení, jak je prezentováno níže na grafu, obrázek 5.6. Výrazné zlepšení však přichází právě po první trhlině, kdy zřejmě dochází k zapojení uhlíkové výztuže společně s vlákny a vzorek je tak schopen přenášet vyšší zatížení než při prvotním porušení. Po přetržení textilní výztuže lze na grafu (obrázek 5.6) vidět zbytkovou únosnost, která je způsobena právě přidanými vlákny a je žádoucím jevem, a zároveň také ale i jistě horní vrstvou textilní výztuže, která nebyla fixována při betonáži a ve všech případech je tak v podstatě na povrchu vzorků.

Co se týče způsobu porušení, došlo zde viditelně k eliminaci trhlin a porušení ohybem. Vždy byla viditelná jediná otevřená trhlina, která byla o poznání méně rozevřená než u vzorků bez vlákenné výztuže. Celkově zde pak bylo menší množství mikrotrhlin, než u referenčních vzorků, to lze vidět na obrázku 5.7. Po odtížení vzorku došlo k mírnému zavření hlavní trhliny.



Obrázek 5.6: Graf závislosti síly na posunu MF 012 slabě vyztužených prvků



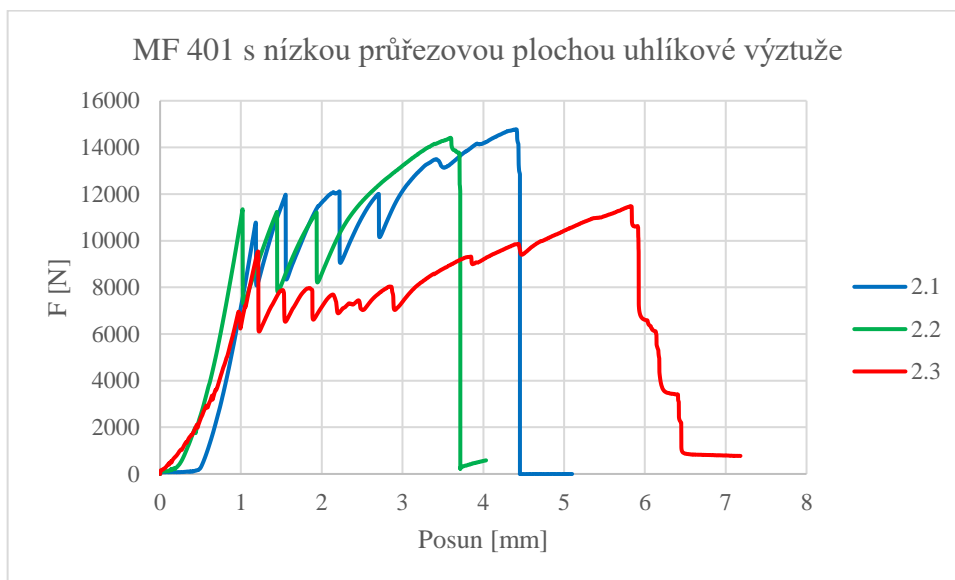
Obrázek 5.7: Způsob porušení MF 012 slabě vyztužených prvků

5.2.3 MasterFiber 401

Další v řadě byla zkoušena sada pevných PVA vláken. Průměrná tahová pevnost vzorků s těmito vlákny a uhlíkovou textilií v menší průřezové ploše dosahovala hodnoty 16,96 MPa, což je drobný nárůst oproti referenčním vzorkům. Souhrnné výsledky popisuje příloha B.

Z grafu (obrázek 5.8) lze vidět, stejně jako u předchozích vláken, snížení hodnoty síly při vzniku první trhliny. Pokles zatížení při první trhlíně je však zredukován zhruba o polovinu, kdy vlákna zde rychleji trhlínu přemostí a zatížení začíná opět rychleji narůstat, což značí menší šířku trhliny. Následný průběh grafu ukazuje, že přidaná vlákna v prvku napomáhají k přenesení většího zatížení než u prvku bez vláknenné výztuže a celkově zlepšují tahovou pevnost.

Na odzkoušených vzorcích bylo možné vidět vždy jednu rozevřenou ohybovou trhlinu v místě přetržení textilní výztuže, kdy v jejím okolí docházelo na jev tzv. multiple cracking – vznik velkého množství drobných trhlin, které jsou ale v podstatě zavřené po ukončení působení zatížení, jak lze vidět na obrázku 5.9.



Obrázek 5.8: Graf závislosti síly na posunu MF 401 slabě vyztužených prvků



sada porušených vzorků (levý obrázek), viditelné mikrotrhliny na porušeném vzorku (pravý obrázek)

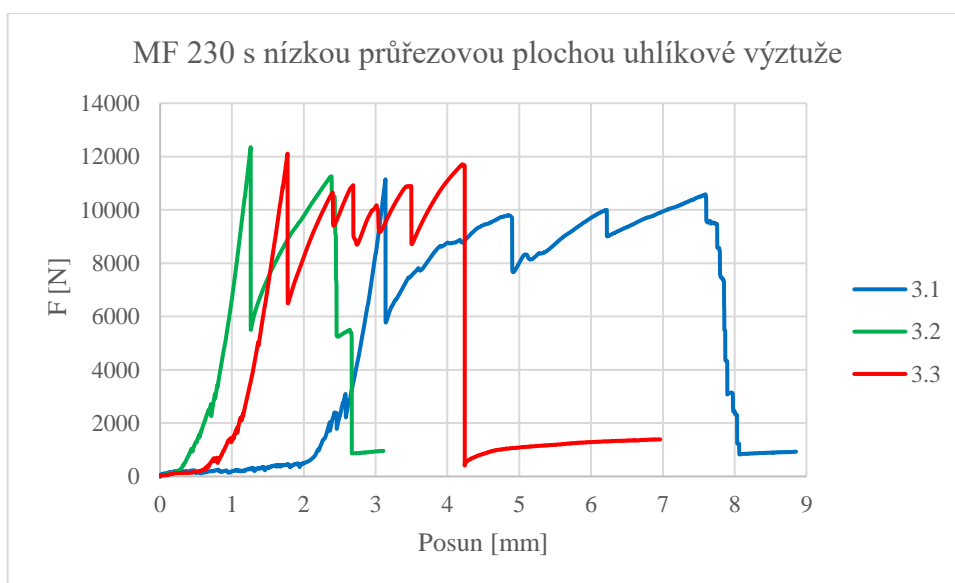
Obrázek 5.9: Způsob porušení MF 401 slabě vyztužených prvků

5.2.4 MasterFiber 230

Další z vláken byla zkoušena MF 230 – strukturální PP vlákna, která se od ostatních zkoušených vláken liší především tím, že jsou značně delší a objemnější. Průměrná tahová pevnost vzorků u těchto vláken dosahovala hodnoty 14,82 MPa, což je velmi podobné jako u referenčních vzorků bez vláken. Souhrnné výsledky ukazuje příloha B.

U vzorků s vláknennou výztuží MF 230 došlo obecně k iniciaci první trhliny nejpozději ze všech zkoušených variant, a oproti ostatním typům vláken zde nedošlo k jejím vzniku na snížených hodnotách zatížení vůči hodnotám referenčních vzorků, hodnoty byly v tomto bodě srovnatelné. Efekt přemostění zde však není příliš znatelný – následný propad zatížení a chování odpovídá v podstatě referenčnímu vzorku bez vláken, následný nárůst zatížení je pomalejší než u ostatních typů vláken a nedosahuje ani hodnot jako při iniciaci první trhliny. I přesto však dochází díky přidané vláknenné výztuži k přenesení většího zatížení po porušení betonového průřezu, než u referenčního vzorku. Podobně jako u předešlých materiálových variant vláken, zde dochází k přetržení uhlíkové výztuže možná dříve, než u referenčního vzorku, ne však ustáleně. To je dané zejména množstvím vzniklých trhlin (například vzorek 3.2 na grafu jedna trhlina, její otevření a následně rychlý kolaps), tedy rychlostí aktivace výztuže a polohou výztuže v průřezu. Po přetržení výztuže se zde evidentně projevuje vliv dlouhých vláken a jejich orientace, kdy jsou ještě následně schopna zachytit a přenést zatížení, ačkoliv na velmi nízkých hodnotách. Vše popsané lze vidět na grafu, obrázek 5.10.

Způsob porušení se zde značně lišil vůči již dříve popsaným typům vláken. Zřejmě kvůli délce vláken, která zde nezajistila přemostění a kontrolu trhlin. Ohybové trhliny zde vznikly vždy pouze jedna či dvě, ale výrazněji otevřené. Konkrétně u vzorku 3.3, na obrázku 5.11, došlo ke vzniku dvou trhlin, které se na boční straně začínaly propojovat skrze pracovní spáru u uhlíkové výztuže a toku napětí ve výztuži. Větší rozevření trhlin mělo za následek právě i to, že v místě pracovní spáry začalo docházet k delaminaci. Vůbec se zde neprojevil efekt vláken ve smyslu kontroly trhlin a distribuce napětí.



Obrázek 5.10: Graf závislosti síly na posunu MF 230 slabě vyztužených prvků



pohled na porušený vzorek při maximálním zatížení (levý obrázek), absence mikrotrhlin po porušení (pravý obrázek)

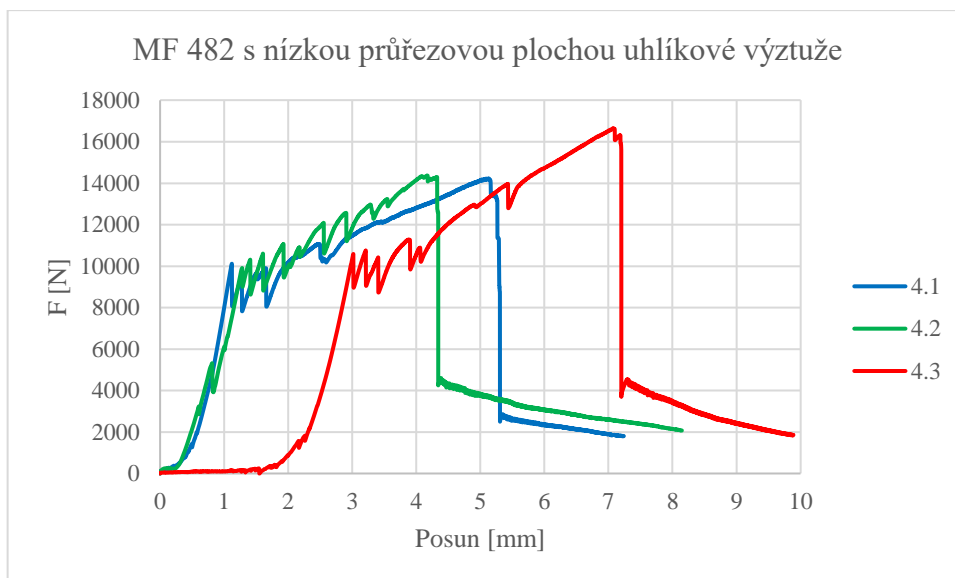
Obrázek 5.11: Způsob porušení MF 230 slabě vyztužených prvků

5.2.5 MasterFiber 482

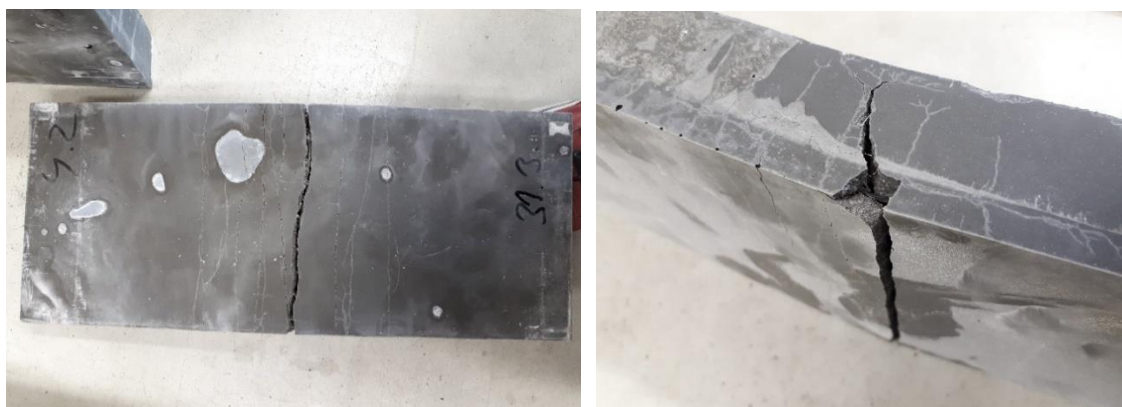
Jako poslední v řadě byla zkoušena ocelová mikrovláknna. Průměrná tahová pevnost vzorků dosahovala hodnoty 19,98 MPa, což je nejvyšší hodnota ze všech zkoušených variant s nízkou průřezovou plochou uhlíkové výztuže a znatelný nárůst oproti referenčním vzorkům. Souhrnné výsledky popisuje příloha B.

Na grafu, obrázek 5.12, můžeme vidět vliv a vlastnosti ocelových vláken již popisované v předchozích kapitolách. Ke vzniku první trhliny sice dochází při nižším zatížení vlivem oslabení plochy neporušeného betonu vlákny, ale následně vliv vláken v tomto případně výrazně zredukuje propad zatížení a dochází k rychlému přemostění vzniklé trhliny. Postupně probíhá další rozvoj trhlin za dobrého spolupůsobení uhlíkové výztuže a ocelových vláken, kdy trhliny jsou vždy rychle přemostěny a poklesy zatížení jsou viditelně nižší než u ostatních vzorků. K přetržení samotné uhlíkové výztuže dochází později, než u referenčního prvku díky iniciaci velkého množství trhlin, přičemž vlákna poté ještě prokazují určitou zbytkovou únosnost.

Vizuální pohled na porušený vzorek byl podobný jako u MF 401, kdy okolo otevřené trhliny s přetrženou výztuží jednoznačně docházelo na multiple cracking a to zhruba ve stejné ploše, jako u referenčního vzorku, v mírně větším rozsahu. Drobné trhliny bylo možné pozorovat také podél kritického místa pracovní spáry, které vznikly při větších hodnotách zatížení blížících se kolapsu – přetržení výztuže, zobrazuje obrázek 5.13.



Obrázek 5.12: Graf závislosti síly na posunu MF 482 slabě vyztužených prvků



porušený prvek s viditelnými mikrotrhlinami (levý obrázek), rozvoj trhlin v blízkosti pracovní spáry (pravý obrázek)

Obrázek 5.13: Způsob porušení MF 482 slabě vyztužených prvků

5.3 Zkoušení a vyhodnocení těles se silným vyztužením technickou textilií

Vzorky destiček o rozměrech 40 x 150 x 360 mm s vyšší průřezovou plochou uhlíkové výztuže zkombinované s optimalizovaným množstvím vláknenné výztuže ve čtyřech variantách byly podrobeny zkoušce čtyřbodovým ohybem. Průřezová plocha uhlíkové výztuže zde činila $142 \text{ mm}^2/\text{m}$, výrazně větší s předpokladem porušení vzorku usmyknutím, nikoliv přetržení ohybem jako v případě slabšího vyztužení.

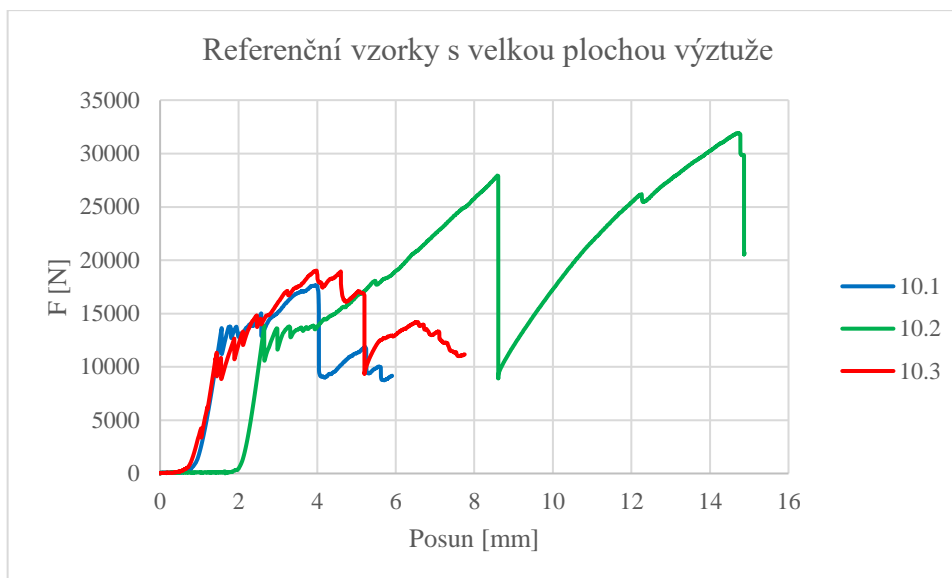
5.3.1 Zkouška referenčních destiček čtyřbodovým ohybem s vyšší průřezovou plochou výztuže

Zkoušení destiček bez výztužných vláken jako reference z prostého betonu s uhlíkovou textilní výztuží o rozměrech 40 x 150x 360 mm čtyřbodovým ohybem bylo prováděno dle normy ČSN EN 12390-5 [34] ve stáří 28 dní. Za každou skupinu byla zkoušena sada destiček o třech vzorcích. Zatěžovací zkoušky byly provedeny v laboratoři UCEEB.

Zkoušení destiček s vyšší průřezovou plochou uhlíkové výztuže bez vláknenné výztuže bylo provedeno jako reference pro následné porovnání se vzorky s přidanou rozptýlenou vláknennou výztuží a stejným množstvím uhlíkové výztuže. Průřezová plocha uhlíkové výztuže zde činila 142 mm²/m. Průměrná pevnost v tahu dosahovala 28,43 MPa, podrobné výsledky popisuje tabulka 5.2.

Na grafu, obrázek 5.14, můžeme vidět postupný nárůst zatížení jako u vzorků s menší plochou výztuže, avšak je zde znatelný přírůstek zatížení po vzniku první trhliny, kdy došlo k rychlé aktivaci výztuže. Uhlíková textilie v tomto množství byla schopná po porušení betonového průřezu přenášet výrazně větší zatížení, než při vzniku první trhliny, na rozdíl od vzorků slabě vyztužených. Výraznou odchylkou v sadě je zde druhý vzorek (10.2), znázorňuje graf (obrázek 5.14). U tohoto vzorku došlo k velkému nárůstu zatížení ve chvíli, kdy zbylé dva vzorky už naopak ztrácely únosnost. Tento rozptyl a nestabilitu výsledků jednotlivých vzorků zřejmě způsobil odlišný způsob porušení. Porušení této sady vzorků lze vidět na obrázku 5.15.

Vzorky se vzájemně podobnými křivkami v grafu (10.1, 10.3) byly porušeny smykem, šikmou trhlinou v přímé linii s logickým odtržením výztuže v oblasti této trhliny, kdy již vzorek nebyl schopen dál přenášet větší zatížení a docházelo k postupnému odštěpování betonu na plochách ve smykové trhlině, k oddělování plochy výztuže. U odlišného vzorku 10.2 je vidět tvar porušení spíše obloukového tvaru (stále se však jedná o smykovou trhlinu), kdy zřejmě při dalším zatížení došlo k zaklesnutí oddělených částí vzorku do sebe a vzorek byl tak dál schopen přenášet narůstající zatížení. Únosnost těchto prvků tedy závisela i svým způsobem na náhodě – celý průběh se odvíjel od tvaru trhliny.



Obrázek 5.14: Graf závislosti síly na posunu pro silně vyztužené referenční prvky

Název vzorku	b [mm]	h [mm]	l [mm]	m [kg]	V [m ³]	ρ [kg/m ³]	F_{\max} [kN]	f_{cf} [MPa]	ϕf_{cf} [MPa]
10.1	149,84	41,96	360,00	5,198	0,002263	2297	17,64	20,06	
10.2	149,52	40,52	360,00	5,152	0,002181	2362	31,92	39,01	28,43
10.3	150,32	38,05	360,00	4,909	0,002059	2384	19,03	26,23	

Tabulka 5.2: Podrobné výsledky silně vyztužených referenčních vzorků

Jak již bylo popsáno výše, všechny tři prvky byly porušeny smykem u podpory, což značí jejich silné ohybové vyztužení, které bylo záměrem. Účelem je oproti slabě vyztuženým vzorkům pozorovat právě vliv vláken na náhlé smykové porušení vzorku. Rozhodující zde tedy byla únosnost betonového průřezu ve smyku. Zároveň zde občas docházelo k zajímavému odštěpování betonu v tlačené oblasti vlivem velkého otevření trhliny. Také můžeme vidět, že dalším kritickým místem při již opravdu velkých deformacích zkušební destičky je pracovní spára v ploše uložení výztuže. U výše popsaného atypického prvku 10.2 došlo v tomto místě k úplné delaminaci při hodnotách zatížení blízkých kolapsu, na obrázku 5.15. Je však otázkou, jak moc je delaminace ovlivněna pracovní spárou v kombinaci s průběhem napětí ve výztuži a v betonu na rozhraní vrstev.



sada vzorků porušených smykem (levý obrázek), delaminace na porušeném vzorku (pravý obrázek)

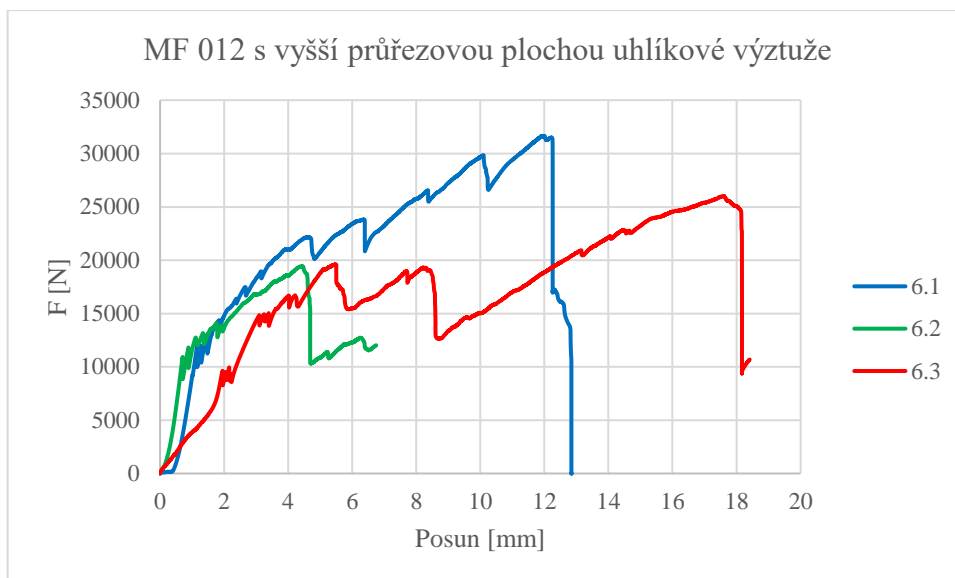
Obrázek 5.15: Porušení silně vyztužených referenčních vzorků

5.3.2 MasterFiber 012

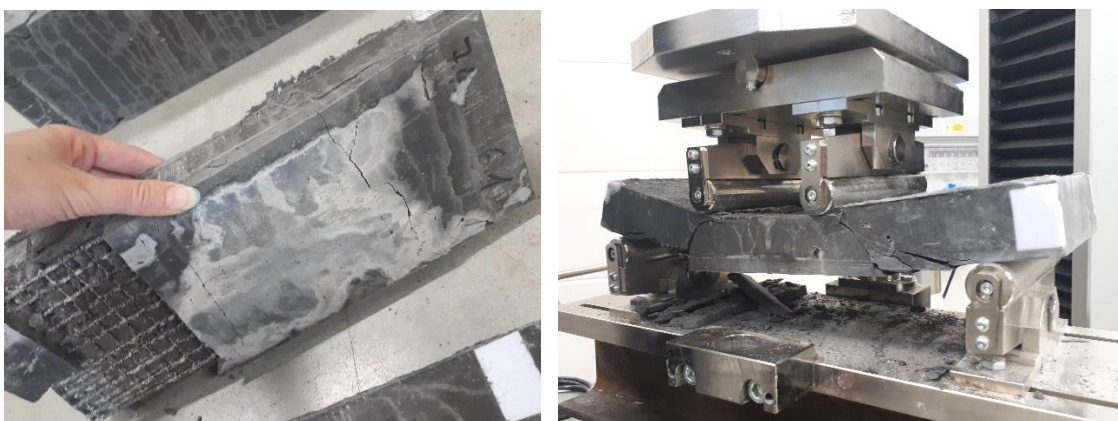
Jako první v řadě byla opět zkoušena varianta kombinace textilní uhlíkové výztuže společně s jemnými PP vlákny MF 012. Průměrná tahová pevnost vzorků dosahovala hodnoty 29,24 MPa, což je srovnatelné s pevností vzorků bez vláknenné výztuže s pouze uhlíkovou textilií. Souhrnné výsledky jsou uvedeny v příloze B.

Z grafu typických vzorků lze vidět, že v počáteční fázi je průběh vzorku s těmito vlákny velmi podobný referenčnímu vzorku. Hodnoty zatížení jsou o něco málo vyšší, avšak hlavní rozdíl nastává ve chvíli, kdy referenční vzorek začíná kolabovat. Vláknena zřejmě napomáhají kontrole trhlin a prvek je schopen stabilně přenášet postupně větší zatížení. Následně nastává v podstatě okamžitá ztráta únosnosti, přičemž zde nedochází k přetržení výztuže, jako u slabě vyztužených prvků, ale ke ztrátě kotvení výztuže a jejího spolupůsobení s betonem, případně k odpadávání krycí vrstvy výztuže vlivem působícího zatížení od iniciované smykové trhliny. Porušení bylo tedy u celé sady velmi obdobné – prvek se pod vlivem převyztužení porušil smykem, a vlivem této trhliny velkého přenášeného zatížení (deformaci) docházelo ke vzniku trhlin v místě pracovní spáry podél uhlíkové výztuže, lze vidět na grafu – obrázek 5.16. Při propojení smykové trhliny s porušením ve spáře došlo na velké ploše k delaminaci a úplnému uvolnění výztuže, což znamenalo kolaps, zobrazuje obrázek 5.17.

U druhého vzorku (6.2) je průběh výrazněji odlišný a dříve ztrácí únosnost. Tento průběh může být následkem nerovnoměrného rozložení vláken na průřezu nebo může mít na nestabilitu ve výsledcích vliv i jemnost a malá délka vláken.



Obrázek 5.16: Graf závislosti síly na posunu MF 012 silně vyztužených prvků



rozsáhlá delaminace na vzorku (levý obrázek), vzorek při maximální hodnotě zatížení (pravý obrázek)

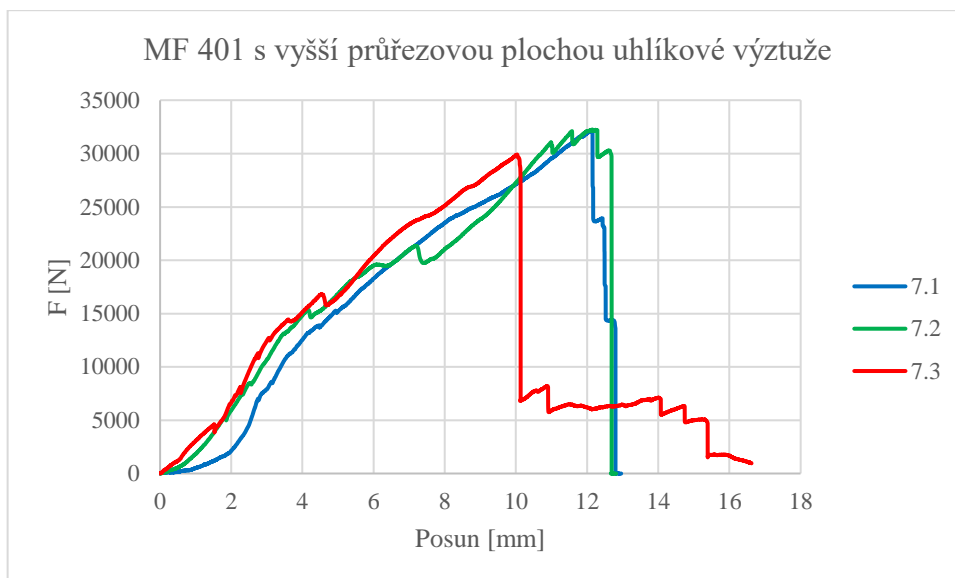
Obrázek 5.17: Způsob porušení MF 012 silně vyztužených prvků

5.3.3 MasterFiber 401

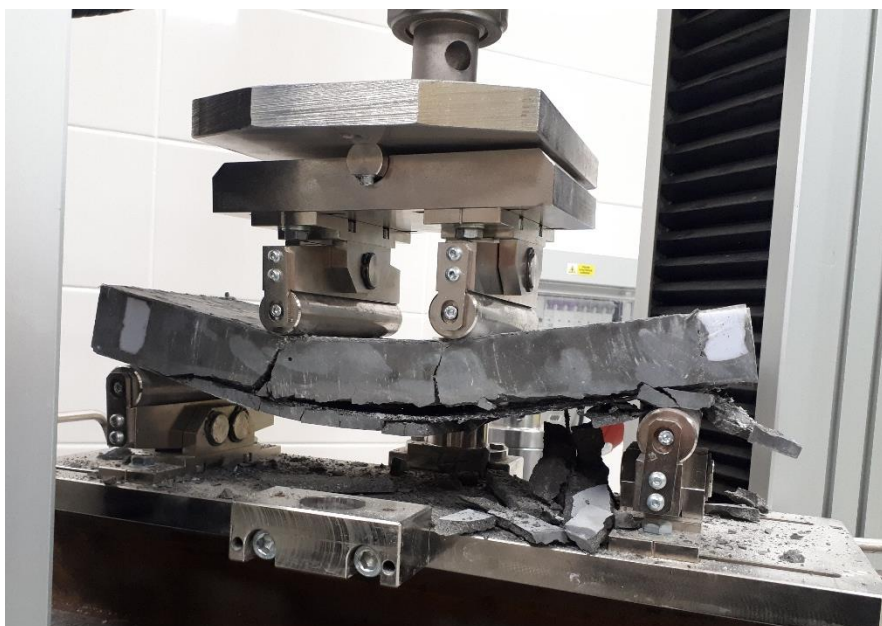
Při zkoušení pevných PVA vláken MF 401 bylo dosaženo průměrné pevnosti vzorků v tahu 38,42 MPa, což je oproti referenčním vzorkům značný nárůst.

Křivka vláken MF 401 má pozvolnější nárůst oproti předešlým MF 012 a průběh je téměř lineární. Tento průběh lze přisoudit schopnosti MF 401 rychlé aktivace a přemostění, kdy ve spolupůsobení s uhlíkovou textilní výztuží se efekt umocní a vznikne téměř hladký průběh křivky až do maximálního přeneseného zatížení. Následně došlo k téměř okamžité ztrátě únosnosti, která byla opět způsobena velmi rozsáhlou delaminací a následným uvolněním výztuže, lze vidět na obrázku 5.19. Zároveň měla vlákna zřejmě vliv jakožto

smyková výztuž – smykem se porušil pouze jeden vzorek ze tří, zbylé dva byly dokonce porušeny ve středním poli.



Obrázek 5.18: Graf závislosti síly na posunu MF 401 silně vyztužených prvků



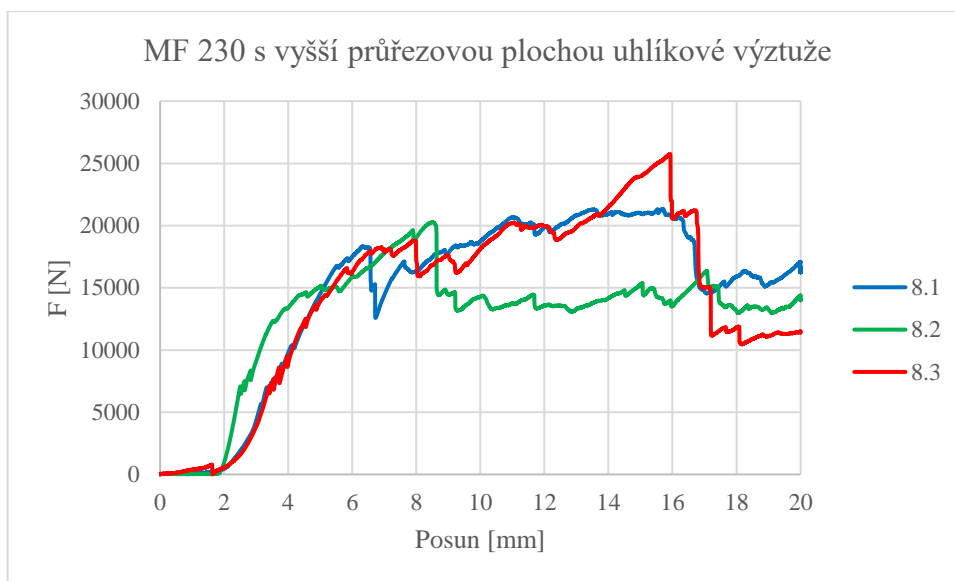
Obrázek 5.19: Porušení vzorku MF 401 při extrémní hodnotě průhybu

5.3.4 MasterFiber 230

Při zkoušení dlouhých strukturálních vláken bylo dosaženo průměrné tahové pevnosti 26,62 MPa, což značí snížení pevnosti oproti referenčním vzorkům bez vláken. Všechny tři zkoušené vzorky dosahovaly velmi obdobných hodnot. Souhrnné výsledky popisuje příloha B.

U průběhu zatěžování těchto vzorků byl nárůst zatížení mnohem pomalejší než u referenčních vzorků. V místě, kde referenční prvek již ztrácel únosnost, docházelo ještě k nárůstu zatížení. Po jediném výraznějším poklesu zatížení v důsledku trhliny se zatížení postupně ustálilo. Vzorek byl již viditelně po destrukci, ale vlivem rozprostření dlouhých vláken a jejich postupnému vytahování či přetrhávání byl vzorek dále schopen přenášet zatížení s postupným úbytkem velikosti.

K porušení všech prvků došlo vlivem smykové trhliny. Další rozvoj trhlín probíhal v kritické oblasti podél textilní výztuže a pracovní spáry, lze vidět na obrázku 5.21.



Obrázek 5.20: Graf závislosti síly na posunu MF 230 silně vyztužených prvků

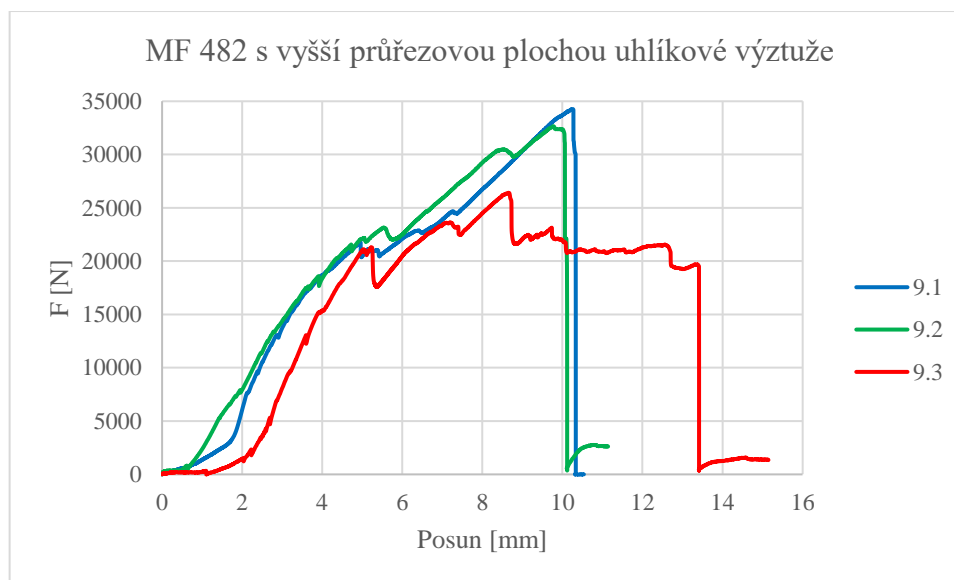


Obrázek 5.21: Smykem porušený prvek MF 230 s rozvojem trhlín v oblasti pracovní spáry

5.3.5 MasterFiber 482

Při zkoušení destiček s uhlíkovou textilní výztuží ve větší průřezové ploše výztuže zkombinované s ocelovými mikrovlákný byla průměrná tahová pevnost vzorků 38,45 MPa, což je razantní navýšení díky vlákněné výztuži a zároveň je zajímavé, že je hodnota prakticky stejná, jako u MF 401 (PVA vlákna). Souhrnné výsledky jsou podrobně popsány v příloze B.

Křivka MF 482 je, podobně jako u PVA vláken MF 401, bez větších výkyvů a poklesů zatížení, ukazuje graf – obrázek 5.22. Ocelová mikrovlákná jsou schopná přemostit trhlinu velmi rychle, kdy nedojde k většímu poklesu zatížení, jak bylo patrné z části optimalizace množství vláken. Zde je efekt zdokonalen kombinací s uhlíkovou textilní výztuží a ve chvíli, kdy referenční vzorek ztrácí únosnost, vzorek s MF 482 je následně ještě velmi dlouho únosný, do poslední chvíle celistvý a zatížení stále a stabilně u všech vzorků narůstá. Následně nastává náhlý kolaps, který byl opět způsoben delaminací v pracovní spáře a následným uvolněním výztuže, ztrátou kotvení, viz. obrázek 5.23. Vlákná zde tedy zjevně sehrála svou roli i jako smyková výztuž a přenesla zatížení spolehlivě k podpoře, kde došlo ke ztrátě spolupůsobení výztuže vlivem její malé kotevní délky za podporou.



Obrázek 5.22: Graf závislosti síly na posunu MF 482 silně vyztužených prvků



Obrázek 5.23: Ztráta kotvení porušeného prvku MF 482

5.4 Vyhodnocení a porovnání vlivu jednotlivých vláken

5.4.1 Vzorky s nižší průřezovou plochou uhlíkové výztuže

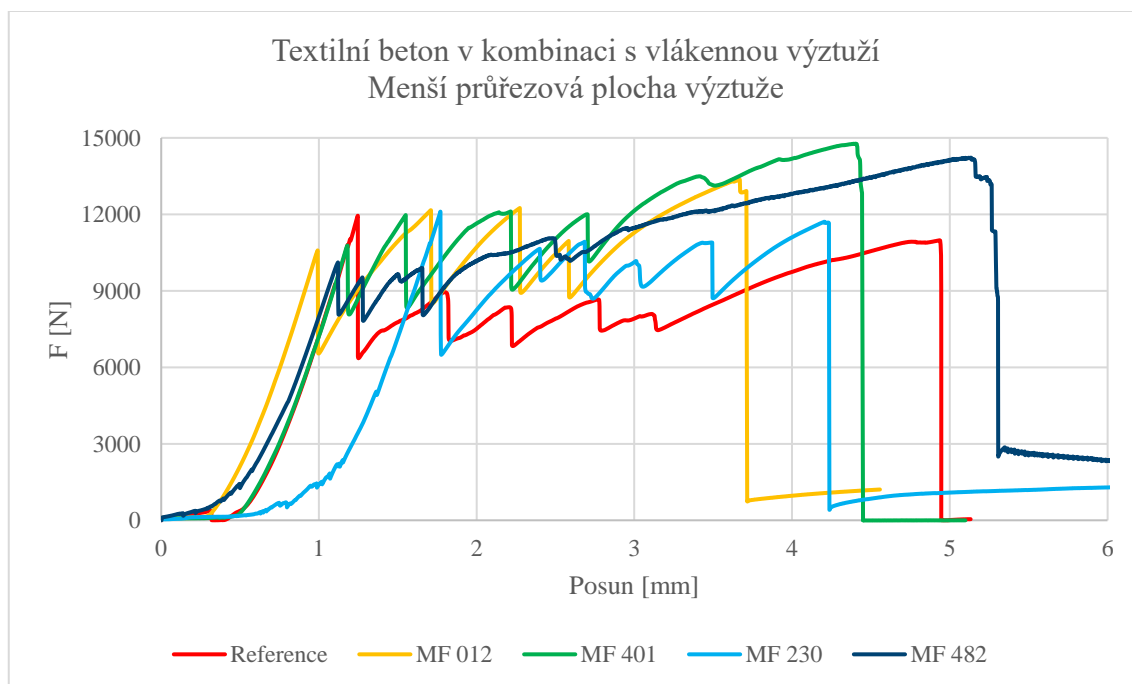
Pro celkové porovnání vzorků s nižší průřezovou plochou uhlíkové výztuže byl z každé sady vybrán pro přehlednost pouze jeden typický vzorek, souhrnný graf je znázorněn na obrázku 5.24.

Z vybraných typických průběhů zatěžování můžeme v první řadě pozorovat rozdíl již u vzniku první trhliny jednotlivých vzorků. U jediného typu vláken, a to MF 230, zůstává hodnota zatížení při vzniku první trhliny na stejných hodnotách, jako u referenčního vzorku z prostého betonu, avšak proti tomu je pokles zatížení při prvotním porušení největší, což je zřejmě způsobeno délkou vláken a jejich pomalejší aktivací. Zároveň je tento pokles takřka stejný, jako u referenčního vzorku, tzn. že zde nedošlo ke zlepšení. Při následujícím průběhu těchto vláken lze také vidět, že hodnotu zatížení dosaženou při vzniku první trhliny, oproti zbylým typům vláken, již poté nepřesáhnou. Je zde znatelný pouze nárůst přeneseného zatížení po porušení betonového průřezu, avšak celkově zde byla tato vlákna nejméně efektivní. Tento fakt vychází i ze způsobu porušení, kdy u těchto vláken došlo k největšímu rozevření ojedinelých trhlín.

U zbylých typů vláken (MF 012, MF 401, MF 482) došlo vždy ke snížení hodnoty zatížení při vzniku první trhliny, ale zároveň taktéž vždy došlo k výraznějšímu překročení této hodnoty ještě následně, a to díky spolupůsobení uhlíkové textilie a vláknenné výztuže. U referenčního vzorku byla hodnota zatížení maximální při vzniku první trhliny, lze tedy zde pozorovat kladný vliv výztužných vláken.

Co se týče vláken MF 012, je zde lehce znatelný vliv přemostění první trhliny na základě redukce poklesu zatížení při jejím vzniku. Dále dochází k rozvoji trhlin při hodnotách zatížení vyšších, než u referenčního vzorku. Dochází zde však ke kolapsu a přetržení výztuže nejdříve ze všech vzorků. Při porušení vzorku zde byla znatelná eliminace rozevření trhlin.

Zbylá vlákna MF 401 a MF 482 se v začátku průběhu chovají podobně, výrazně snižují propad zatížení po vzniku první trhliny. Efekt rychlého přemostění trhlin je zde dále ale znatelný už jen spíše u ocelových mikrovláken MF 482. Na způsobu porušení obou těchto typů vláken bylo znatelné rovnoměrnější roznesení napětí do více zavřených mikrotrhlin. Celkově všechny typy vláken dosahovaly v průběhu vyšších hodnot zatížení, než referenční vzorek z prostého betonu, avšak až na vlákna ocelová (MF 482), došlo pokaždé k dřívějšímu kolapsu. MF 482 zároveň z kompletních výsledků dosahovala nejvyšší průměrné tahové pevnosti, a to 19,98 MPa. Oproti referenčním vzorkům je zde příznivý nárůst. Souhrnné výsledky ukazuje příloha B.



Obrázek 5.24: Souhrnný graf závislosti síly na posunu slabě vyztužených prvků

5.4.2 Vzorky s vyšší průřezovou plochou uhlíkové výztuže

Pro celkové porovnání vzorků s vyšší průřezovou plochou uhlíkové výztuže byl z každé sady vybrán typický vzorek, souhrnný graf je znázorněn na obrázku 5.25.

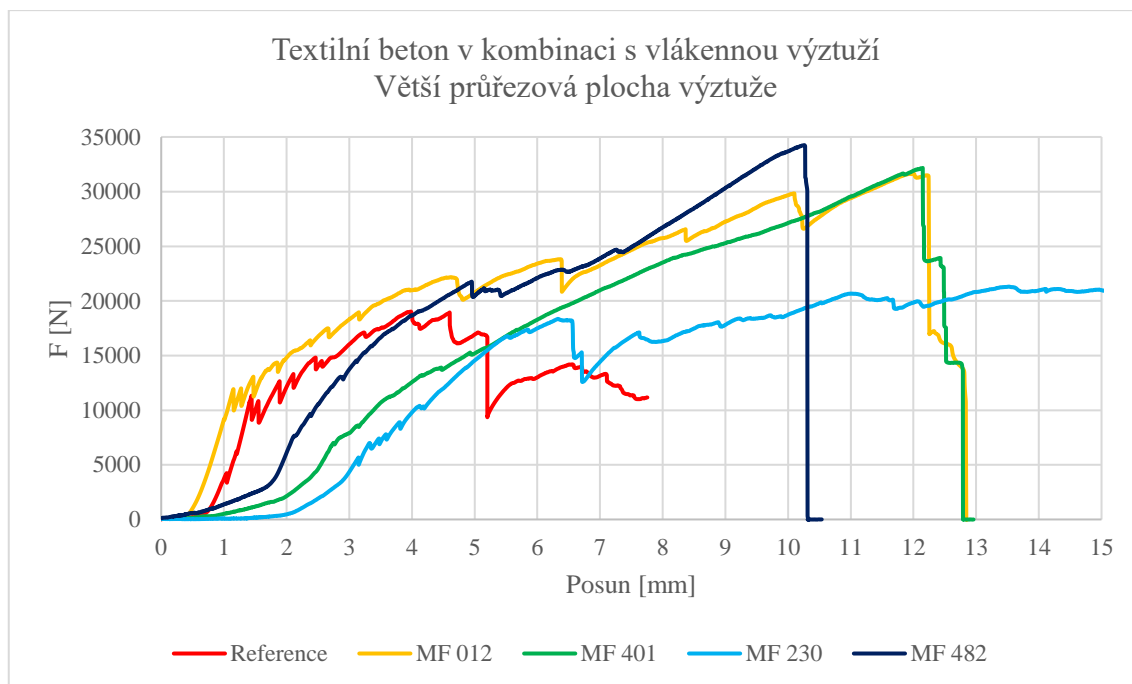
Oproti kombinaci vláknenné výztuže s nízkou průřezovou plochou uhlíkové textilní výztuže zde lze pozorovat na první pohled příznivý vliv, a to ve fázi porušení a kolapsu prvků. Ani jeden z prvků s vláknennou výztuží nezačal ztrácet únosnost dříve, než referenční vzorek vyztužený pouze uhlíkovou textilií.

Co se však týče přeneseného zatížení, lze si povšimnout, že u vláken MF 230 prakticky nedochází k vyšší únosnosti prvku než u referenčního vzorku. Nejrychleji zatížení narůstalo u vláken MF 012, kde lze pozorovat podobný rozvoj trhlin jako u referenčního vzorku. Ve chvíli, kdy reference začíná postupně ztrácet únosnost, však zatížení u všech vláken (kromě dříve zmiňovaných MF 230) ještě postupně dále narůstá.

Nejlepší efekt vláken a jejich pozitivního vlivu na rozvoj trhlin lze pozorovat u ocelových mikrovláken MF 482 a PVA vláken MF 401. Křivky u obou typů vláken jsou takřka bez poklesů zatížení díky spolupůsobení vláken s uhlíkovou výztuží.

U způsobu porušení se u všech sad vzorků silně vyztužených ohybovou výztuží ukázalo jako velmi kritické místo, při velkých hodnotách zatížení a deformací, pracovní spára v úrovni uhlíkové výztuže. Vůči referenčním vzorkům se ukázal pozitivní vliv materiálově pevnějších vláken MF 482 a MF 401, která zde splnila funkci smykové výztuže a nedošlo zde ke smykovým trhlinám jako u referenčních těles. Oproti tomu vlákna MF 012 a MF 230 nebyla schopná smykovým trhlinám zabránit.

Z výčtu průměrných tahových pevností vyšla nejlépe a v podstatě shodně právě vlákna zabraňující usmýknutí prvku, a to MF 482 a MF 401. Souhrnné výsledky zahrnuje příloha B.



Obrázek 5.25: Souhrnný graf závislosti síly na posunu silně vyztužených prvků

5.5 Zkoušení doprovodných těles

5.5.1 Zkouška trámečků v tahu za ohybu a v tlaku na úlomcích

Zkoušení trámečků o rozměrech 40 x 40 x 160 mm v tahu za ohybu se provádělo dle normy ČSN EN 12390-5 ve stáří 28 dní. [34] Vzorky prostého betonu dosahovaly průměrné pevnosti v tahu za ohybu 14,3 MPa. Následně byly úlomky trámečků zkoušeny tlakovým namáháním, kdy průměrná tlaková pevnost dosahovala hodnoty 105,20 MPa. Při zkoušení těchto doprovodných těles se neprojevil žádné výrazné odchylky či anomálie. Podrobné výsledky popisují tabulky 5.3 a 5.4.

Název vzorku	a [mm]	b [mm]	l [mm]	m [kg]	V [m ³]	ρ [kg/m ³]	F _{max} [kN]	f _{cf} [MPa]	Øf _{cf} [MPa]
1	39,9	40,0	160,00	0,594	0,00026	2328	5,90	13,9	
2	39,4	40,0	160,00	0,587	0,00025	2331	6,27	15,2	14,3
3	39,9	40,0	160,00	0,596	0,00026	2332	5,85	13,8	

Tabulka 5.3: Tabulka výsledků doprovodných těles - zkouška trámečků v tahu za ohybu

Název vzorku	a [mm]	b [mm]	l [mm]	m [kg]	V [m ³]	ρ [kg/m ³]	F _{max} [kN]	f _c [MPa]	øf _c [MPa]
1a	39,9	40,0	160,00	0,594	0,00026	2328	177,98	111,5	
1b	39,9	40,0	160,00	0,594	0,00026	2328	158,32	99,2	105,4
2a	39,4	40,0	160,00	0,587	0,00025	2331	161,47	102,6	
2b	39,4	40,0	160,00	0,587	0,00025	2331	165,57	105,2	103,9
3a	39,9	40,0	160,00	0,596	0,00026	2332	163,57	102,5	
3b	39,9	40,0	160,00	0,596	0,00026	2332	175,91	110,2	106,3
									105,2

Tabulka 5.4: Tabulka výsledků doprovodných těles - zkouška úlomků trámečků v tlaku

5.5.2 Zkouška krychlí v tlaku

Zkoušení krychlí v tlaku bylo provedeno dle již výše zmíněné normy ČSN EN 12390-3. [33] Krychle o rozměrech 100 x 100 x 100 mm byly zkoušeny ve stáří 28 dní. Průměrná tlaková pevnost dosahovala 96,11 MPa.

Při zkoušení těchto doprovodných těles se neprojevíly žádné výrazné odchylky či anomálie. Souhrnné výsledky popisuje tabulka 5.5.

Název vzorku	a [mm]	b [mm]	h [mm]	m [kg]	V [m ³]	ρ [kg/m ³]	F _{max} [kN]	f _c [MPa]	øf _c [MPa]
1	100,0	100,0	99,2	2,293	0,00099	2312	967,3	97,5	
2	100,0	100,0	100,0	2,310	0,00100	2310	1003,8	100,4	96,11
3	100,0	100,0	101,3	2,353	0,00101	2321	916,8	90,5	

Tabulka 5.5: Tabulka výsledků doprovodných těles - zkouška krychlí v tlaku

6 Diskuze

Na základě výše popsaných výsledků lze obecně zhodnotit vliv vlákenné výztuže v textilním betonu jako pozitivní. Těchto výsledků bylo dosaženo hlavně díky předešlé optimalizaci použitého množství vláken, bez které by mohlo dojít k opačnému efektu.

V první sadě byly zkoušeny vzorky slabě ohybově vyztužené, kde ke kolapsu docházelo vždy přetržením výztuže. Co se týče průběhů zatěžování, u všech typů vláken bylo dosaženo vyššího přeneseného zatížení, ovšem ne příliš výrazně. Největšího navýšení pevnosti bylo dosaženo u ocelových mikrovláken MF 482, kde zároveň došlo ke kolapsu a přetržení výztuže nejpozději ze všech variant. Zároveň stojí za zmínku podobnost chování PVA vláken MF 401 a předešlých ocelových MF 482. Ačkoliv se jedná o zcela odlišné materiály, dalo by se říci, že PVA vlákna jsou zde schopna konkurovat ocelovým. Oba typy těchto vláken disponují velmi rychlou schopností přemostění trhlin bez většího poklesu zatížení a zároveň se celkově pohybují na podobných hodnotách zatížení, a to vyšších než zbylá vlákna.

Při porovnání porušení vzorků bylo možné sledovat rozdílné chování jednotlivých vláken. Zde se pozitivním vlivem projevila vlákna MF 012. Ze všech zkoušených variant byla u těchto vláken nejvíce znatelná eliminace a kontrola trhlin, což bylo zřejmě vlivem dokonalé disperze ve směsi díky jemnosti materiálu vláken. U trhlin nedošlo k většímu rozevírání, ale spíše k distribuci do mikrotrhlin, které se dále nerozvíjejí. Ačkoliv jsou vlákna opravdu velmi jemná, došlo zde i k mírnému nárůstu tahové pevnosti.

Oproti tomu u vláken MF 230 nedošlo k příliš příznivým efektům. Došlo zde sice k navýšení tahové pevnosti, avšak vlákna jsou poměrně dlouhá a tím pádem na tak malém průřezu ne příliš efektivní. MF 230 nejsou schopna rychlé reakce při vzniku první trhliny a průběh v této části je prakticky totožný jako u referenčních vzorků vyztužených pouze uhlíkovou textilií. Zřejmě by bylo vhodnější aplikovat MF 230 do rozměrnějších těles.

Ve druhé sadě byla vlákenná výztuž aplikována do stejných vzorků, ovšem naopak ohybově převyztužených uhlíkovou textilií. U referenčních těles došlo ve všech případech k porušení smykem.

U vláken jemnějších materiálů (MF 012, MF 230) došlo taktéž k porušení smykem bez rozdílu. Prvky vyztužené MF 230 sice přenášely zatížení déle než referenční vzorky, ale

v zásadě nedošlo k výraznějšímu zlepšení vlastností. Opět se zde nabízí otázka, jak by se změnilo chování vláken při použití ve větších tělesech.

Ačkoliv u vláken MF 012 nebyl vliv na porušení smykem, spolupůsobení s uhlíkovou textilií je zde prokazatelně vidět. I přesto, že je materiál vláken velmi jemný, dosahovalo zde přenesené zatížení podobných hodnot jako vlákna z výrazně pevnějších materiálů.

Nejvíce umocněný efekt kombinace vláken s uhlíkovou textilií bylo možné pozorovat u vláken MF 401 a MF 482. Nutno podotknout, že průměrné tahové pevnosti těchto dvou typů vláken se shodovaly, tzn. že za určitých podmínek jsou PVA vlákna schopná velmi obstojně konkurovat vláknům ocelovým. Průběh zatěžování byl téměř plynulý bez větších výkyvů zatížení, což značí dokonale rychlé přenesení zatížení vlákny a textilní výztuží. Zároveň byla tato vlákna schopná působit i jako smyková výztuž, kdy prvky jevíly známky porušení ohybem pod podporami a ke kolapsu došlo kvůli ztrátě spolupůsobení uhlíkové výztuže. Ve většině případů ke kolapsu kvůli ztrátě spolupůsobení textilie a betonu došlo po postupné rozsáhlé delaminaci a odpadávání krycí vrstvy.

U všech zkoušených variant se projevilo jako velmi kritické místo pracovní spára. Vzorky byly betonovány s krycí vrstvou z prostého betonu, načež byla uložena uhlíková textilie a následné dobetonování vláknobetonem. Prodleva mezi betonážemi, nebo možné nerovnoměrné rozmístění vláken v oblasti textilie mohou mít na tomto svůj podíl. Vlákna se mohla mírně shlukovat v rovnoběžné vrstvě nad textilií kvůli malé velikosti ok sítě. Pro lepší probetonování by možná lépe fungovala síť s větším rastrem. Dalším důvodem, proč docházelo k tak rozsáhlé delaminaci, však může být i velmi nízká tloušťka krycí vrstvy, která je pro textilní beton však typická.

7 Závěr

Cílem této bakalářské práce byla optimalizace daných typů výztužných vláken a jejich následná kombinace s textilní uhlíkovou výztuží za účelem zjištění vlivu na způsob porušení tohoto textilního betonu.

V první části experimentu byla zkoušena různá množství vláken ve směsi, kdy následně na základě zpracovatelnosti a výsledků tlakových a tahových zkoušek bylo vždy vybráno nejefektivnější řešení. Následně byla vlákenná výztuž aplikována do destiček společně s uhlíkovou textilní výztuží ve dvou variantách.

U prvků slabě vyztužených uhlíkovou textilní výztuží v kombinaci s vlákennou výztuží bylo dosaženo zlepšených mechanických vlastností, ovšem výrazněji pozorovatelný zde byl různý vliv vláken na omezení trhlin. Některá vlákna měla v tomto směru pozitivní dopad, a to konkrétně MF 401 a MF 482 (PVA a ocelová vlákna), zatímco jiná zde nepůsobila efektivně.

U prvků silně vyztužených ohybovou výztuží s přidanými vlákny došlo k výraznému efektu spolupůsobení uhlíkové textilie a vláken, opět zejména ocelová a PVA, ale zde i další. Průběhy křivek zatěžování byly téměř bez větších poklesů zatížení. Při způsobu porušení se vlákna v zásadě chovala dvojitým způsobem – dokázala zamezit smykovému porušení, či nikoliv.

Kdybych měla možnost v dané problematice dále pokračovat, tak pro celkově lepší uchopení chování prvků kombinovaných z vlákenné a textilní výztuže by zřejmě bylo vhodné dále optimalizovat vlákna ve smyslu např. kombinací typů vláken pro zlepšení určitých dalších vlastností, jako je třeba smršťování, chování za požáru, lepší přizpůsobení textilie – množství textilní výztuže apod.

8 Seznam tabulek

Tabulka 3.1: Složení použité směsi.....	25
Tabulka 4.1: Tabulka pevností v tahu za ohybu měřená na trámečcích.....	33
Tabulka 4.2: Tabulka pevností v tlaku měřená na trámečcích	34
Tabulka 4.3: Tabulka pevností v tlaku měřená na krychlích.....	34
Tabulka 4.4: Souhrnné výsledky MasterFiber 012.....	38
Tabulka 4.5: Souhrnné výsledky MasterFiber 401.....	41
Tabulka 4.6: Souhrnné výsledky MasterFiber 230.....	44
Tabulka 4.7: Souhrnné výsledky MasterFiber 482.....	47
Tabulka 5.1: Podrobné výsledky slabě vyztužených referenčních vzorků.....	54
Tabulka 5.2: Podrobné výsledky silně vyztužených referenčních vzorků.....	62
Tabulka 5.3: Tabulka výsledků doprovodných těles - zkouška trámečků v tahu za ohybu.....	71
Tabulka 5.4: Tabulka výsledků doprovodných těles - zkouška úlomků trámečků v tlaku.....	72
Tabulka 5.5: Tabulka výsledků doprovodných těles - zkouška krychlí v tlaku	72

9 Seznam obrázků

Obrázek 2.1: Vliv vodního součinitele a pórovitosti na pevnost betonu [7]	19
Obrázek 3.1: MasterFiber 012	27
Obrázek 3.2: MasterFiber 401	28
Obrázek 3.3: MasterFiber 230	28
Obrázek 3.4: MasterFiber 482	29
Obrázek 3.5: Uhlíková textilie před impregnací	30
Obrázek 4.1: Schéma zkoušky třibodovým ohybem a reálná zkouška	32
Obrázek 4.2: Tlaková zkouška vzorků	35
Obrázek 4.3: Rozlití kužele MasterFiber 012	36
Obrázek 4.4: Graf závislosti síly na posunu MF 012	37
Obrázek 4.5: Porušené vzorky po zkoušce tlakem MF 012	37
Obrázek 4.6: Struktura směsi MF 401 při množství 40 kg/m ³	39
Obrázek 4.7: Graf závislosti síly na posunu MF 401	40
Obrázek 4.8: Porušení vzorků MF 401	40
Obrázek 4.9: Zkouška rozlití kužele MF 230	42
Obrázek 4.10: Graf závislosti síly na posunu MF 230	43
Obrázek 4.11: Porušení vzorků po zkoušce tlakem MF 230	44
Obrázek 4.12: Úlomky trámečků po zkoušce v tahu za ohybu MF 482	46
Obrázek 4.13: Graf závislosti síly na posunu MF 482	46
Obrázek 4.14: Graf závislosti síly na posunu prostého betonu a vybraných množství vláken	49
Obrázek 5.1: Betonáž destiček	51
Obrázek 5.2: Zkouška čtyřbodovým ohybem	52
Obrázek 5.3: Uhlíková výztuž připravená pro aplikaci do vzorků	53
Obrázek 5.4: Graf závislosti síly na posunu pro slabě vyztužené referenční vzorky	54
Obrázek 5.5: Porušení slabě vyztužených referenčních vzorků	55
Obrázek 5.6: Graf závislosti síly na posunu MF 012 slabě vyztužených prvků	56
Obrázek 5.7: Způsob porušení MF 012 slabě vyztužených prvků	56
Obrázek 5.8: Graf závislosti síly na posunu MF 401 slabě vyztužených prvků	57
Obrázek 5.9: Způsob porušení MF 401 slabě vyztužených prvků	57

Obrázek 5.10: Graf závislosti síly na posunu MF 230 slabě vyztužených prvků....	58
Obrázek 5.11: Způsob porušení MF 230 slabě vyztužených prvků	59
Obrázek 5.12: Graf závislosti síly na posunu MF 482 slabě vyztužených prvků....	60
Obrázek 5.13: Způsob porušení MF 482 slabě vyztužených prvků	60
Obrázek 5.14: Graf závislosti síly na posunu pro silně vyztužené referenční prvky	62
Obrázek 5.15: Porušení silně vyztužených referenčních vzorků.....	63
Obrázek 5.16: Graf závislosti síly na posunu MF 012 silně vyztužených prvků	64
Obrázek 5.17: Způsob porušení MF 012 silně vyztužených prvků	64
Obrázek 5.18: Graf závislosti síly na posunu MF 401 silně vyztužených prvků	65
Obrázek 5.19: Porušení vzorku MF 401 při extrémní hodnotě průhybu.....	65
Obrázek 5.20: Graf závislosti síly na posunu MF 230 silně vyztužených prvků	66
Obrázek 5.21: Smykem porušený prvek MF 230 s rozvojem trhlin v oblasti pracovní spáry.....	66
Obrázek 5.22: Graf závislosti síly na posunu MF 482 silně vyztužených prvků	67
Obrázek 5.23: Ztráta kotvení porušeného prvku MF 482	68
Obrázek 5.24: Souhrnný graf závislosti síly na posunu slabě vyztužených prvků .	69
Obrázek 5.25: Souhrnný graf závislosti síly na posunu silně vyztužených prvků ..	71

10 Reference

1. **Mészöly, Tamás, Ofner, Sandra a Randl, Norbert.** Effect of Combining Fiber and Textile Reinforcement on the Flexural Behavior of UHPC Plates. *Advances in Materials Science and Engineering*. [Online] 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/9891619>. Article ID 9891619.
2. **Gong, Ting, et al.** Tensile behavior of hybrid fiber reinforced composites made of strain-hardening cement-based composites (SHCC) and carbon textile. *Construction and Building Materials*. 2020, Sv. 262.
3. **Tipka, Ing. Martin.** *Složení, návrh a příprava vysokopevnostního a ultravysokopevnostního betonu*. Praha : Rešeršní článek pro grant SGS 2011: Betony a cementové kompozity s řízenými vlastnostmi, 2011.
4. **Song, P. S. a S., Hwang.** Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete. *Construction and building materials*. 9. 2004, Sv. 18, stránky 669-673.
5. **Aitcin, P. C.** The durability characteristics of high performance concrete: a review. *Cement and concrete composites*. 4-5. 2003, Sv. 25, stránky 409-420.
6. **Bittner, Ing. Tomáš.** *Experimentální ověřování prvků z textilního betonu; Disertační práce*. Praha : Kloknerův ústav; ČVUT, 2019.
7. **Procházka, Ing. David.** *Vytvoření předpokladů hodnocení vlastností vysokopevnostních betonů s využitím nedestruktivních metod zkoušení; Doctoral thesis*. Brno : FAST VUT, 2013.
8. **Zollo, Ronald F.** Fiber-reinforced concrete: an overview after 30 years of development. *Cement and concrete composites*. 2. 1997, Sv. 19, stránky 107-122.
9. **Van Chanh, Nguyen.** *Steel fiber reinforced concrete*. Thành phố Hồ Chí Minh : Faculty of Civil Engineering Ho chi minh City university of Technology, 2004. stránky 108-116, Seminar material.
10. *Pravděpodobnostní analýza vláknobetonu metodou SBRA. Šolc, Martin.* Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni, Univerzitní 8, 306 14 Plzeň, 2012. Sborník rozšířených abstraktů; Studentská vědecká konference 2012. stránky 45-46. ISBN 978-80-261-0127-7.

11. **Jirovský, Leoš.** Teorie vláknobetonů. *Experimentální porovnání metod destruktivního a nedestruktivního zkoušení betonů a vláknobetonů; Bachelor thesis.* Pardubice : Univerzita Pardubice; Dopravní fakulta Jana Pernera, 2015, stránky 14-31.
12. **Bonczková, Bc. Sabina.** Vláknobetony. *Vývoj alkalicky aktivovaných vláknobetonů; Diploma thesis.* Ostrava : VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2016, stránky 17-22.
13. **Olivito, R. S. a Zuccarello.** An experimental study on the tensile strength of steel fiber reinforced concrete. *Composites Part B: Engineering.* 3. 2010, Sv. 41, stránky 246-255.
14. **Kročová, Bc. Blanka.** Vláknové kompozity. *Částicové kompozity vyztužené krátkými vlákny; Diploma thesis.* Brno : VUT v Brně, Fakulta chemická, 2012, stránky 8-13.
15. **Ding, Yining, a další.** Hybrid effect of basalt fiber textile and macro polypropylene fiber on flexural load-bearing capacity and toughness of two-way concrete slabs. *Construction and building materials.* 2020, Sv. 261, str. 119881.
16. **Svoboda, Luboš a kolektiv.** Polymery. *Stavební hmoty.* 3. Praha : Elektronické vydání, 2013, stránky 629-631.
17. **Hynštová, Karolína.** Polyvinylalkohol. *Příprava a charakterizace akrylových esterů PVAL; Diploma thesis.* Brno : VUT Fakulta chemická, 2008, stránky 12-18.
18. **Holub, Petr.** Rozptýlená mikrovýztuž. *Návrh jemnozrnné betonové směsi pro vyztužení uhlíkovými vlákny; Bachelor thesis.* Praha : FSv ČVUT; Katedra mechaniky, 2016.
19. **Sousedík, Bohdan.** Vláknobeton; Rozptýlená výztuž. *Ověření vlivu agresivního prostředí na vláknobetony; Bachelor thesis.* Ostrava : VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2017.
20. **Hilar, Matouš.** Využití vláknobetonu pro výstavbu tunelů pod letištěm Heathrow. *Geotechnické problémy líniových stavieb.* Bratislava : GAČR P104/10/2023, 2011.
21. **15. Konference Speciální betony; sborník příspěvků. Trejbal, Jan, Hlůžek, Radim a Prošek, Zdeněk.** Skalský Dvůr : SEKURKON s.r.o. , 2018. stránky 28-33. ISBN 978-80-86604-78-7.
22. **Machovec, Bc. Jan.** Vliv prostředí na zahovou pevnost textilního betonu; *Diploma thesis.* Praha : FSv ČVUT, 2017.

23. **Blažek, Tomáš.** *Předpínaný textilní beton; Diploma thesis.* Praha : FSv ČVUT, 2020.
24. **Chira, Alexandru, et al.** Property improvements of alkali resistant glass fibres/epoxy composite with nanosilica for textile reinforced concrete applications. *Materials & Design.* 2016, Sv. 89, stránky 146-155.
25. **Signorini, Cesare, et al.** Designing epoxy viscosity for optimal mechanical performance of coated Glass Textile Reinforced Mortar (GTRM) composites. *Construction and Building Materials.* 2020, Sv. 233.
26. **Hájek, Petr.** *Vyztužování betonu technickými textiliemi se zaměřením na zvýšení duktility; Diploma thesis.* Praha : FSv ČVUT, 2021.
27. **Laiblová, Lenka, Vlach, Tomáš a Ženíšek, Michal.** *Využití technických textilií jako alternativní výztuže do subtilních fasádních panelů z vysokohodnotného betonu.* Buštěhrad : UCEEB ČVUT, 2015.
28. **Barhum, Rabea a Mechtcherine, Viktor.** Effect of short, dispersed glass and carbon fibres on the behaviour of textile-reinforced concrete under tensile loading. *Engineering Fracture Mechanics.* 2012, Sv. 92, stránky 56-71.
29. **ČSN EN 1015-3.** Zkušební metody malt pro zdivo - Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střešovacího stolku). Praha : ÚNMZ, březen 2000.
30. **Svoboda, Luboš a kolektiv.** Silikátový cement. *Stavební hmoty.* 3. Praha : Elektronické vydání, 2013, stránky 373-387.
31. —. Přísady a příměsi. *Stavební hmoty.* 3. Praha : Elektronické vydání, 2013, stránky 459-471.
32. **ČSN EN 13670.** Provádění betonových konstrukcí. Praha : ÚNMZ, červen 2010.
33. **ČSN EN 12390-3.** Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles. Praha : ÚNMZ, duben 2020.
34. **ČSN EN 12390-5.** Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles. Praha : ÚNMZ, červenec 2020.
35. **Hájek, Jakub.** *Možnost využití tradičních kotev v tenkých deskách z textilního betonu; Bachelor thesis.* Praha : FSv ČVUT, 2019.
36. **Procházka, Ing. David.** Základní charakteristika vysokopevnostních betonů; Pevnost. *Vytvoření předpokladů hodnocení vlastností vysokopevnostních betonů s využitím nedestruktivních metod zkoušení; Doctoral thesis.* Brno : FAST, 2013, stránky 13-21.

37. **Swamy, R. N. a Mangat, P. S.** Influence of fiber geometry on the properties of steel fiber reinforced concrete. *Cement and concrete research*. 3. 1974, Sv. 4, stránky 451-465.
38. **ČSN EN 12350-8.** Zkoušení čerstvého betonu – Část 8: Samozhutnitelný beton - Zkouška sednutí-rozlitím. Praha : ÚNMZ, duben 2020.
39. **Fantilli, Alessandro P., Mihashi, Hirozo a Vallini, Paolo.** Multiple cracking and strain hardening in fiber-reinforced concrete under uniaxial tension. *Cement and Concrete Research*. 12. 2009, Sv. 39, stránky 1217-1229.