

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ

KATEDRA KONSTRUKCÍ POZEMNÍCH STAVEB



**MOŽNOSTI VYZTUŽOVÁNÍ SUBTILNÍHO
PRŮSVITNÉHO BETONOVÉHO PANELU**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Vypracovala:
Vedoucí práce:**

**Bc. Věra Kabíčková
Ing. Tomáš Vlach, Ph.D.**

2022/2023

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: <u>Kabičková</u>	Jméno: <u>Věra</u>	Osobní číslo: <u>477130</u>
Zadávací katedra: <u>Katedra konstrukcí pozemních staveb</u>		
Studijní program: <u>Budovy a prostředí</u>		
Studijní obor/specializace: <u>Budovy a prostředí</u>		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: <u>Možnosti vyztužování subtilního průsvitného betonového panelu</u>	
Název diplomové práce anglicky: <u>Possibilities of reinforcement of subtle translucent concrete panel</u>	
Pokyny pro vypracování: - rešerše stávajících řešení prefabrikovaných průsvitných betonových panelů s návazností na bakalářskou práci studentky, se zaměřením na různé možnosti jejich vyztužování - variantní návrh experimentálního vyztuženého průsvitného panelu, návrh laboratorního ověření ohybové únosnosti průsvitného panelu s využitím dílců z plexiskla a vysokohodnotného betonu s různými variantami vyztužení pomocí kompozitní a vlákněné vyztuže - realizace experimentu, vyhodnocení výsledků	
Seznam doporučené literatury: - AÏTCIN, Pierre-Claude. High performance concrete. CRC press, 1998 - HUANG, Baofeng, et al. Fabrication and energy efficiency of translucent concrete panel for building envelope. Energy, 2022, 248: 123635 - ELGHEZANWY, Dalia; ELTARABILY, Sara. A Review of Translucent Concrete as a New Innovative Material in Architecture. Civil Engineering and Architecture, 2020, 8.4: 571-579	
Jméno vedoucího diplomové práce: <u>Ing. Tomáš Vlach, Ph.D.</u>	
Datum zadání diplomové práce: <u>19. 9. 2022</u>	Termín odevzdání DP v IS KOS: <u>9.1.2023</u> <i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>
_____	_____
Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

_____	_____
Datum převzetí zadání	Podpis studenta(ky)

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracovala samostatně pod odborným vedením Ing. Tomáše Vlacha, Ph.D. a s použitím uvedené literatury a podkladů.

V Praze dne

.....
Věra Kabíčková

Poděkování

Nejprve bych chtěla poděkovat svému vedoucímu práce Ing. Tomášovi Vlachovi, Ph.D. za pomoc a ochotu v průběhu celé práce, jak při psaní práce, tak při výrobě vzorků, a množství věnovaného času. Dále bych ráda poděkovala Ing. Jakobovi Hájkovi za pomoc při zkoušení vzorků. Nakonec chci poděkovat své rodině za podporu v dosavadním studiu a přátelům za jejich oporu.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá možnostmi vyztužení subtilního průsvitného betonového panelu. První kapitola obsahuje úvod představující význam práce se světlem v technologii betonu a zároveň význam redukce tloušťky betonového prvku. Druhá a třetí kapitola uvádí možnosti zajištění průsvitnosti betonů a jejich možné vyztužení. Čtvrtá kapitola představuje použité materiály v praktické části práce. Pátá kapitola se zaměřuje na praktickou výrobu vzorků s výztuží tvořenou různými druhy vláken (skleněnými a polypropylenovými) a různými rovingy (uhlíkové, skleněné a lněné) a na měření mechanických vlastností těchto vzorků zkouškami v tlaku a v tahu za ohybu. Je provedena optimalizace množství výztužných vláken na doprovodných neprůsvitných tělesech a poté jsou vyráběny a měřeny průsvitné vzorky. Na závěr jsou vyhodnoceny výsledky měření a je diskutována realizovatelnost daného způsobu vyztužení a možnosti případného navazujícího výzkumu.

Klíčová slova

Beton, průsvitný beton, textilní beton, vláknobeton, vysokohodnotný beton

Abstract

This thesis is focused on the possibilities of reinforcement of subtle light-transmitting concrete panel. The first chapter contains an introduction presenting the importance of the work with light in concrete technology and at the same time explaining the importance of reducing the thickness of concrete. The second and the third chapters present the possibilities of how to ensure the translucency of concrete and their possible reinforcement. The fourth chapter presents materials used in the practical part of this work. The fifth chapter is focused on practical preparation of specimens with reinforcement made of different types of reinforcing fibers (glass and polypropylene) and different types of rovings (carbon, glass and flax) and on measurement of the mechanical properties of these specimens using compressive and flexural strength tests. Optimization of the amount of reinforcing fibers is done on opaque specimens and then translucent specimens are measured. Finally, the results of measurement are evaluated and the applicability of different reinforcements and recommendations for possible follow-up research are discussed.

Key words

Concrete, light-transmitting concrete, textile-reinforced concrete, fiber-reinforced concrete, high-performance concrete

Obsah

1	Úvod.....	8
2	Průsvitný beton.....	10
2.1.	Optická vlákna.....	10
2.2.	Průsvitné prvky.....	13
3	Možnosti vyztužení.....	16
3.1.	Ocelová výztuž.....	16
3.2.	Textilní beton.....	17
3.2.1.	Textilní výztuž.....	17
3.2.2.	Vysokohodnotný beton	19
3.2.3.	Environmentální hledisko	20
3.3.	Vláknobeton.....	22
3.4.	Studie vyztužení průsvitného betonu.....	22
3.4.1.	Studie plexiskla + skleněná výztužná vlákna.....	23
3.4.2.	Studie optická vlákna + ocelová výztužná vlákna.....	24
3.4.3.	Studie optická vlákna	26
4	Použité materiály.....	28
4.1.	Vysokohodnotný beton – směs	28
4.2.	Plexiskla.....	28
4.3.	Výztuže.....	29
4.3.1.	Uhlíkové rovingy	29
4.3.2.	Skleněná vlákna	29
4.3.3.	PP pazdeří.....	30
4.3.4.	Skleněné rovingy	30
4.3.5.	Lněné rovingy.....	30
4.4.	Epoxidová pryskyřice – impregnace vláken.....	30
5	Praktická část	31
5.1.	Optimalizace množství výztuže	32
5.1.1.	Postup výroby.....	32
5.1.2.	Průběh experimentu a vyhodnocení – Skleněná vlákna	34
5.1.3.	Průběh experimentu a vyhodnocení – PP vlákna	38
5.2.	Subtilní průsvitný vláknobeton	42
5.2.1.	Postup výroby.....	42
5.2.2.	Průběh experimentu a vyhodnocení.....	43
5.3.	Subtilní průsvitný beton s kompozitní výztuží	46

5.3.1.	Postup výroby	46
5.3.2.	Průběh experimentu a vyhodnocení	48
5.4.	Diskuze výsledků	52
6	Závěr	55
	Použitá literatura	57
	Seznam obrázků	61
	Seznam tabulek	64
	Seznam příloh	65

1 Úvod

Beton patřil, patří a pravděpodobně dlouhou dobu ještě patřit bude mezi nejpoužívanější stavební materiály. Uvádí se, že jeho celosvětová produkce za posledních 50 let vzrostla více než 12krát a stále roste. Vzhledem k jeho masové produkci je jeho dopad na životní prostředí velmi významný – čerpání neobnovitelných zdrojů, produkce emisí SO_2 , CO_2 apod. (způsobené těžbou, dopravou, výrobou, ale i užíváním a koncem životního cyklu) – a je proto potřeba zabývat se jeho optimalizací, pokud ho nechceme (a často ani nemůžeme) nahradit zcela jinými materiály. Významný vliv má v tomto ohledu cement (a hlavně jeho výroba) a ocelová výztuž, která je součástí železobetonů. Kromě konstrukčních výhod hraje ale beton také velmi významnou roli při zajišťování stability vnitřního prostředí. Díky svým tepelně akumulacím vlastnostem je schopen zlepšovat tepelnou pohodu a snižovat potřebnou energii na vytápění a chlazení prostor (například v létě je beton schopen akumulovat během dne teplo a přispívat tak ke snížení vnitřní teploty, v noci je možné prostory větrat a hmotu betonu tak zase ochladit).

Možností optimalizace betonu je celá řada a jednotlivá opatření jsou často kombinována. Je možná částečná náhrada cementu různými přísadami (popílek, křemičitý úlet či struska), dále je možné díky snížení vodního součinitele (s pomocí plastifikátorů) dosáhnout mnohonásobně vyšších pevností (vysokohodnotný beton) a tím snížení potřebné tloušťky prvků. Stále je ale potřebná krycí tloušťka betonu, která zajistí ochranu ocelové výztuže před korozi. Pokud ale nahradíme ocelovou výztuž alternativní výztuží (technické textilie, například uhlíkové, skleněné, je ale možné použít přírodní materiál jako je například len), zbavíme se tak jednak materiálu, který samotný představuje nezanedbatelnou ekologickou zátěž, a jednak je možné v kombinaci s vysokohodnotným betonem dosáhnout tloušťky prvků v řádu nižších desítek milimetrů. To má dopad nejenom na samotnou redukci množství použitých materiálů, ale také na snížení dopravy, snazší manipulovatelnosti, zároveň je takovýto beton trvanlivější a odolnější, tedy i snížení četnosti oprav. Kombinací výše uvedených opatření dostáváme materiál, který se nazývá textilní beton.

Pokud se do betonu přidají místo klasické výztuže rozptýlená výztužná vlákna (ocelová, plastová či například skleněná), vznikne tzv. vláknobeton. Takto rozptýlená vlákna mohou kromě zvýšení pevnosti či duktility přispět také ke zvýšení požární odolnosti (při požáru se roztaví a umožní tak volný odchod vodní páry, což má za následek snížení odprýskávání betonu).

Vedle výše uvedených opatření je možné použít vylehčené konstrukce (kazetové a žebrové konstrukce nebo použití různých vložek, kdy zůstane zachována rovinnost pohledu) či využít lehké betony (jejichž nevýhodou je ale velmi pórovitá struktura). Dále je možné použít recyklované materiály (například na vylehčující vložky) nebo recyklace samotného betonu (v případě náhrady kameniva do betonu dochází ke snížení mechanických vlastností). [1]

Druhou významnou problematikou je osvětlení vnitřních prostorů. Vzhledem k tomu, že člověk přijímá až 80 % informací zrakem, je osvětlení prostorů zásadní. Světelné zdroje ale představují spotřebu energie, je proto důležitá snaha

maximalizovat množství denního světla uvnitř budovy. Snížení potřeby umělého osvětlení je příznivější nejenom environmentálně, ale i ekonomicky. Světelné mikroklima má ale kromě těchto dopadů také vliv přímo na člověka, a to jak fyziologický (tep, látkový metabolismus apod.), tak psychologický (soustředění, únava, až deprese). [2]

Průsvitné betony nabízí částečný průchod světla při zachování většiny vlastností běžných betonů. Vzhledem ke způsobu výroby je ale obtížnější jejich vyztužování – některé prvky se vyrábí jako prostý beton bez výztuže, k dostání jsou případně také průsvitné betony, do kterých je vkládána ocelová výztuž. Tato práce si dává za cíl prozkoumat možnosti vyztužení designového subtilního průsvitného betonu, aby mohlo dojít mimo jiné k redukci množství použitého betonu a tím ke snížení dopadu prvku na životní prostředí. Tato práce navazuje na mou bakalářskou práci Beton a světlo, která vznikla pod vedením doc. Ing. Petra Bílého, Ph.D. a jejíž náplní byla rešerše stávajících materiálů (především betonů) pracujících se světlem a dále se zaměřovala na svítící beton. [3]

Mezi hlavní cíle této práce patří:

- Přehled stávajících řešení průsvitných betonů a možnosti jejich vyztužení.
- Návrh variant způsobu vyztužení průsvitných subtilních panelů a jejich laboratorní ověření se zaměřením na možnost realizace větší plochy panelu beze spár.
- Zkoušení vzorků a jejich vyhodnocení, na jejichž základě bude možné určit, zda je daný způsob vyztužení realizovatelný či vhodný pro další výzkum.
- Určení doporučeného zaměření dalšího výzkumu na základě vyhodnocení výsledků experimentu.

2 Průsvitný beton

Průsvitný beton je takový beton, který pomocí různých prvků umožňuje částečný průchod světla. Momentálně nejběžnějším používaným prvkem jsou optická vlákna, kromě nich se již ale ve velké míře začínají používat také různé polymery nebo sklo. Průsvitný beton se dnes nejčastěji používá jako různé architektonické či designové prvky (fasádní panely, recepční desky, ale také například lavičky či lampy), lze jej ale použít i pro nosné konstrukce. Například firma LiTraCon nabízí vyztužené stavební bloky, podle maďarského patentu HU226967B1 lze mezi průsvitné prvky (firma používá plasty, ale je možné použít i sklo) vložit prutovou výztuž běžně používanou v železobetonech. [4–6]

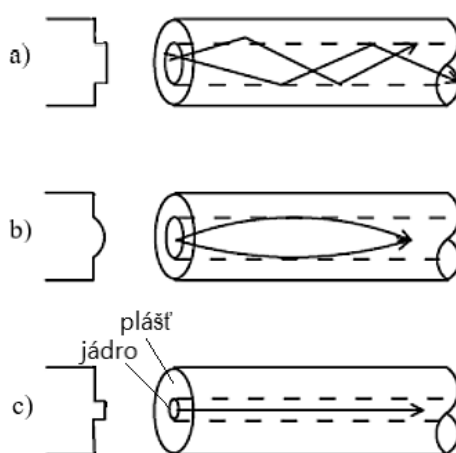
2.1. Optická vlákna

Prvním používaným materiálem jsou tedy optická vlákna. Ta fungují na principu odrazu světla – paprsek dopadá na rozhraní 2 prostředí o různém indexu lomu (jádro a plášť) a tím mění rychlost a směr. Při tomto dopadu se část světla odrazí zpět a část světla vstoupí do druhého prostředí.

Index lomu n je poměr mezi rychlostí světla ve vakuu c a rychlostí světla v daném prostředí v .

$$n = \frac{c}{v}$$

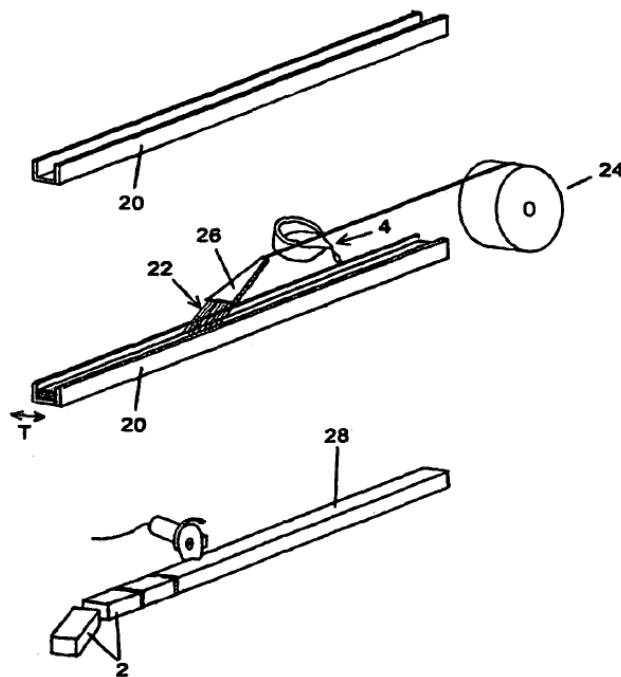
Optická vlákna lze dělit podle dvou parametrů. Prvním je, zda se index lomu mění skokově (Obr. 2.1 a)) či spojitě (Obr. 2.1 b)). Druhým je pak to, zda jsou vlákna mnohavidová (Obr. 2.1 a) a b)) či jednovidová (Obr. 2.1 c)) (poloměr jádra je natolik malý, že se jím šíří pouze jeden paprsek neboli vid).



Obr. 2.1: Dělení optických vláken [7]

Optická vlákna se vyrábí se ze skla či plastu a skládají se z jádra, pláště a dále z primární a sekundární ochrany (primární zajišťuje pružnost, sekundární odolnost). Jejich průměr se pohybuje v řádech jednotek až desítek μm . [7]

Rešerší bylo zjištěno, že výrobě prvků s optickými vlákny se nejvýrazněji věnují dvě firmy – LiTraCon a Lucem. Výroba je možná buď ručně (jako v případě firmy Lucem) nebo strojově (firma Litracon). Podle švédského patentu SE522171C2 vynálezce Árona Losonczi (Litracon) se průsvitný beton strojově vyrábí následovně – do formy (20) se nalije vrstva jemnozrnné betonové směsi (4), na tu se poté aplikuje pomocí trysky (26) vrstva optických vláken (22) odvíjených z cívky (24), která se následně zavibroují. Tyto tři kroky (beton, optická vlákna, zavibroování) se opakují až do naplnění formy, po zatvrdnutí se pak prvek (28) rozřeže na jednotlivé bloky (2). V takových prvcích je pak obsaženo cca 4 % optických vláken z celkového objemu a nabývají pevností v tlaku přibližně mezi 32–49 MPa. [8]



Obr. 2.2: Postup strojové výroby průsvitného betonu [8]

Zatímco Litracon vyrábí průsvitné bloky používané často jako recepční či barové desky, ale také jako vnitřní stěny (o rozměrech max. 1200 x 400 mm a tloušťce od 25 do 500 mm) dostupné ve třech různých barvách (bílá, šedá a černá), Lucem vyrábí panely používané jako předstěny (o rozměrech 1200 x 600 mm či 1600 x 600 mm, tloušťky 20 mm a 30 mm), za kterými jsou nejčastěji osazena LED světla (panely jsou pak osazeny na kotvách). Obě firmy ale také nabízí designové prvky, jako jsou například lampy či lavičky. [4, 5]



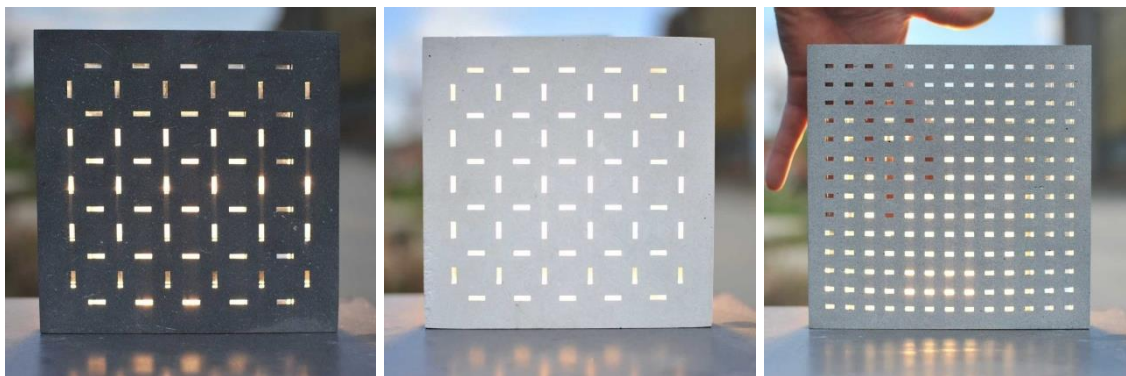
Obr. 2.3: Dělicí stěna mezi obývacím pokojem a japonskou zahradou (tl. 65 mm), Budapešť (Litracon) [4]



Obr. 2.4: Veřejné lavičky na Letišti Mnichov, Německo (Lucem), viditelné vrstvení optických vláken [5]

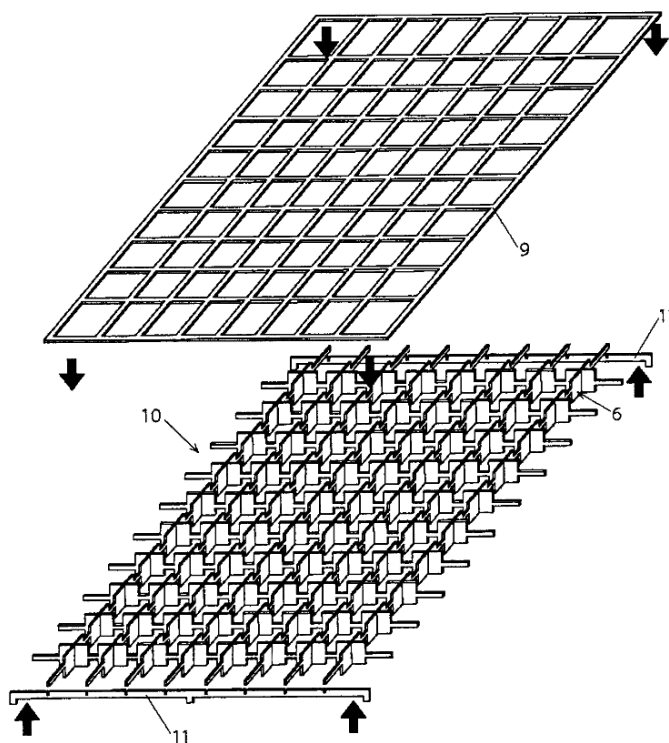
2.2. Průsvitné prvky

Vedle optických vláken lze také použít plastové, případně skleněné prvky o různých tvarech a rozměrech. Prvním známým materiálem s takovými prvky je LiCrete, jež byl poprvé představen českou společností Beton Brož s. r. o. Jeho autoři tvoří značku Gravelli a pod ní je dnes tento produkt také k dostání. Průsvitnost zde zajišťuje vložená mřížka z plexiskla, dle patentu č. EP2692960B1 je možné do formy vložit také výztuž. [9]



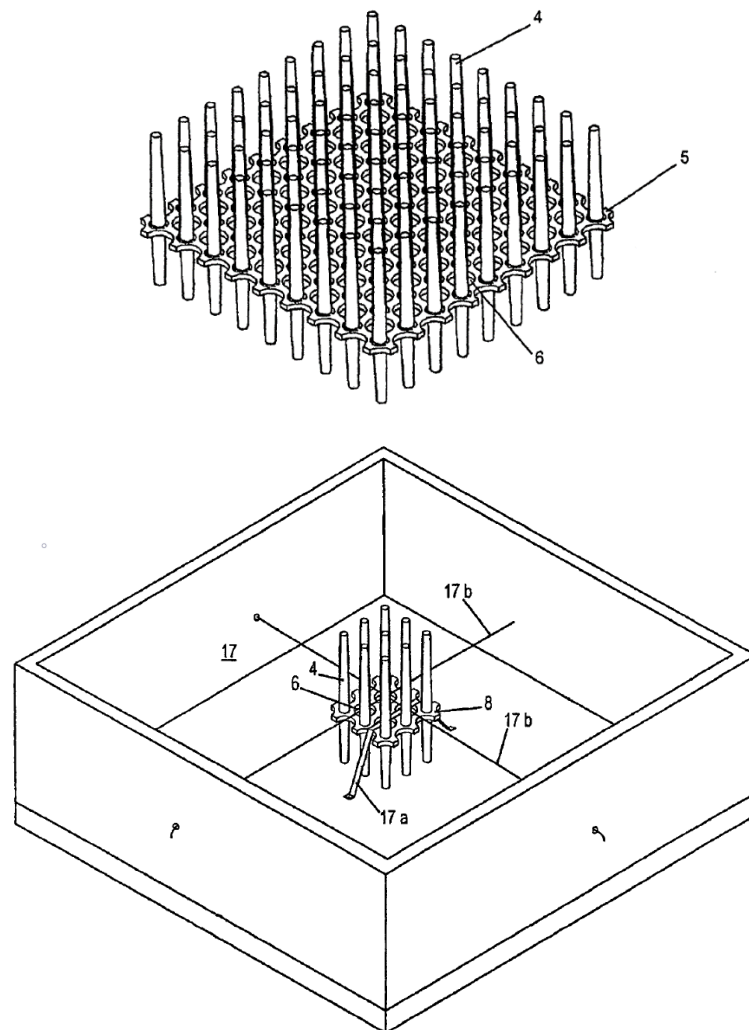
Obr. 2.5: Bloky LiCrete [10]

Při pohledu dovnitř prvků se zde podle výše uvedeného patentu nachází průsvitné prvky (6), které jsou skládány do mřížky (10). Díky tomu tak mohou držet svou polohu uvnitř prvku, v případě potřeby je možné vložit ještě upevňovací prvky (11). Vedle mřížky lze dále do formy vložit také výztuž (9), která se pokládá do zúžených částí průsvitných prvků (6). [9, 11]



Obr. 2.6: Součásti prvků LiCrete [9]

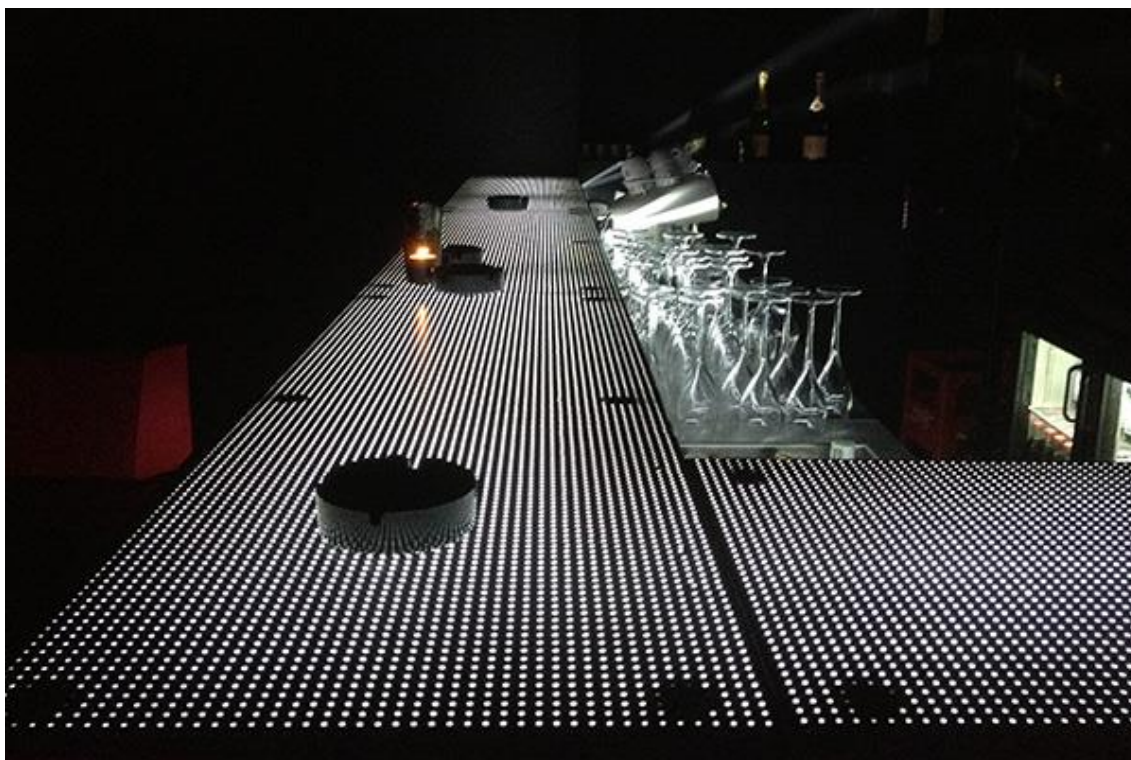
Druhým, mimo české prostředí pravděpodobně známějším materiálem, je produkt pocházející opět od firmy Litracon – Litracon pXL (číslo maďarského patentu HU226967B1 z roku 2007), kde jsou průsvitné prvky (4), ať už organické, tedy plasty jako jsou například PMMA (polymethylmethakrylát) nebo PC (polykarbonát), či anorganické, tedy sklo, drženy v držáku (5) s otvory (6). Prvky je možné uspořádat do nejrůznějších tvarů a také je možné mezi ně vložit tyčovou výztuž. Takto připravená vložka je vložena do formy (17), stabilizována například pomocí pásků (17a) či drátů (17b) a zalita betonovou směsí. [6]



Obr. 2.7: Výroba bloků Litracon pXL [6]

Litracon pXL jsou tentokrát vyráběny v podobě menších panelů max. tloušťky 80 mm, LiCrete jsou vyráběny jako bloky o rozměrech 150 (či 300) x 150 x 75 mm. Použití je obdobné jako v případě optických vláken, tedy osvětlené fasády, designové prvky apod. [4, 10]

Detailnějšímu popisu problematiky průsvitnosti se věnuje již zmíněná bakalářská práce Beton a světlo [3], na kterou tato práce navazuje.



Obr. 2.8: Podsvícený barový pult, Klub ON, Praha, Litracon pXL [4]



Obr. 2.9: Stěna z tvárnice LiCrete, viditelné členění jednotlivých bloků [10]

3 Možnosti vyztužení

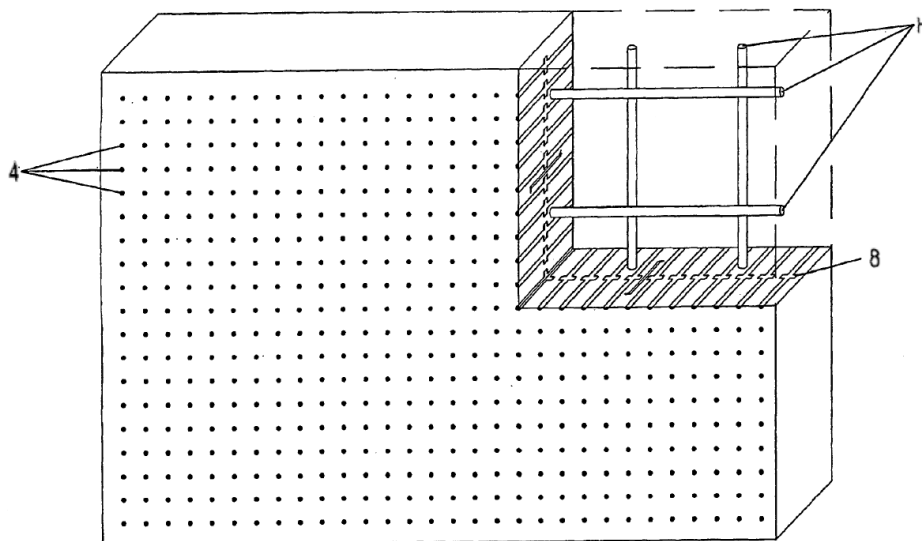
Možnosti vyztužování průsvitných betonů se principem výrazně neliší od vyztužování běžných betonů, je ale třeba brát v potaz několik aspektů, které vstupují do hry.

Aby byla zajištěna průsvitnost, musí jednotlivé průsvitné prvky probíhat bez přerušení z jednoho povrchu na druhý. To tedy znamená, že výztuž musí být umístěna v neprůhledné části prvku. V případě návrhu prutové výztuže je tak člověk limitován jednak maximálním průměrem prutů a jednak vzdáleností jednotlivých prutů v závislosti na vzdálenosti prvků vedoucích světlo.

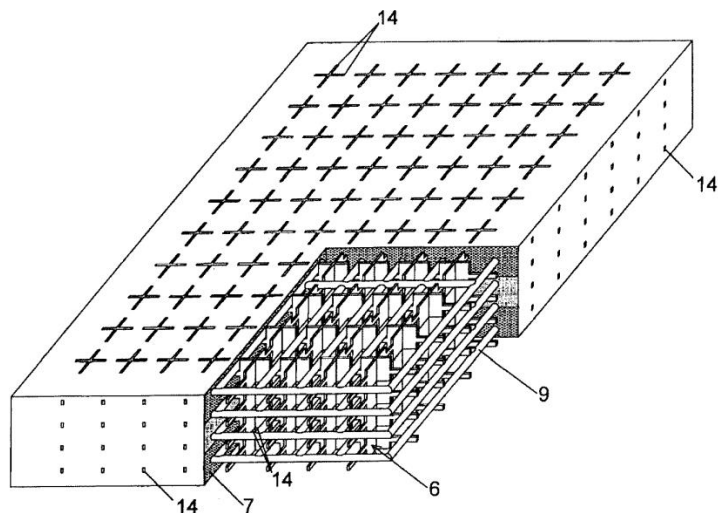
Druhým aspektem návrhu je pak zpracovatelnost. Na rozdíl od klasického betonového prvku bývají průsvitné prvky výrazně členitější a je zde potřeba, aby betonová směs byla schopná vyplnit všechny prostory uvnitř formy.

3.1. Ocelová výztuž

Ocelová výztuž je nejčastěji využívaným typem výztuže a průsvitný beton není výjimkou. Pokud je tedy vyztužován, je využívána právě ocelová výztuž. Vyztužovány jsou ale převážně betony, kde průsvitnost zajišťují plastové či skleněné prvky, jelikož vkládání výztuže do betonů s optickými vlákny je vzhledem k dosavadnímu postupu jejich výroby téměř nerealizovatelné.



Obr. 3.1: Možné vyztužení (H) bloků LiTraCon [6]



Obr. 3.2: Možné vyztužení (9) bloků LiCrete [9]

Problémem ale je (obdobně jako u klasických betonů), že je zde vyžadována minimální krycí tloušťka a vzdálenost mezi jednotlivými pruty výztuže, aby došlo k jejich ochraně před korozí. Výsledná tloušťka betonu se tak u příček běžně pohybuje kolem 100 mm, což pro konstrukci znamená jednak výraznou zátěž, což může mít za následek vyšší dimenze navazujících nosných prvků, a jednak mnohem vyšší spotřebu materiálu s poměrně výraznou uhlíkovou stopou. V neposlední řadě je také s takovými prvky velmi náročná manipulace a montáž.

3.2. Textilní beton

Textilní beton (zkratka TRC z anglického Textile Reinforced Concrete) je takový materiál, který kombinuje výztuž ve formě technické textilie a nejčastěji jemnozrný vysokohodnotný beton. TRC se základní funkcí neliší od klasického vyztuženého betonu – beton přenáší pevnost v tlaku, výztuž v tahu, pouze se mění některé parametry vstupující do výpočtu (tahová pevnost, modul pružnosti). Použitím textilní výztuže v betonu místo klasické ocelové se zbavíme problému koroze výztuže, je možné tak vyrábět prvky tloušťky několik milimetrů, čímž se výrazně sníží jak zatížení vlastní tíhou, tak současně i samotná spotřeba materiálu. [12] Krytí výztuže betonem se navrhuje pouze s ohledem na podmínky spolupůsobení. Prvek tak může být výrazně subtilnější a tím se stává i atraktivnější.

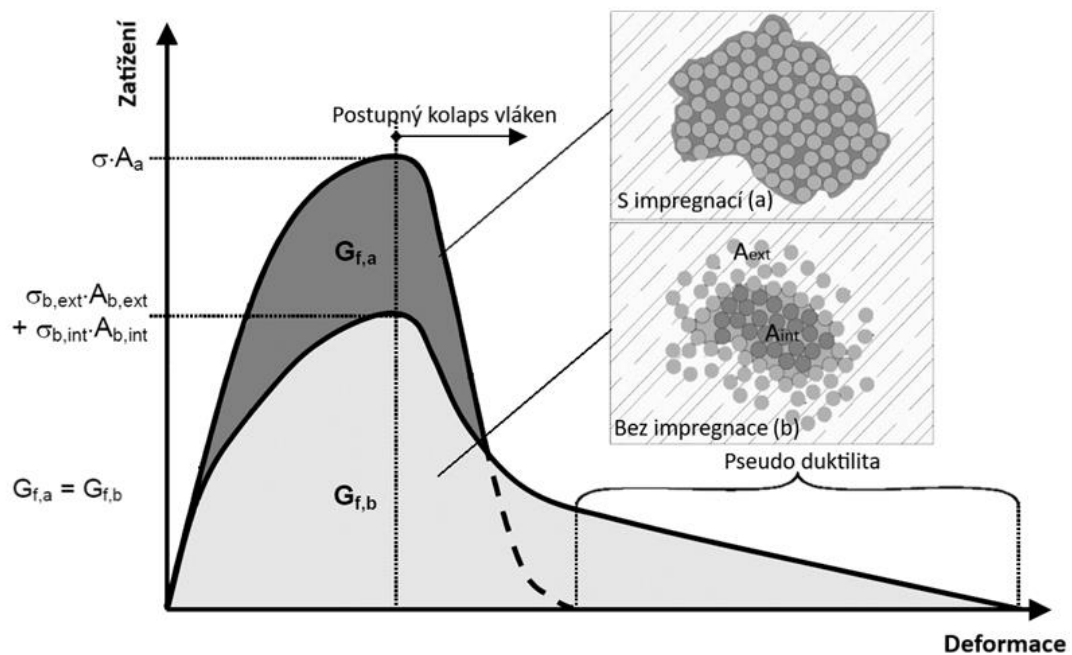
3.2.1. Textilní výztuž

Textilní výztuží mohou být téměř jakákoliv vlákna, která nekorodují a zároveň mají vysokou pevnost v tahu a modul pružnosti (ten by ovšem měl být vyšší než modul pružnosti betonu). Nejčastěji používanými materiály jsou uhlík, alkalivzdorné sklo či čedič, ale je možné použít také rovingy z přírodních vláken, například len nebo konopí. [12, 13]

Jemnost vláken je vyjadřována jednotkou tex, která udává, jakou hmotnost (v gramech) má 1000 metrů vlákna. To záleží na počtu filamentů, jejich průměru a hustotě.

Vlákna tvoří rovingy skládající se ze stovek až tisíců filamentů, které pak mohou být buď volné, kroucené či svázané mezi sebou. Z tohoto důvodu je zajištění spolupůsobení vláken s betonem složitější než například v případě ocelové výztuže. Filamenty, které jsou na povrchu rovingu, brání směsi před zatečením dovnitř rovingu a s betonem tak spolupůsobí pouze tato vnější vrstva (Obr. 3.3 b). Filamenty nacházející se uvnitř budou volně prokluzovat a budou lehce drženy pouze díky tření, takže se nebudou primárně přímo podílet na přenosu zatížení. Takto vyztužený beton je svým chováním při zatížení podobný vláknobetonu, pouze jsou vyztužná vlákna v betonové matici díky textilií orientovaná.

Tomuto je možné předejít pomocí impregnace vláken. Použitím například epoxidové pryskyřice zajistíme zapojení všech vláken do přenosu zatížení a prvek tak bude schopen dosáhnout vyšší únosnosti díky homogenizaci svazku vláken (Obr. 3.3 a). Zároveň se pro lepší soudržnost s betonovou maticí může upravit povrch výztuže, například aplikací vrstvy jemnozrnného písku. Na druhou stranu při porušení prasknou všechna vlákna najednou s minimální nebo žádnou plasticitou, ovšem pokud nebudou impregnována, budou praskat postupně (pseudo duktilita) a prvek tak dosáhne větší deformace, než dojde ke kolapsu (Obr. 3.3). [14]



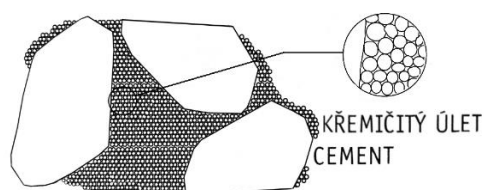
Obr. 3.3: Graf chování rovingu s impregnací a bez impregnace [14]

Impregnací tedy zajistíme, že se na přenosu zatížení budou podílet celá vlákna, ovšem pryskyřice (epoxidové, polyesterové, případně další) představují, vzhledem k nízké teplotě zesklotnění, problém pro konstrukci z hlediska požární odolnosti. Existují sice pryskyřice, které jsou uzpůsobeny vyšším teplotám, ale jejich použití je stále ve fázi výzkumu. [14] Probíhající výzkum této problematiky se také zaměřuje na nahrazení hořlavé matrice nehořlavým materiálem, například cementovou suspenzí či geopolymérem. [15]

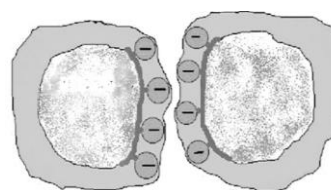
3.2.2. Vysokohodnotný beton

Je známým faktem, že snížením vodního součinitele jsme schopni zvýšit pevnosti betonu. S menším množstvím vody se zrnka cementu dostávají mnohem blíže k sobě, produkty hydratace velmi rychle propojí jednotlivá zrnka cementu a kameniva a vzniká tak poměrně kompaktní a podstatně méně pórovitá struktura. Ve chvíli zatížení prvku jde napětí cestou nejmenšího odporu, běžně tedy skrz póry, které odpor nekladou žádný, a pevnost betonu tak bude dána pevností cementové pasty, kde se póry během hydratace utvoří. Pokud ale dojde k jejich eliminaci především snížením vodního součinitele, bude se napětí přenášet mezi cementovou pastou a kamenivem bez větších obtíží a pevnost betonu tak bude dána také pevností kameniva (tedy pokud kamenivo nebude příliš pevné, snížení vodního součinitele již pevnost nezvýší, protože lom půjde stále skrz kamenivo). Vodní součinitel se u vysokohodnotného betonu pohybuje kolem hodnoty 0,4 a méně, pevnost v tlaku se pak pohybuje přibližně od 50 do 150 MPa.

Snížení vodního součinitele ale s sebou nese také snížení zpracovatelnosti. To je možné kompenzovat použitím plastifikátorů či superplastifikátorů. Zrna cementu se k sobě vlivem povrchových nábojů přitahují, plastifikátory zrna obklopují a tyto náboje neutralizují, takže se zrna neshlukují. Kromě toho se ale do vysokohodnotných betonů přidávají také křemičité úlety (neboli mikrosilika), které mají tvar kuliček o průměru 100krát menším, než jsou zrna cementu. Působí tak jednak jako výplň prostoru mezi jednotlivými zrny cementu, ale zároveň mohou přispívat ke ztekucení směsi (pravděpodobně díky jemným kuličkám, které klouzají mezi sebou).



Obr. 3.4: Mikrosilika mezi zrny cementu [12]



Obr. 3.5: Příklad působení plastifikátoru [13]

Pevnost (současně také modul pružnosti) a zpracovatelnost ale není to jediné, co v případě vysokohodnotného betonu ovlivňujeme. Díky kompaktnější struktuře je vysokohodnotný beton také například odolnější vůči agresivnímu prostředí, poskytuje výztuži vyšší ochranu před korozí a je tak trvanlivější.

V případě vysokohodnotného betonu je kladen mnohem větší důraz na výběr jednotlivých složek betonu, protože každá nepřesnost může negativně ovlivnit výsledné chování. Je třeba brát ohled na pevnost samotného kameniva (ale také vlhkost), na složení cementu (jednotlivé plastifikátory reagují odlišně v závislosti na složení cementu, různé složení může mít různou rychlost hydratace apod.), přesnost dávkování složek, ošetřování čerstvého betonu a mnoho dalšího. Vysokohodnotný beton tak představuje velmi komplexní problematiku, v mnoha ohledech se již nechová podle zákonitostí, které známe z běžného betonu, a přestože je znám již desítky let, stále je předmětem mnoha výzkumů.

Beton je materiál, který se používá a bude používat i nadále, ovšem v případě použití vysokohodnotného betonu jsou suroviny využívány daleko efektivněji, díky vyšší únosnosti je možná redukce spotřeby materiálu, zároveň díky vyšší odolnosti má konstrukce vyšší trvanlivost a výrazně tak klesá dopad na životní prostředí. [16]

3.2.3. Environmentální hledisko

Beton nabízí z konstrukčního hlediska řadu výhod, pro které patří mezi nejpoužívanější materiály ve stavebnictví. Jeho součástí je ale ocelová výztuž a velké množství cementu, což jsou dva materiály, jejichž životní cyklus znamená nezanedbatelnou zátěž životního prostředí. Při výrobě klasického železobetonu je třeba zajistit krytí výztuže za účelem ochrany před korozi, vznikají tak prvky s velkou tloušťkou a tudíž i velkou spotřebou cementu. Použitím textilních výztuží se zbavujeme nutnosti krycí tloušťky betonu a jsme schopni výrazně redukovat výsledné tloušťky betonového prvku, tedy i spotřebu cementu. Pro výrobu vysokohodnotných betonů je sice vyžadováno vyšší množství cementu a jemných příměsí, ale výrazně jsme tím schopni redukovat tloušťku konstrukce a zároveň zvyšovat její životnost. Vytvoření subtilnějších prvků má za následek nejenom snížení množství použitého materiálu, ale také snížení dopravy, snazší manipulovatelnost, nižší dimenze navazujících nosných prvků apod. Textilní beton se tak nabízí jako ideální kompromis mezi klasickým železobetonem a čistě přírodními materiály, které ale často beton nahradit nemohou.

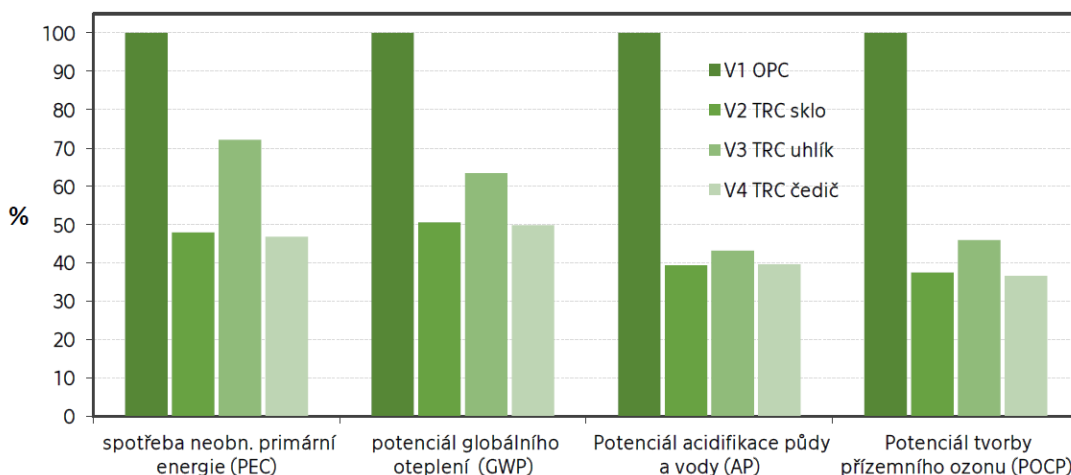
Konkrétní dopad změny textilního betonu namísto železobetonu, nelze vyjádřit jako určité procento obecně, protože faktorů, které do porovnání vstupují, je příliš (konkrétní druh textilní výztuže, lokace stavby a tedy způsob dopravy, lokální zdroje a mnoho dalších). Pro environmentální posouzení produktu se často používá metoda LCA (Life Cycle Assessment). Tato metoda se snaží posoudit produkt z hlediska dopadu celého jeho životního cyklu na životní prostředí (ideálně od těžby surovin, přes výrobu a užívání, až po jeho likvidaci, hranice systému je pak od kolébky do hrobu – cradle to grave). Je prováděna podle normy ČSN EN ISO 14040 a posuzováno je několik kategorií dopadu (například potenciál globálního oteplování, acidifikace, eutrofizace apod.).

Ing. Lenka Laiblová, Ph.D. se ve své disertační práci takovému porovnání textilního betonu oproti železobetonu věnovala – pomocí metody LCA porovnávala fasádní panely z textilního betonu (varianty materiálů výztuží byly uhlík, sklo a čedič) s panely železobetonovými umístěnými na experimentálním objektu v Experimentálním centru energeticky efektivních budov (UCEEB). Zvolena byla minimální tloušťka panelů, která byla ještě schopna splnit všechny zásady:

Varianta V1 – běžný beton + ocelová síť o průměru 6 mm, tloušťka prvku 60 mm

Varianty V2, V3 a V4 – vysokohodnotný beton + 2 vrstvy textilní výztuže – V2 sklo, V3 uhlík, V4 čedič, tl. prvku 18 mm

Panely byly porovnávány v celém jejich životním cyklu, tedy od kolébky do hrobu (výroba včetně těžby, užívání, konec životního cyklu), životnost panelů byla stanovena pro všechny stejně, tedy 100 let. Ve fázi užívání se počítalo s běžnými opravami s výměnou 15 % prvků v případě klasického železobetonu (V1), vzhledem k vyšší životnosti vysokohodnotného textilního betonu, která v práci byla rovněž ověřena, se u tohoto betonu uvažovalo s výměnou pouze 5 % prvků (V2, V3, V4). Výsledky této analýzy můžeme vidět na grafech (Obr. 3.6 a Obr. 3.7) níže.



Obr. 3.6: Procentuální porovnání výsledků potenciálů kategorií dopadů [17]

Využití textilního betonu se jeví jako šetrnější varianta ve všech kategoriích, z textilních výztuží vychází nejhůře uhlík, jehož výrobní proces je náročnější. Naopak sklo a čedič se svým dopadem téměř neliší.

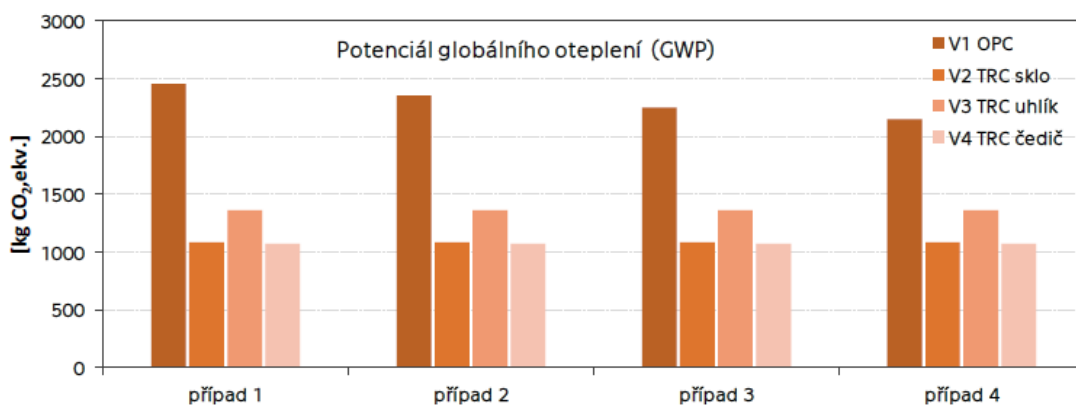
Byla provedena také citlivostní analýza, kde byly % výměny prvků při opravách uvažovány různé, aby se ověřil dopad tohoto vlivu.

Případ 1 uvažuje 20 % pro V1, 5 % pro V2, V3, V4.

Případ 2 uvažuje 15 % pro V1, 5 % pro V2, V3, V4 (tedy výchozí varianta).

Případ 3 uvažuje 10 % pro V1, 5 % pro V2, V3, V4.

Případ 4 uvažuje všechny varianty stejné – výměnu 5 % prvků.



Obr. 3.7: Výsledky citlivostní analýzy, potenciál globálního oteplování [17]

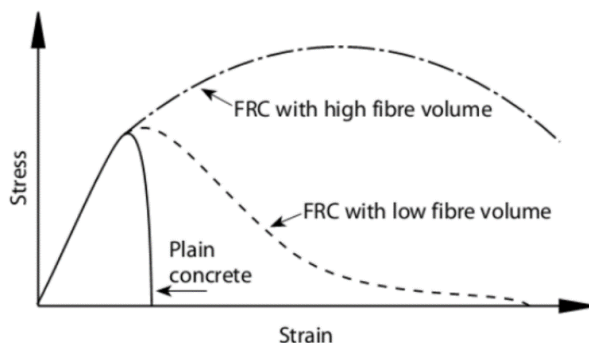
Pro demonstraci byl vybrán pouze graf potenciálu globálního oteplování (Obr. 3.7), jelikož ostatní kategorie dopadů vycházely velmi podobně. Přestože vyšší životnost vysokohodnotného betonu s textilními výztužemi se jeví jako značná výhoda, nemá odhad nižší výměny fasádních prvků příliš zásadní vliv na kategorie dopadu a i v případě, že byla uvažována výměna stejná jako železobetonové prvky, textilní beton má stále výrazně menší environmentální dopady.

Na základě těchto výsledků můžeme tedy říci, že textilní vysokohodnotný beton nabízí mnohdy výrazné zlepšení dopadů konstrukce na životní prostředí. [17, 18]

3.3. Vláknobeton

Narozdíl od textilního betonu, v případě vláknobetonu (zkratka FRC z anglického Fiber Reinforced Concrete) jsou do běžného betonu přidávána rozptýlená vlákna, nikoliv však primárně za účelem zvýšení pevnosti v tlaku či v tahu, ale z důvodu omezení rozvoje trhlin při zatížení, zvýšení požární odolnosti či omezení objemových změn.

V případě použití vláken za účelem zvýšení duktility betonu plní vlákna svoji funkci ve chvíli vzniku prvních trhlin – po tom, co dojde ke vzniku trhlin, mají náhodně rozmístěná vlákna za úkol tyto trhliny překlenout a roznést zatížení.



Obr. 3.8: Typický průběh deformace v závislosti na napětí vláknobetonu [19]

Aby ale vlákna plnila svou funkci co nejlépe, je potřeba, aby byla ve směsi rovnoměrně rozmístěna. Je proto kladen větší důraz na míchání směsi – vlákna by měla být přidávána pomalu, nejčastěji do mokré směsi po přidání všech ostatních složek betonu, aby nedošlo k jejich shlukování či polámání.

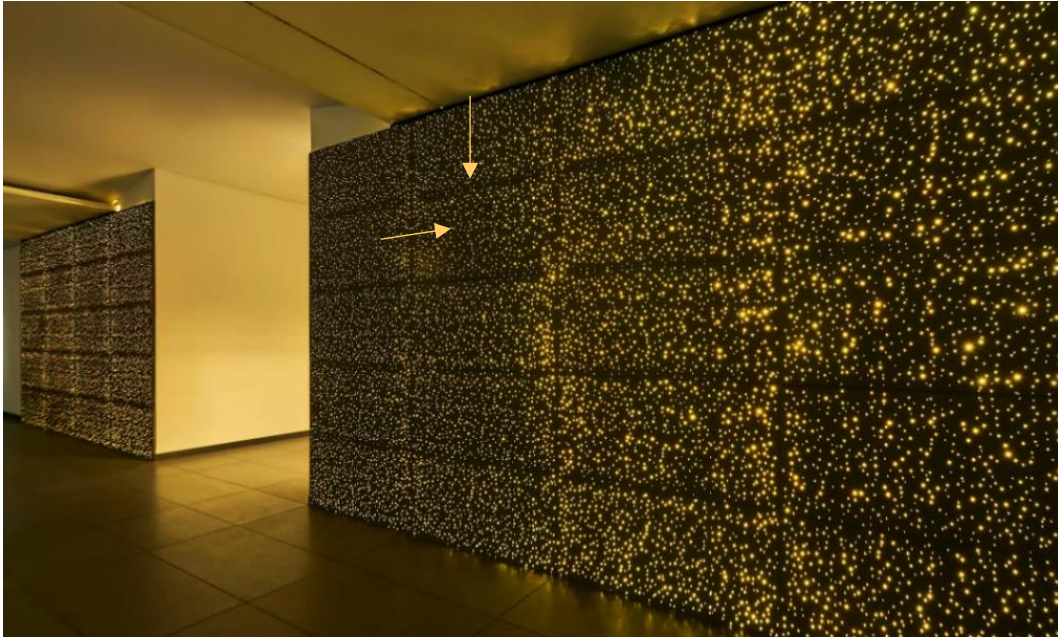
Vlákna mohou být například skleněná, ocelová, různá syntetická či uhlíková, mají různé průřezy a délky. Každý materiál vyžaduje jiné množství vláken pro dosažení optimálních vlastností, je ale nutné při optimalizaci myslet na to, že se zvyšujícím se obsahem vláken se snižuje zpracovatelnost směsi.

Na výsledné vlastnosti betonu má tedy vliv příprava směsi, rozmístění vláken, materiál, geometrie a koncentrace vláken, ale také jejich orientace. [20, 21]

Pokud jsou do betonu přidána za účelem zvýšení požární odolnosti, jsou cíleně použita taková vlákna, která se při požáru roztaví. V místech, kde se vlákna nacházela, zůstanou kanálky, které umožní odchod vodní páry z prvku, což má za následek výrazné omezení odprýskávání betonu. [16]

3.4. Studie vyztužení průsvitného betonu

Bylo provedeno několik studií [22–32], které se zaměřují na mechanické vlastnosti průsvitného betonu. Většina z nich se věnovala tomu, jaký mají průsvitné prvky vliv na pevnosti vzorků, jejich výsledky se ale mnohdy rozcházejí. Existuje totiž celá řada aspektů, které mají na výsledné chování vliv – druh prvků zajišťujících přenos světla (optická vlákna, prvky z plexiskla), jejich tvar, průměr, povrch, distribuce (hustota a vzájemná vzdálenost), dále pak receptura směsi betonu a pevnost neprůsvitného betonu, ale také směr zatěžování (při zkoušce v tahu za ohybu se dá předpokládat pravděpodobný výskyt namáhání podél vláken, například zatížení větrem, při zkoušce v tlaku naopak kolmo na vlákna od vlastní tíhy, viz Obr. 3.9).



Obr. 3.9: Lobby budovy Hansa Carrée, Hamburg, Německo (Lucem) [5], směr namáhání tahem za ohybu podél vláken (například zatížení větrem) a tlakem kolmo na vlákna (vlastní tíha)

Dále existuje několik málo studií, které se vedle vlivu průsvitných prvků věnují také v menší míře vlivu přidání rozptýlených výztužných vláken do betonu na výsledné mechanické vlastnosti.

Pro demonstraci různých výsledků byly vybrány následující 3 studie: Mechanical Properties of Translucent Concrete Using Plexiglass Bars and Fiberglass autorů Fouad a kol. z roku 2021 [30], Mechanical and light transmittance properties of high-performance translucent concrete autorů Tahwia a kol. z roku 2022 [31] a nakonec Effect of Plastic Optical Fiber on Some Properties of Translucent Concrete autorů Salih a kol. z roku 2014 [32]. Shrnutí odlišných výsledků studií vidíme v Tab. 3.1 níže.

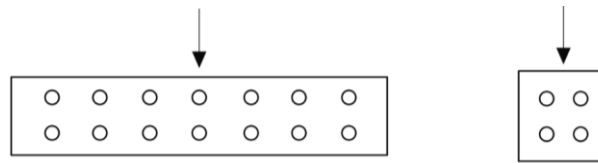
Tab. 3.1: Obecné shrnutí dopadů přidání různých prvků na pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu v popisovaných studiích [30–32]

Studie	Prvek	Tlak	Tah za ohybu
[30]	Plexiskla	nárůst	pokles
	Skleněná vlákna	pokles	nárůst
[31]	Optická vlákna	nárůst	nárůst
	Ocelová vlákna	nárůst	nárůst
[32]	Optická vlákna	pokles	pokles

3.4.1. Studie plexiskla + skleněná výztužná vlákna

První z uvedených studií se zabývala tím, jak ovlivní přidání tyčinek z plexiskla a skleněných vláken mechanické vlastnosti. Směs se skládala z portlandského pucolánového cementu CEM II/P-P 42,5 N a jemnozrnného písku s velikostí zrna min. 0,075 mm a max. 4,75 mm, které se míchaly v poměru 1:2,75, vodní součinitel v/c byl 0,485. Dále byla do směsi přimíchána skleněná vlákna délky 40 mm (2,5 % a 3,75 % hmotnosti cementu), průsvitnými prvky byly tyčinky z plexiskla o průměru 6 mm, které zaujímaly 6 % průřezové plochy vzorků (16 % objemu vzorků).

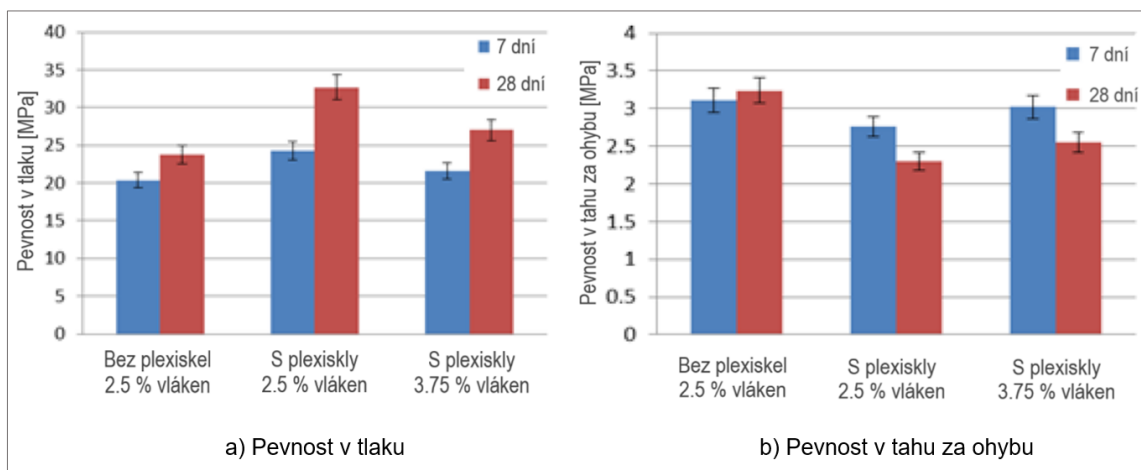
Zkoušena byla pevnost v tlaku na krychlích o hraně délky 50 mm a pevnost v tahu za ohybu tříbodovým ohybem na trámečcích o rozměrech 40 x 40 x 160 mm, obojí ve stáří 7 dní a 28 dní. Směr zatěžování byl v obou případech kolmo na plexiskla.



Obr. 3.10: Způsob zatěžování vzorků [30]

Tab. 3.2: Výsledky zkoušek pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu [30]

Vzorek	Plexi	Skleněná vlákna	Pevnost v tlaku [MPa]		Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	
			7 d	28 d	7 d	28 d
1	ne	2,5 %	20,4	23,7	3,11	3,24
2	ano	2,5 %	24,3	32,7	2,76	2,30
3	ano	3,75 %	21,6	27,0	3,02	2,55



Obr. 3.11: Výsledky zkoušky pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu [30]

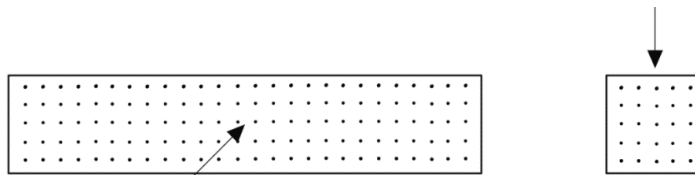
V Tab. 3.2 a Obr. 3.11 vidíme, že přidáním plexiskel došlo v obou časech zkoušení ke zvýšení pevnosti betonu v tlaku (po 28 dnech z 23,7 MPa na 32,7 MPa), ale ke snížení jeho pevnosti v tahu za ohybu (po 28 dnech z 3,24 MPa na 2,3 MPa). Snížení pevnosti v tahu za ohybu je nejspíše dáno malou soudržností betonu s plexiskly, jelikož trhlinka probíhala právě na tomto rozhraní. Přidáním skleněných vláken došlo naopak ke snížení pevnosti betonu v tlaku (po 28 dnech z 32,7 MPa na 27 MPa), ale ke zvýšení pevnosti v tahu za ohybu (po 28 dnech z 2,3 MPa na 2,55 MPa). [30]

3.4.2. Studie optická vlákna + ocelová výztužná vlákna

Ve druhé z uváděných studií byl zkoumán mimo jiné vliv průměrů a množství optických vláken a vliv ocelových výztužných vláken na mechanické vlastnosti. Beton byl vysokohodnotný a skládal se z cementu CEM I 52,5 N, jemného kameniva frakce 0/4, hrubého kameniva s max. velikostí zrna 10 mm, mikrosiliky (SF), vápencové moučky (LP), superplastifikátoru (SP), vody (vodní součinitel w/b, tedy voda/pojivo, byl 0,35). Dále byla do betonu přidávána plastová optická vlákna (POF)

z polymethylmethakrylátu (PMMA) o průměru 1 mm a 2 mm a nakonec také ocelová vlákna o průměru 0,8 mm a délky 11 mm ± 2 mm.

Zkoušena byla pevnost v tlaku na krychlích o hraně délky 100 mm ve stáří 7 dní, 28 dní, 56 dní a 91 dní a pevnost v tahu za ohybu čtyřbodovým ohybem na trámcích o rozměrech 100 x 100 x 500 mm ve stáří 28 dní. Směr zatěžování byl v případě pevnosti v tlaku kolmo a v případě v tahu za ohybu rovnoběžně s optickými vlákny.



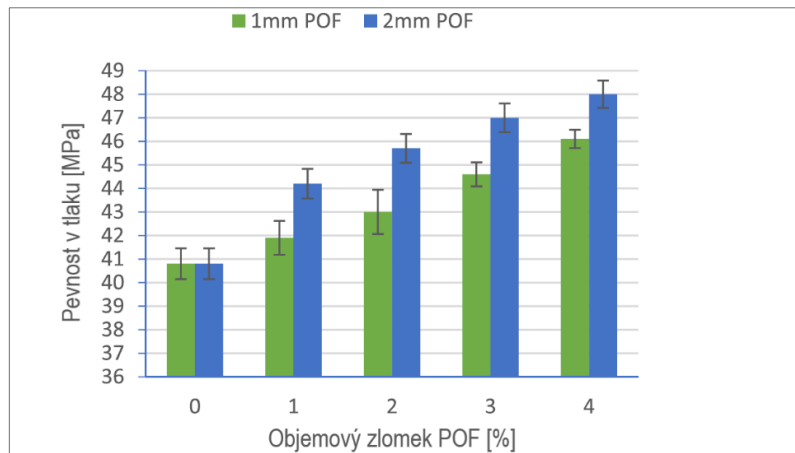
Obr. 3.12: Způsob zatěžování vzorků průsvitného vysokohodnotného betonu [31]

Tab. 3.3: Receptury vzorků průsvitného vysokohodnotného betonu [31]

Složka	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M16	M17	M18
CEM [kg/m ³]	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400
SF [kg/m ³]	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
LP [kg/m ³]	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Jemné kam. [kg/m ³]	845	845	845	845	845	845	845	845	845	840	840	840
Hrubé kam. [kg/m ³]	845	845	845	845	845	845	845	845	845	840	840	840
Voda [kg/m ³]	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175
SP [kg/m ³]	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
POF [mm]	-	1	1	1	1	2	2	2	2	-	1	2
POF [% z objemu]	-	1	2	3	4	1	2	3	4	-	1	1
Ocelová vl. [kg/m ³]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	40	40	40

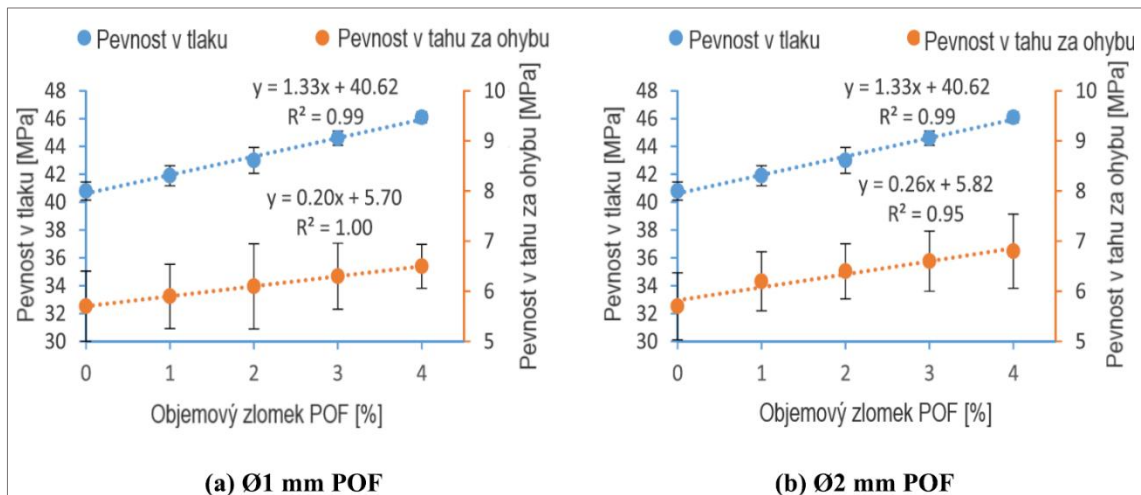
Tab. 3.4: Výsledky zkoušek pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu průsvitného vysokohodnotného betonu [31]

Vzorek	POF		Ocelová vlákna [kg/m ³]	Tlak [MPa]				Tah za ohybu [MPa]
	[mm]	[%]		7 d	28 d	56 d	91 d	28 d
M1	-	-	-	31,0	40,8	43,5	46,2	5,7
M2	1	1	-	30,6	41,9	44,6	47,4	5,9
M3	1	2	-	30,2	43,0	45,8	48,6	6,1
M4	1	3	-	29,8	44,6	47,4	50,4	6,3
M5	1	4	-	29,3	46,1	48,8	52,1	6,5
M6	2	1	-	30,7	44,2	47,0	50,0	6,2
M7	2	2	-	30,4	45,7	48,6	51,7	6,4
M8	2	3	-	30,1	47,0	49,9	53,2	6,6
M9	2	4	-	29,6	48,0	51,0	54,3	6,8
M16	-	-	40	32,1	42,5	45,3	48,1	7,6
M17	1	1	40	31,5	43,8	46,5	49,5	7,8
M18	2	1	40	31,7	46,5	49,3	52,6	8,3



Obr. 3.13: Výsledky zkoušky v tlaku ve stáří 28 dní [31]

Při pohledu na výsledky zkoušky pevnosti v tlaku vidíme, že pevnost vzorků s optickými vlákny ve stáří 7 dní klesla v porovnání s prostým betonem, ovšem ve stáří 28, 56 a 91 dní naopak vzrostla (viz Tab. 3.4 a Obr. 3.13). To je dáno nejspíše tím, že až v pozdějším stáří vzorků produkty hydratace propojily dokonaleji betonovou směs s optickými vlákny, která poté mohla přispět ke zvýšení pevnosti. Se zvyšujícím se množstvím a průměrem optických vláken pevnost v tlaku narůstala, po přidání ocelových vláken tato pevnost ještě vzrostla (z 41,9 MPa na 43,8 MPa ve stáří 28 dní pro vzorky s obsahem 1 % optických vláken o průměru 1 mm).



Obr. 3.14: Výsledky zkoušky pevnost v tahu za ohybu [31]

Z výsledků zkoušky v tahu za ohybu vyplývá, že stejně jako v případě zkoušky v tlaku, i zde s rostoucím množstvím a průměrem optickým vláken roste i pevnost v tahu za ohybu (Obr. 3.14). K výraznému zvýšení této pevnosti došlo přidáním ocelových vláken (viz Tab. 3.4 – 5,7 MPa prostý beton, 7,6 MPa vláknobeton bez POF). [31]

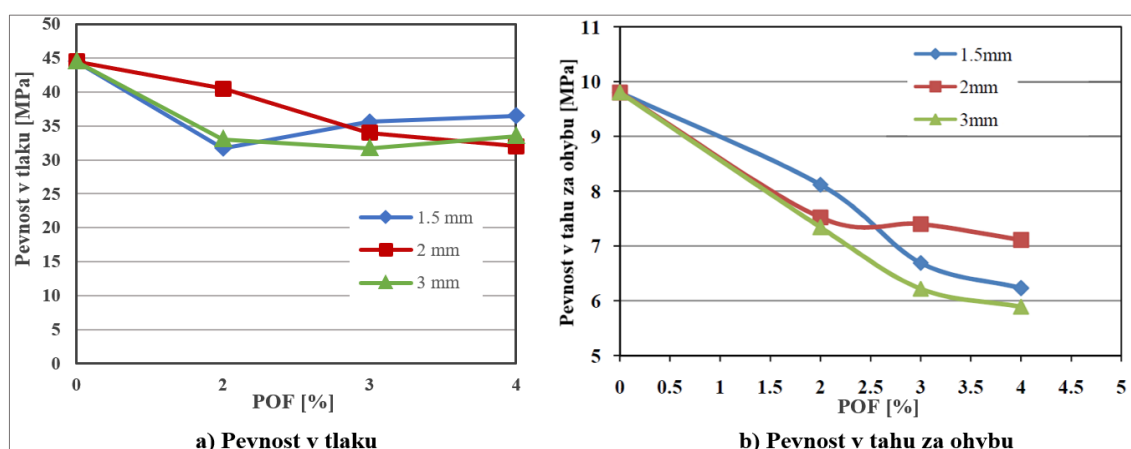
3.4.3. Studie optická vlákna

Poslední z uvedených studií se zabývala vlivem změny množství a průměru optických vláken na mechanické vlastnosti prvku. Optická vlákna (POF) byla tvořena polymethylmethakrylátem (PMMA) a jejich průměry byly 1,5 mm, 2 mm a 3 mm, od každého průměru byly vytvořeny 3 sady s množstvím 2 %, 3 % a 4 % optických vláken z celkového objemu.

Tab. 3.5: Receptura betonové směsi shodná pro všechny vzorky [32]

Složka	ρ [kg/m ³]
CEM I (blíže neurčeno)	495
Kamenivo 150 – 600 μm	1375
Křemičitý úlet (mikrosilika)	55
Superplastifikátor	247,5
Voda	20

Zkoušena byla opět pevnost v tlaku na krychlích o hraně délky 50 mm a pevnost v tahu za ohybu tříbodovým ohybem na trámečcích o rozměrech 40 x 40 x 160 mm (stejně jako v případě první studie s plexiskly) ve stáří 7 dní, 28 dní a poté ještě 90 dní. Směr zatěžování byl také jako v první studii, tedy kolmo na optická vlákna.



Obr. 3.15: Pevnost v tlaku a v tahu za ohybu ve stáří 28 dní [32]

U všech vzorků došlo k poklesu pevnosti v tlaku v porovnání se vzorky bez vláken ve všech zkoušených stáří (Obr. 3.15 a)). K nejmenšímu poklesu ve stáří 28 dní (o 7,12 %) došlo u vzorku s obsahem 2 % optických vláken o průměru 2 mm, na druhou stranu u těchto vláken jako u jediných došlo k výraznějšímu poklesu pevnosti v tlaku se zvyšujícím se množstvím vláken. Průměrně nejnižších tlakových pevností dosahovaly vzorky s průměrem 3 mm.

Ve všech zkoušených časech došlo u všech vzorků ale také k poklesu pevnosti v tahu za ohybu oproti betonu bez vláken (Obr. 3.15 b)). K nejnižšímu poklesu (o 17 %) tentokrát došlo u vzorku s obsahem 2 % optických vláken o průměru 1,5 mm, průměrně nejnižších hodnot dosahovaly opět vzorky s průměrem 3 mm (v porovnání s různými průměry při stejném % obsahu vláken). Trhliny se objevovaly na rozhraní mezi betonem a optickými vlákny, což je zapříčiněno hladkým povrchem vláken a tím je také způsoben pokles pevnosti v tahu za ohybu.

Bylo pozorováno, že výsledky se měnily podle rovnoměrnosti distribuce optických vláken ve vzorkách. S narůstajícím časem pevnosti vzorků narůstaly už jen mírně a nejvyšších hodnot stále nabývaly stejné vzorky. Výjimkou byla pevnost v tahu za ohybu u vzorků s vlákny o průměru 3 mm, jejichž pevnost ve stáří 90 dnů byla mírně vyšší než pevnost vzorků s vlákny o průměru 1,5 mm. Důvodem může být, stejně jako v předchozí studii, že produkty hydratace propojily později betonovou směs s optickými vlákny lépe a vlákna tak více spolupůsobila na přenosu zatížení.

4 Použité materiály

4.1. Vysokohodnotný beton – směs

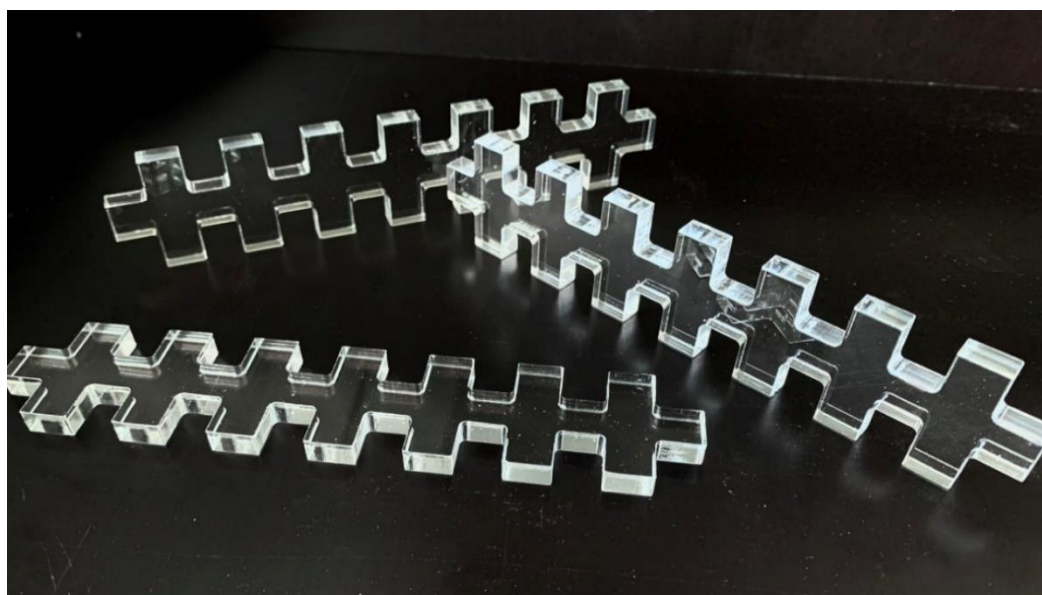
Použitá receptura vycházela z receptury jemnozrnného vysokohodnotného betonu vyvinuté na katedře konstrukcí pozemních staveb Fakulty stavební ČVUT v Praze [33] (Tab. 4.1). Obsah záměsové vody se pak mírně měnil při použití některých výztužných vláken pro dosažení požadované zpracovatelnosti. Pevnost v tlaku měřená po 28 dnech na krychlích o hraně délky 100 mm se pohybuje okolo 110 MPa, pevnost v tahu za ohybu zkoušená čtyřbodovým ohybem na trámečcích 40 x 40 x 160 mm je po 28 dnech přibližně 17 MPa.

Tab. 4.1: Receptura směsi vysokohodnotného betonu

Složka	ρ [kg/m ³]	m [kg]	V [m ³]
CEM I 42,5 R	3000	650	0,217
Křemičitý písek	2650	1200	0,453
Křemičitý úlet (mikrosilika)	2200	75	0,034
Křemičitá moučka	2650	235	0,089
Superplastifikátor	1084	18	0,017
Voda	1000	190	0,190

4.2. Plexiskla

Jak již bylo řečeno, prvků, které lze využít pro vedení světla, je celá řada. Vzhledem k náročnosti výroby vzorků s optickými vlákny byla pro účel diplomové práce vybrána pouze varianta výřezů z plexiskla, jejichž navržená hustota a rozteče tvoří pravidelný rastr a zároveň jejich použitelnost již byla dříve ověřená. Plexisklo neboli polymethylmethakrylát (PMMA) je průhledný polymer, který lze bez problému používat v kombinaci s betonem. Je poměrně odolný, jeho velkou nevýhodou je ovšem jeho nízká požární odolnost. [34]



Obr. 4.1: Plexiskla – žebra spojující „tyčinky“, které probíhají z jednoho povrchu prvku na druhý

4.3. Výztuže

Za účelem minimalizace tloušťky prvku byla zvolena taková výztuž, která nevyžaduje krycí vrstvu kvůli ochraně před korozí, byly tedy zvoleny dvě možnosti vyztužení – textilní beton a vláknobeton.

V případě textilního betonu byla zvolena uhlíková výztuž Tenax STS40 F13 24K 1600tex, která byla opatřena epoxidovou pryskyřicí a následně jemnozrnným křemičitým pískem. Výztuž je tvořena jednotlivými uhlíkovými pruty, které jsou umístěny do prostoru žeber plexiskel. Nenarušují tak tu část plexiskla, která probíhá z jednoho povrchu prvku na druhý a zajišťuje průsvitnost. Nakonec byly pro zajímavost nad plánový rámeček (jelikož po výrobě zbyla plexiskla) vyrobeny ještě dva průsvitné vzorky s různou výztuží – v jednom byly použity skleněné rovingy Cem-FIL® 5325 a v druhém Iněné potravinářské motouzy.

V případě vláknobetonu hrála při výběru zásadní roli délka vláken – mezi plexiskly je vzdálenost 10 x 10 mm, což tedy značně omezuje maximální délku vláken a jejich ohebnost, neboť je potřeba, aby byla směs schopna rovnoměrně vyplnit celý prostor formy. Proto nemohla být použita ocelová či polyvinylacetátová (PVA) vlákna, se kterými lze předpokládat, že by mohlo být dosaženo lepších mechanických vlastností. Byla tedy vybrána skleněná vlákna Anti-Crak HP (62.4) délky 6 mm a polypropylenová (PP) vlákna MasterFiber 012 délky 12 mm.



Obr. 4.2: Použité typy výztuže – zleva: Uhlíkové rovingy, skleněná vlákna, PP pazdeří

4.3.1. Uhlíkové rovingy

Tenax STS40 F13 24K 1600tex jsou vlákna o hmotnosti 1600 g na 1 km délky skládající se ze 24 000 filamentů. Deklarovaná hodnota pevnosti v tahu je 4000 MPa, modul pružnosti je 240 GPa. [35] Vlákna byla dále opatřena epoxidovou pryskyřicí a následně jemnozrnným pískem za účelem zvýšení spolupůsobení výztuže s betonem. Díky materiálovým parametrům je očekáván nejvýraznější vliv na únosnost vzorků.

4.3.2. Skleněná vlákna

Anti-Crak HP (62.4) jsou sekaná alkalivzdorná skleněná vlákna délky 6 mm či 12 mm. Mají primárně za úkol snížení smršťování betonu, ale také zvýšení mechanických

vlastností (pevnost v tahu, duktilita...). Jejich použití je široké, od podlahových betonů až po tenkostěnné prefabrikáty, používají se také pro stříkané betony. Doporučené dávkování do podlahových betonů se pohybuje okolo 1 kg/m^3 až 10 kg/m^3 , do tenkostěnných prefabrikátů je až 70 kg/m^3 . [36]

4.3.3. PP pazdeří

Jako druhá vlákna byla použita polypropylenová (PP) vlákna MasterFiber 012. Vlákna jsou velmi jemná, snadno se tak rozptýlí v celé ploše betonu a vytvoří trojrozměrnou síť. Vlákna se přidávají primárně za účelem snížení smrštění, mají ale také zvýšit odolnost proti vodě a mrazu a zvýšit tak trvanlivost, při požáru mají za úkol zabránit odlupování betonu.

Vlákna mají délku 12 mm, jsou ale velmi jemná a ohebná a dá se tedy předpokládat, že budou schopna vyplnit rovnoměrně i prostor mezi plexiskly.

Doporučené dávkování vláken se pohybuje přibližně mezi 600 g/m^3 až 3 kg/m^3 , vyšší dávka je možná společně s optimalizací směsi. Doporučená doba míchání po přidání vláken se pohybuje mezi 90 až 120 s, je ale potřeba, aby nedocházelo k jejich sdružování. [37]

4.3.4. Skleněné rovingy

Skleněný roving se nabízí jako vhodná alternativa kuhlíkovému rovingu, jeho únosnost je sice nižší v porovnání s uhlíkem, ale vyšší v porovnání s ocelí. Nevýhodou je poměrně nízký modul pružnosti, který se téměř blíží modulu pružnosti vysokohodnotného betonu. [13] Zvoleny byly rovingy Cem-FIL® 5325, což jsou skleněná alkalivzdorná vlákna odolná vůči UV záření. Byla použita vlákna o hmotnosti 2400 g na 1 km délky, tedy 2400tex. Hodnota pevnosti v tahu je uváděna více než 1000 MPa, modul pružnosti je 72 GPa. [38] Vlákna byla opět opatřena epoxidovou pryskyřicí a poté jemnozrnným pískem.

4.3.5. Lněné rovingy

Jelikož v současné době probíhá na katedře konstrukcí pozemních staveb výzkum možností využití přírodních vláken jako alternativní výztuže do betonu (projekt GAČR 21-35225S), byly jako třetí možná výztuž vybrány pro porovnání přírodní lněné rovingy. Jejich primární použití je v potravinářství a jejich výzkum zatím stále probíhá, proto zatím nemají přesněji stanovené mechanické vlastnosti. Použita byla vlákna 840tex, kdy byla pokládána dvě vlákna vedle sebe, aby se docílilo přibližně hodnoty 1600tex a výsledky mohly být lépe porovnatelné s ostatními (především uhlíkovými) rovingy. [39] Stejně jako oba předchozí rovingy, i zde byla vlákna opatřena epoxidovou pryskyřicí a jemnozrnným pískem.

4.4. Epoxidová pryskyřice – impregnace vláken

Pro zajištění spolupůsobení všech vláken rovingů použitých pro experiment s betonovou maticí a jejich podílení na přenosu zatížení byl povrch vláken opatřen epoxidovou pryskyřicí Sikafloor 150 a následně jemnozrnným křemičitým pískem o maximální velikosti zrna kameniva 0,6 mm. Sikafloor 150 se sestává ze dvou komponent, pryskyřice a tvrdidla, které se míchají v poměru 74 : 26 a poté se doba tvrdnutí pohybuje okolo 1 dne. [40]

5 Praktická část

K optimalizaci množství výztužných vláken byla nejprve vyrobena doprovodná tělesa bez plexiskel. Provedena byla zkouška rozlití kužele dle normy ČSN EN 1015-3 [41], zkouška pevnosti v tlaku dle normy ČSN EN 12390-3 [42] na krychlích o hraně délky 100 mm ve stáří 28 dnů a zkouška pevnosti v tahu za ohybu (tříbodovým ohybem) dle normy ČSN EN 12390-5 [43] na trámečcích o rozměrech 40 x 40 x 160 mm po 28 dnech. Poté byla na úlomcích trámečků provedena ještě tlaková zkouška.

Pevnost betonu v tlaku se stanoví za základě vztahu:

$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

kde f_c je pevnost betonu v tlaku [MPa]

F je maximální zatížení při porušení [N]

A_c je průřezová plocha vzorku, na kterou působí zatížení [mm²]

Pevnost betonu v tahu za ohybu při zkoušce tříbodovým ohybem se stanoví ze vztahu:

$$f_{ct,fl} = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot d_1 \cdot d_2^2}$$

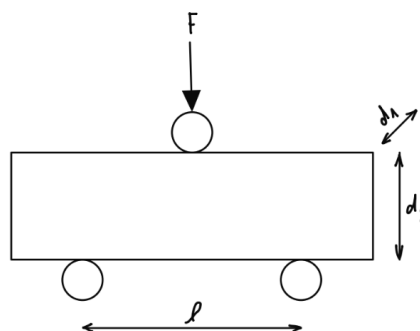
kde $f_{ct,fl}$ je pevnost betonu v tahu ohybem [MPa]

F je maximální zatížení [N]

l je vzdálenost mezi podporami [mm]

d_1 je šířka profilu [mm]

d_2 je výška profilu [mm]



Obr. 5.1: Uspořádání zatěžování tělesa při zkoušce tříbodovým ohybem [43]

Následně bylo vybráno optimální množství vláken. Hlavním aspektem zde byla nejenom dosažená pevnost, ale hlavně zpracovatelnost, jelikož je bezpodmínečně nutné, aby směs byla schopná zatéct i do úzkých prostorů mezi plexiskly bez tvorby kaveren.

Druhá skupina vzorků pak byly destičky s plexiskly o rozměrech 30 x 150 x 400 mm, které byly opět zkoušeny ve stáří 28 dní v tahu za ohybu (čtyřbodovým ohybem). Tyto rozměry vycházely z předpokládané tloušťky panelu a rozměrů podpor zkušebního lisu. Zkouška vycházela opět z normy ČSN EN 12390-5 [43].

Pevnost betonu v tahu za ohybu při zkoušce čtyřbodovým ohybem se stanoví ze vztahu:

$$f_{ct,fl} = \frac{3 \cdot F \cdot l_a}{d_1 \cdot d_2^2}$$

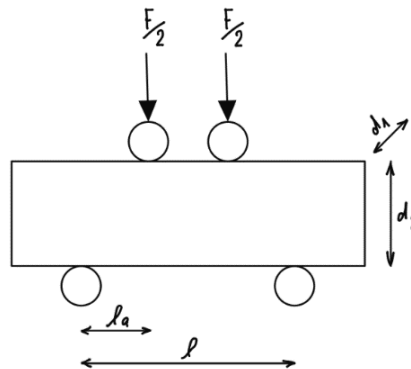
kde $f_{ct,fl}$ je pevnost betonu v tahu ohybem [MPa]

F je maximální zatížení [N]

l_a je vzdálenost mezi podporou a bližším zatěžovacím válečkem [mm]

d_1 je šířka profilu [mm]

d_2 je výška profilu [mm]



Obr. 5.2: Uspořádání zatěžování tělesa při zkoušce čtyřbodovým ohybem [43]

Všechny vzorky byly po odbednění ponořeny do vody a umístěny do klimatické komory, kde byly následně uchovávány v konstantních podmínkách až do dne zkoušení, kdy byly vyjmuty, osušeny, zváženy a změřeny.

5.1. Optimalizace množství výztuže

5.1.1. Postup výroby

V první části experimentu byla tedy vyrobena doprovodná tělesa za účelem optimalizace množství vláken. Receptura viz Tab. 5.1 níže. Vyrobena bylo celkem 9 sad – nejprve referenční sada bez výztuže (ref), dvě sady s obsahem PP vláken (PP2 a PP4) a tři sady s obsahem skleněných vláken (ARG 6/10, ARG 6/15, ARG 6/20). Po zhodnocení rozlití kužele byly operativně přidány ještě dvě sady s obsahem skleněných vláken – množství vody bylo z koncentrace 190 kg/m³ zvýšeno na 200 kg/m³ a doba míchání po přidání vláken byla prodloužena ze 3 minut na 6 minut (ARG 6/10 W200, ARG 6/10 6min). Nakonec byla přidána poslední sada, kde byla místo vláken délky 6 mm použita stejná vlákna se stejnou koncentrací délky 12 mm pro porovnání vlivu délky skleněných vláken (ARG 13/10).

Z každé sady byly vyrobeny 3 krychle o délce hrany 100 mm a 3 trámečky 40 x 40 x 160 mm, pohled na vzorky po odbednění je prezentován na Obr. 5.3.

Tab. 5.1: Receptura doprovodných těles

Složka	ref	PP2	PP4	ARG 6/10	ARG 6/15	ARG 6/20	ARG 6/10 W200	ARG 6/10 6min	ARG 13/10
	[kg]								
CEM I 42,5 R	650	650	650	650	650	650	650	650	650
Křemičitý písek	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200
Křemičitý úlet	75	75	75	75	75	75	75	75	75
Křemičitá moučka	235	235	235	235	235	235	235	235	235
Superplast.	18	18	18	18	18	18	18	18	18
Voda	190	190	190	190	190	190	200	190	190
PP vlákna	-	2	4	-	-	-	-	-	-
Skleněná vl.	-	-	-	10	15	20	10	10	10

Míchána byla nejprve po dobu 3 minut směs písků a křemičitého úletu, aby došlo k rozmělnění případných shluků křemičitého úletu. Poté byl přidán zbytek suchých komponent, tedy cement a křemičitá moučka, které byly míchány po dobu dalších 3 minut. Nakonec byla přidána voda a superplastifikátor. Po ztekucení mohla být přidána vlákna (jinak by, obzvláště u skleněných vláken, hrozilo jejich poškození) a směs byla míchána další 3 minuty.

Množství vláken bylo na počátku stanoveno na základě výrobcem doporučeného dávkování a bylo dále upravováno dle vizuálního zhodnocení zpracovatelnosti. V případě skleněných vláken závisí doporučené dávkování na tom, kam budou vlákna použita. V tenkostěnných prvcích může být množství až 70 kg/m^3 , kvůli nutnosti lepší zpracovatelnosti byly na počátku zvoleny obsahy vláken 10, 15 a 20 kg/m^3 , vzhledem ke špatné zpracovatelnosti při obsahu 20 kg/m^3 již nebyly vzorky s vyšším obsahem vláken realizovány. U PP vláken se pohybuje doporučené dávkování mezi 600 g/m^3 až 3 kg/m^3 , vlákna ale nejsou primárně používána pro zlepšení mechanických vlastností. Byla proto zvolena vyšší množství 2 a 4 kg/m^3 , abychom otestovali, zda není možné přeci jenom tyto vlastnosti mírně zlepšit a zda jsou vlákna schopna zabránit hrozícímu rozpadu vzorku při jeho zrání vlivem rozvoje výrazných smršťovacích trhlin podél plexiskel.



Obr. 5.3: 9 sad vzorků k optimalizaci množství vláken

5.1.2. Průběh experimentu a vyhodnocení – Skleněná vlákna

Během výroby byla tedy nejprve provedena zkouška rozlití kužele.



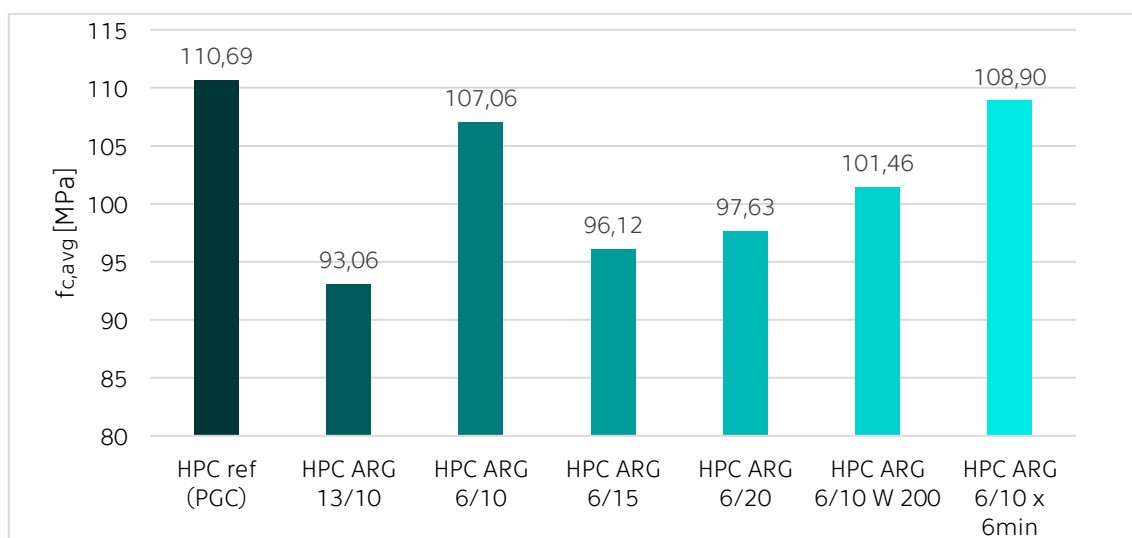
Obr. 5.4: Rozlití kužele – zleva: ARG 6/10, ARG 6/20 a ARG 6/10 W200

V porovnání s referenční sadou vzorků, kdy bylo rozlití kužele 300 mm, je vidět, že s množstvím vláken zpracovatelnost značně klesala. Vlákna byla rovnoměrně rozptýlena ve směsi, pojila se s cementovou kaší a udržovala tak směs kompaktnější. Po vizuálním zhodnocení bylo orientačně stanoveno, že aby byla směs schopna vyplnit celý prostor formy, bylo by potřeba rozlití kužele minimálně cca 150 mm, což splňovala pouze sada vzorků s obsahem 10 kg/m³ skleněných vláken (ARG 6/10). Protože ale i toto rozlití by nebylo pravděpodobně dostačující a plnění formy by bylo obtížné, byly vytvořeny ještě 2 sady vzorků, kde v jedné byl mírně zvýšen obsah záměsové vody a v druhé byla prodloužena doba míchání, aby se ukázalo, zda je možné vlákna rozptýlit důkladněji a zda to bude mít vliv na výsledné vlastnosti vzorku. Hodnoty měření zkoušky rozlití kužele viz Tab. 5.2 níže.

Tab. 5.2: Průměrné výsledky vzorků s obsahem skleněných vláken v porovnání s referenční sadou

Vzorek	Rozlití kužele [mm]	Krychle $f_{c,avg}$ [MPa]	Trámečky tah $f_{cf,avg}$ [MPa]	Trámečky tlak $f_{c,avg}$ [MPa]
ref	300	110,69	17,24	127,67
ARG 13/10	105	93,06	16,27	112,04
ARG 6/10	173	107,06	18,76	116,44
ARG 6/15	133	96,12	16,65	106,93
ARG 6/20	100	97,63	17,20	112,26
ARG 6/10 W200	190	101,46	15,72	122,70
ARG 6/10 6min	125	108,90	16,66	118,84

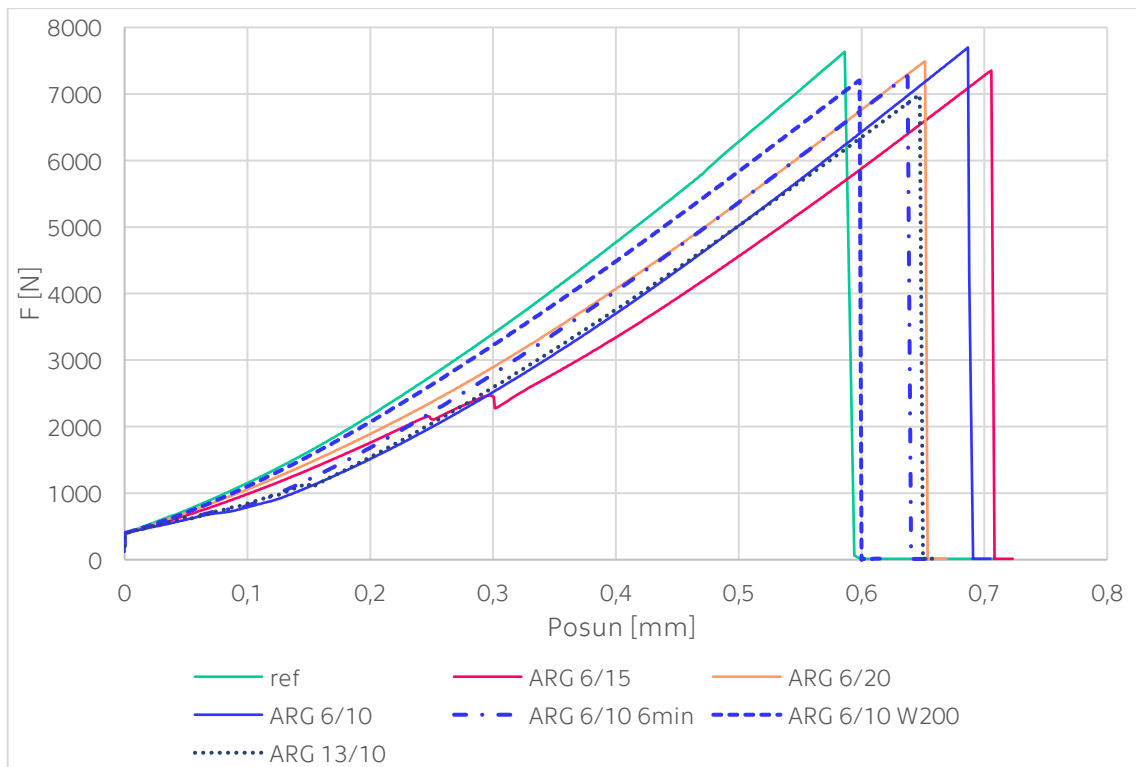
Nejprve byly zkoušeny krychle na pevnost v tlaku ve stáří 28 dnů.



Obr. 5.5: Průměrné hodnoty pevností v tlaku zkoušené na krychlích

Z Tab. 5.2 a Obr. 5.5 výše je vidět mírný pokles pevnosti v tlaku všech vzorků v porovnání s prostým betonem (110,7 MPa), pevnost je nejnižší při obsahu vláken 10 kg/m³ délky 12 mm (93,1 MPa). V případě zvýšení množství záměsové vody pevnost v tlaku dle předpokladů mírně klesla (ze 107,1 MPa na 101,5 MPa), ale výsledná pevnost je stále vyšší než pevnost při obsahu 15 kg/m³ i 20 kg/m³ (96,1 MPa a 97,6 MPa). Pokles pevnosti vzorků oproti běžnému betonu je pravděpodobně dán tím, že vlákna částečně brání hydrataci cementu. Při delším míchání vidíme mírný nárůst tlakové pevnosti (107,1 MPa na 108,9 MPa), ale velký pokles zpracovatelnosti (173 mm na 125 mm).

Poté byly zkoušeny trámečky na pevnost v tahu za ohybu ve stáří 28 dní.



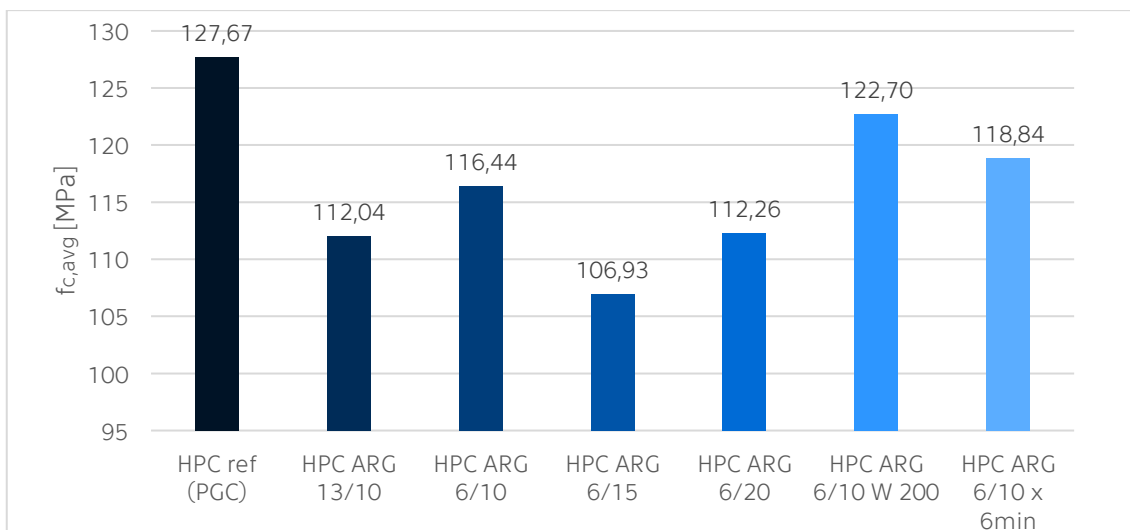
Obr. 5.6: Graf závislosti síly na posunu, průběh křivek typického vzorku

Tato zkouška byla mnohem důležitější, protože, jak již bylo řečeno výše, vlákna se do betonu nepřidávají primárně za účelem zvýšení pevnosti, ale za účelem zvýšení duktility. V našem případě se tato vlákna přidávala ještě z jednoho důvodu – jelikož se beton během hydratace smršťuje a prostor mezi plexiskly, u kterých ke smrštění nedochází, je velmi úzký (10 mm), dá se předpokládat, že v tomto místě bude docházet k popraskání betonu. Vlákna by tomuto měla částečně zabránit.

Když se opět podíváme do Tab. 5.2 výše, vidíme, že přidáním vláken téměř nedošlo k poklesu pevnosti v tahu za ohybu, v případě obsahu 10 kg/m³ je viditelný mírný nárůst pevnosti (17,24 MPa na 18,76 MPa). Důležitější než tato pevnost je ale průběh grafu závislosti síly na posunu. Vlákna totiž mají primárně za úkol zvýšit duktilitu, tedy ve chvíli vzniku trhlin mají tyto trhliny překlenout a roznést zatížení, prvek by tak po vzniku první trhliny neměl zcela ztratit únosnost.

Jak je ale vidět na grafu (Obr. 5.6), u všech vzorků došlo ke ztrátě únosnosti okamžitě po vzniku trhlin po maximálním zatížení, stejně jako u referenčního vzorku bez vláken. To je pravděpodobně dáno jejich malou délkou a velmi nízkou koncentrací. Ani jeden z aspektů ale bohužel nemůže být výrazně upraven, neboť by pak vlákna nemohla být rovnoměrně rozprostřena v celé ploše vzorku mezi plexiskly. U všech vzorků můžeme ale vidět, že s obsahem vláken došlo k mírnému protažení křivky a ke kolapsu došlo při podobném zatížení, ale při větším posunu. Nejvýrazněji je toto vidět na vzorcích s obsahem 15 kg/m³ a 10 kg/m³ skleněných vláken. Po zvýšení vodního součinitele je naopak průběh křivky téměř stejný jako průběh křivky nevyztuženého betonu.

Nakonec byla na úlomcích trámečků provedena zkouška v tlaku.



Obr. 5.7: Průměrné hodnoty pevností v tlaku zkoušené na úlomcích trámečků

Na Obr. 5.7 výše vidíme, že dosažené tlakové pevnosti mají obdobný charakter jako pevnosti dosažené na krychlích (viz Obr. 5.5). Opět tedy nejvyšších pevností nabývají vzorky, kde byla doba míchání delší a vlákna se tak mohla rovnoměrněji rozptýlit, tentokrát společně se vzorky, kde byl zvýšen obsah záměsové vody.



Obr. 5.8: Zkoušení a porušení zkušebních těles

Po zvážení všech výše uvedených aspektů byl nakonec pro další zkoušení zvolen obsah vláken 10 kg/m^3 délky 6 mm s vyšším obsahem záměsové vody, především s přihlédnutím ke zpracovatelnosti, která byla nejlepší (rozlití kužele 190 mm), přestože nedosahoval nejlepších výsledků při zkoušce v tahu za ohybu.

Podrobné číselné výsledky v tabulkách jsou prezentovány v přílohách diplomové práce (Příloha 2, 4, 6).

5.1.3. Průběh experimentu a vyhodnocení – PP vlákna

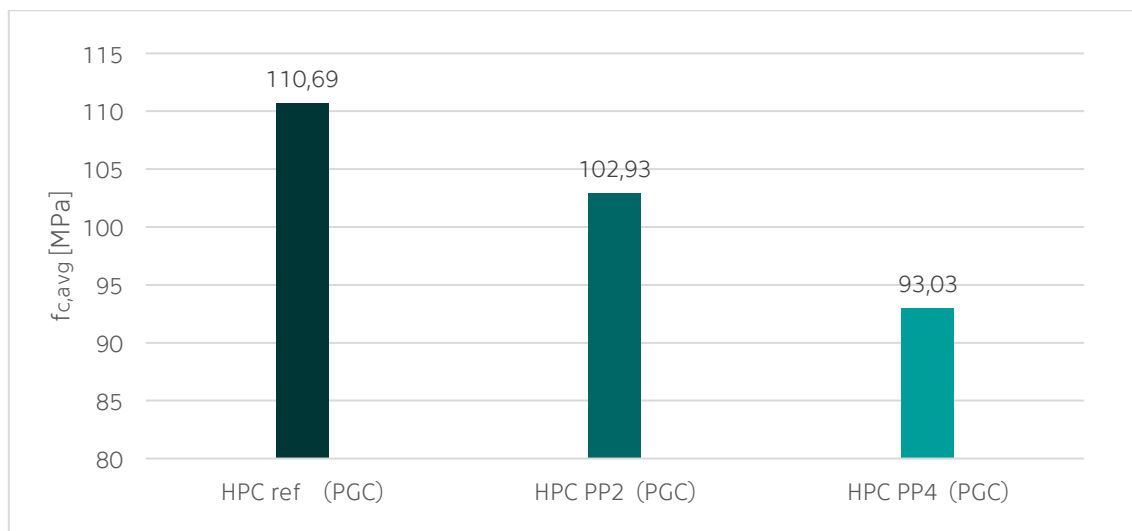
Stejně jako v případě skleněných vláken, i zde byla při výrobě nejprve provedena zkouška rozlití kužele. Vzhledem k tomu, jak razantní byl pokles zpracovatelnosti se zvyšujícím se obsahem vláken (150 mm při obsahu 2 kg/m³ vláken, 100 mm při obsahu 4 kg/m³), bylo rozhodnuto, že vyšší koncentraci PP vláken nemá smysl zkoušet, jelikož by výroba průsvitného betonu byla nemožná. Už zde ovšem můžeme říct, že i obsah 4 kg/m³ PP vláken není vzhledem ke zpracovatelnosti možné použít dále v kombinaci s plexiskly, aniž by bylo nutné výrazně zvýšit dávku vody anebo plastifikátoru.

Hodnoty měření zkoušky rozlití kužele, tlakové pevnosti měřené na krychlích a na úlomcích trámečků a pevnosti v tahu za ohybu měřené na trámečcích jsou uvedeny v Tab. 5.3.

Tab. 5.3: Průměrné výsledky vzorků s obsahem PP vláken v porovnání s referenční sadou

Vzorek	Rozlití kužele [mm]	Krychle $f_{c,avg}$ [MPa]	Trámečky tah $f_{cf,avg}$ [MPa]	Trámečky tlak $f_{c,avg}$ [MPa]
ref	300	110,69	17,24	127,67
PP2	150	102,93	17,65	121,75
PP4	100	93,03	16,60	116,19

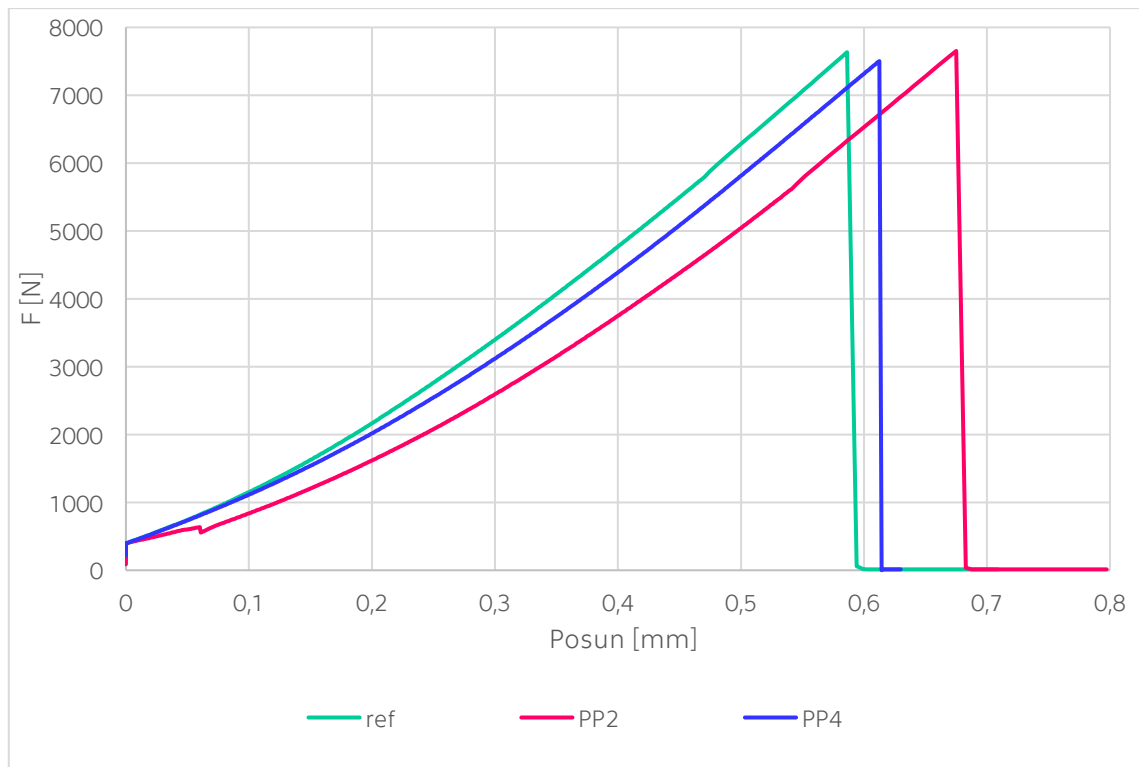
Jako první opět proběhla zkouška v tlaku na krychlích ve stáří 28 dní.



Obr. 5.9: Průměrné hodnoty pevností v tlaku zkušeny na krychlích

Opět je na Obr. 5.9 vidět mírný pokles pevnosti v tlaku obou vzorků v porovnání s prostým betonem (110,7 MPa), pevnost dosahuje nejnižších hodnot při obsahu 4 kg/m³ vláken (93,03 MPa). Za poklesem tlakové pevnosti vzorků oproti běžnému betonu je pravděpodobně stejný důvod jako u skleněných vláken, tedy že vlákna částečně obklopí zrna cementu a brání tak jeho hydrataci.

Následně byly vzorky zkušeny na pevnost v tahu za ohybu, taktéž ve stáří 28 dní.



Obr. 5.10: Graf závislosti síly na posunu, průběh křivek typického vzorku

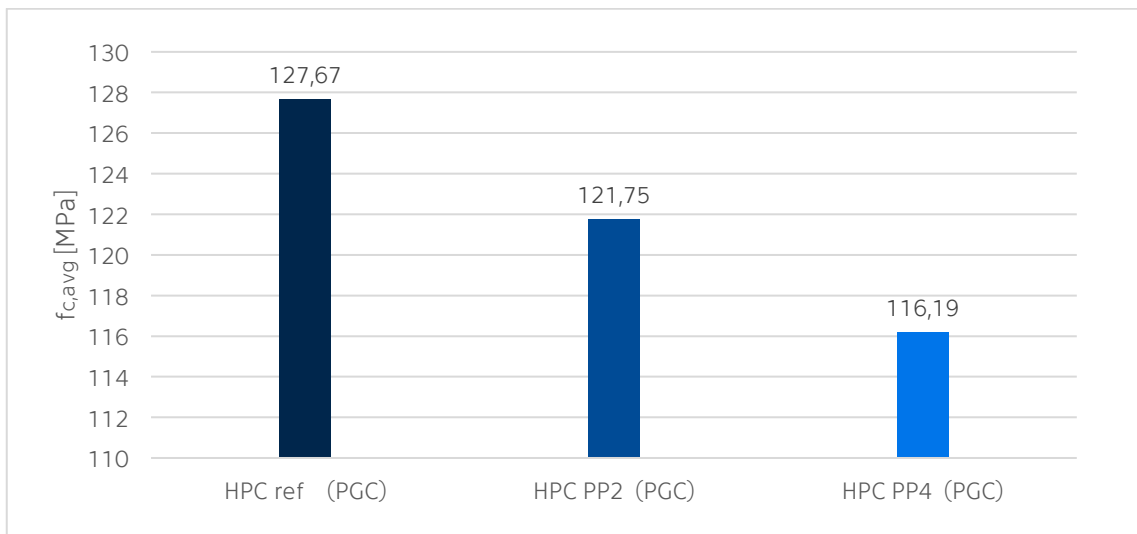
Z Tab. 5.3 výše je vidět, stejně jako v případě skleněných vláken, že pevnost v tahu za ohybu, na rozdíl od tlakové pevnosti, se přidáním vláken téměř nesnižuje, při obsahu 2 kg/m^3 je hodnota pevnosti dokonce vyšší ($17,24 \text{ MPa}$ na $17,65 \text{ MPa}$).

Při pohledu na graf závislosti síly na posunu (Obr. 5.10) vidíme, že chování PP vláken je opět téměř stejné jako chování skleněných vláken – k porušení vzorků došlo ihned po vzniku trhlin po maximálním zatížení. Důvod je obdobný jako v případě skleněných vláken – vlákna jsou krátká a jejich koncentrace je velmi malá, takže nemohou překlenout trhliny a roznést zatížení dostatečně. Je ale nutné připomenout, že tato vlákna jsou výrobcem zamýšlena primárně pro snížení smršťování a velký přínos z hlediska pevnostního chování prvků se od nich ani neočekává. U obou vzorků také došlo v porovnání s referenční sadou z prostého betonu k mírnému protažení křivky a ke kolapsu došlo při podobném zatížení, ale při větším posunu. U vzorků s obsahem 2 kg/m^3 PP vláken je toto protažení výraznější, naopak vzorek s obsahem 4 kg/m^3 PP vláken se chová téměř jako prostý beton bez vláken.



Obr. 5.11: Způsob porušení trámečků po zkoušce tříbodovým ohybem (skleněná i PP vlákna)

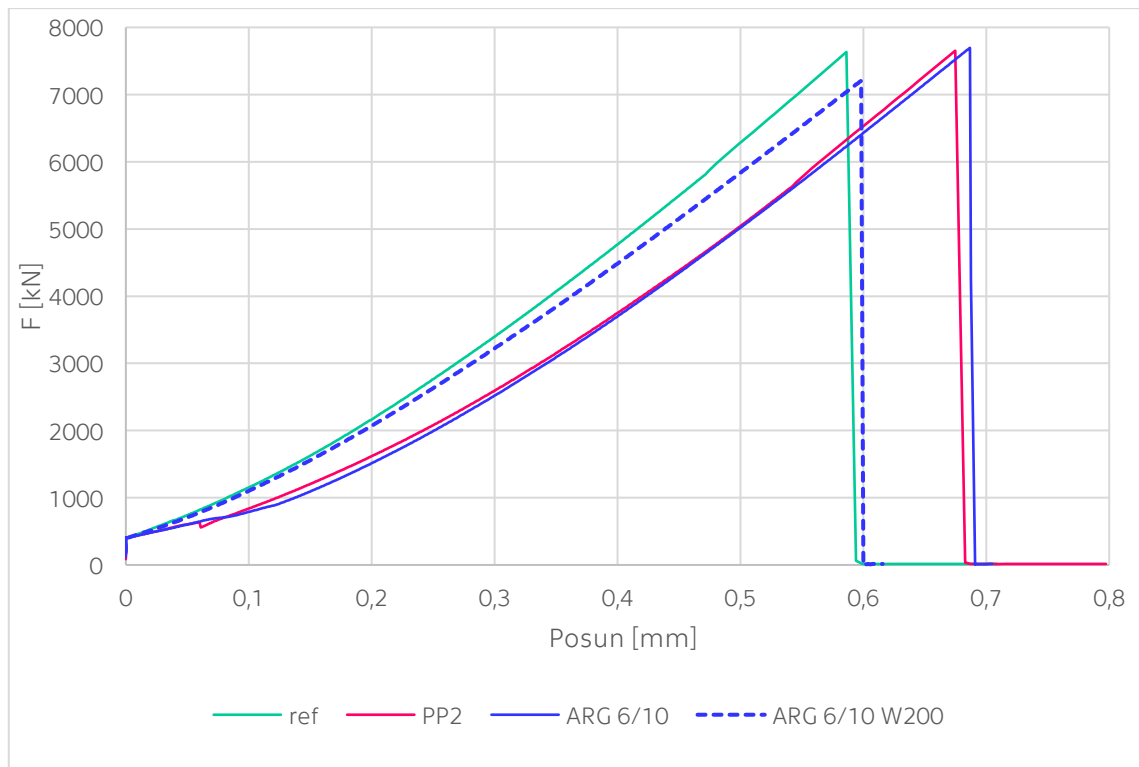
Nakonec byla opět provedena zkouška v tlaku na úlomcích trámečků.



Obr. 5.12: Průměrné hodnoty pevností v tlaku zkoušené na trámečcích

Dosažené pevnosti mají stejný charakter jak při zkoušení na krychlích (Obr. 5.9), tak na úlomcích trámečků (Obr. 5.12) – tedy že se zvyšujícím se množstvím se dosažené tlakové pevnosti snižují.

Na výsledcích je vidět, že zvýšení obsahu PP vláken nepřináší zlepšení mechanických vlastností, proto bylo zvoleno množství vláken 2 kg/m^3 . S přihlédnutím k velmi nízkému rozlité kužele (150 mm) bylo množství záměsové vody pro následující zkoušení zvýšeno ze 190 kg/m^3 na 200 kg/m^3 .



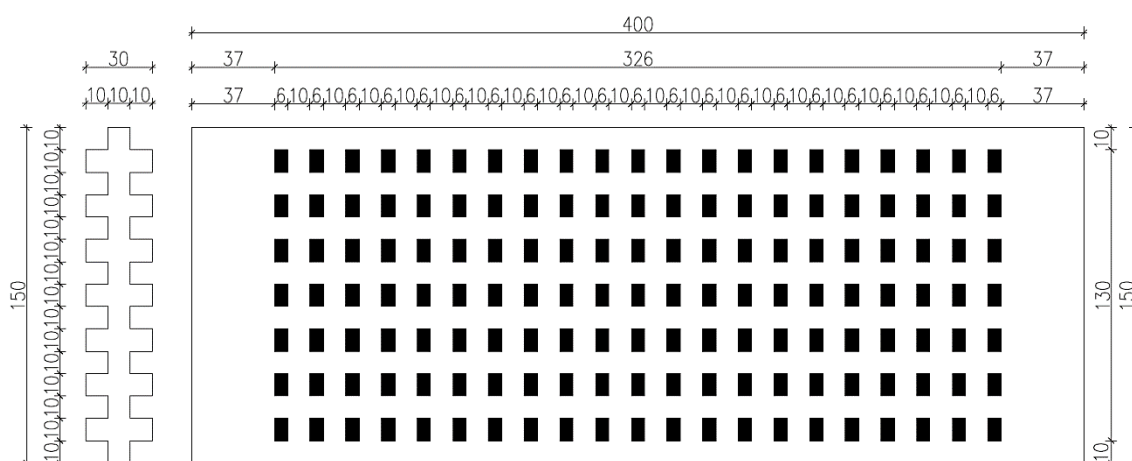
Obr. 5.13: Graf závislosti síly na posunu, průběh křivek typického vzorku – porovnání vybraných skleněných vláken a PP vláken

V neposlední řadě je také důležité vzájemné porovnání vybraných koncentrací vláken pro další zkoušení, tedy PP2 (2 kg/m^3) a ARG 6/10 W200 (10 kg/m^3 délky 6 mm, obsah vody 200 kg/m^3). Z grafu výše (Obr. 5.13) vidíme, že vzorky s vybranými PP vlákny se ve srovnání s vybranými skleněnými vlákny (pro přímé porovnání byl srovnáván vzorek se stejným obsahem vody, tedy 190 kg/m^3 – ARG 6/10) chovají téměř stejně – PP vlákna dosahují pouze nepatrně nižší pevnosti v tahu za ohybu a k jejich porušení dochází téměř ve stejnou chvíli.

Podrobné číselné výsledky v tabulkách jsou opět uvedeny v přílohách diplomové práce (Příloha 1, 3, 5).

5.2. Subtilní průsvitný vláknobeton

V druhé části experimentu byly vyráběny průsvitné vzorky s pomocí plexiskel. Vzhledem k ceně plexiskel (cca 760 Kč/panel bez DPH, kde v každém panelu se nachází 21 sklíček) byly nakonec z každé sady vyrobeny pouze 2 vzorky namísto obvyklých 3, aby bylo zachováno ověření různých druhů výztuží. Vyrobeny byly 2 sady s použitím vláken, celkem tedy 4 vzorky o rozměrech 30 x 150 x 400 mm s 21 plexiskly v každém vzorku. Tvar a rozměry vzorků vycházely z předpokládané tloušťky panelu a ze vzdálenosti a rozměrů podpor zkušebního lisu (tak, aby se plexiskla nacházela mezi podporami, ale téměř ne za nimi a jejich potřebné množství tak mohlo být minimalizováno). Rozteče a tvar plexiskel byly předem dány tak, aby bylo dosaženo výrazné průsvitnosti panelu (nákres panelu viz Obr. 5.14).



Obr. 5.14: Nákres průsvitného panelu s plexiskly

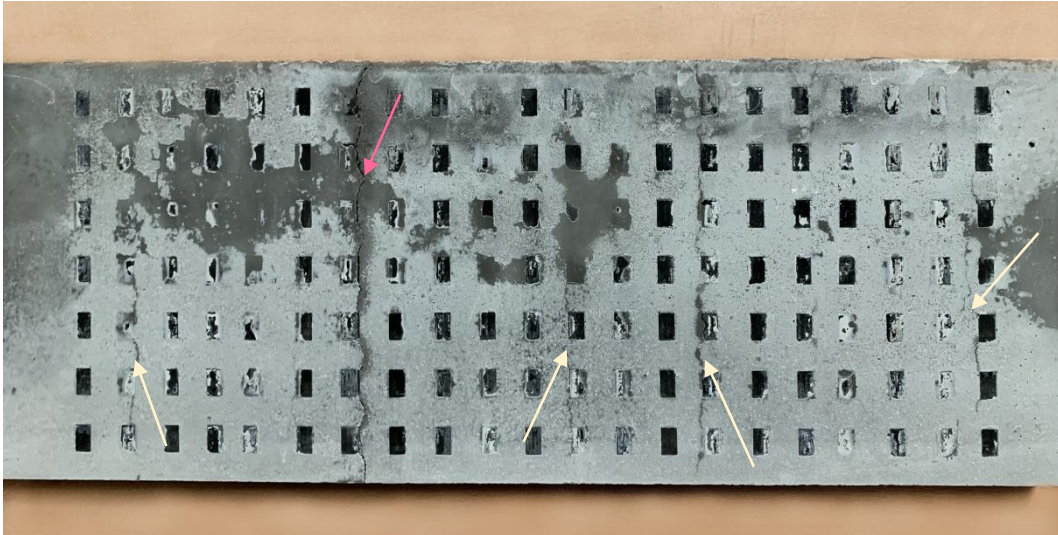
5.2.1. Postup výroby

Výroba byla rozdělena do několika dnů – nejprve byla vyrobena sada s obsahem 2 kg/m³ PP vláken, kde byl kvůli zpracovatelnosti zvýšen obsah vody na 200 kg/m³ (PP2 W200, 2 vzorky), a sada s obsahem 10 kg/m³ skleněných vláken délky 6 mm s obsahem vody 200 kg/m³ (ARG 6/10 W200, 2 vzorky). Zbylé části receptury jsou stejné jako při optimalizaci množství vláken (viz Tab. 5.1 výše).

PP2 W200 2 kg/m³ PP vlákna, obsah vody 200 kg/m³

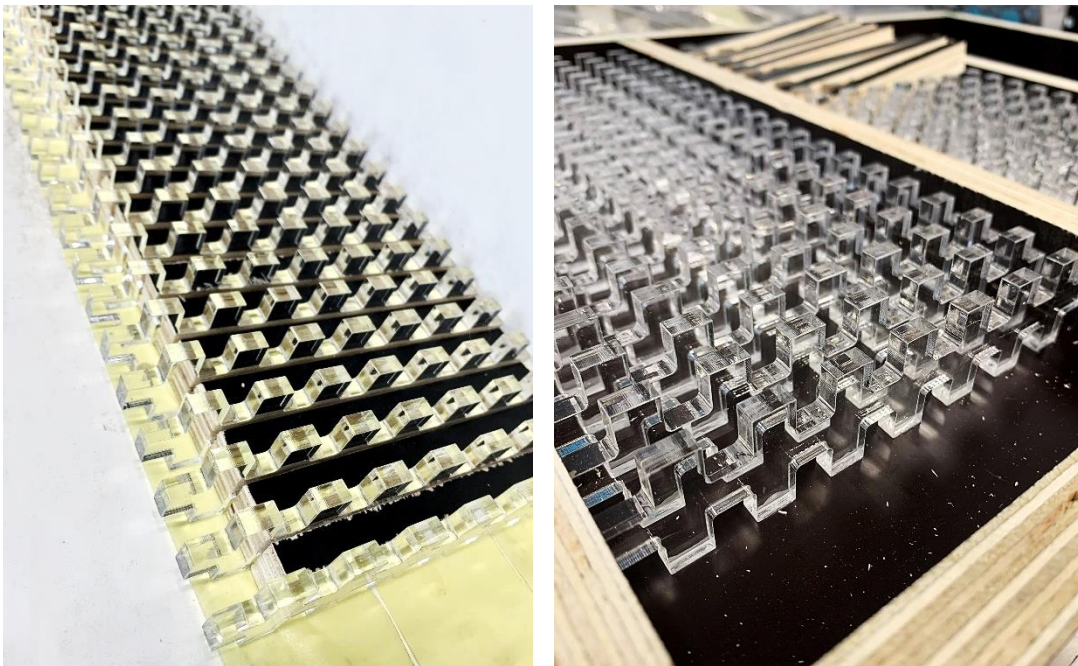
ARG 6/10 W200 10 kg/m³ skleněná vlákna délky 6 mm, obsah vody 200 kg/m³

Původně byla zamýšlena výroba třetí, referenční sady vzorků bez vláken, při odbednění sady s PP vlákny ale došlo k poměrně snadnému zlomení jednoho ze vzorků, což bylo téměř jistě způsobeno tím, že se beton mezi plexiskly smršťil natolik, že vznikly průběžné mikrotrhliny, které probíhaly v oslabeném průřezu betonu, čili podél plexiskel. Došli jsme tedy k závěru, že vyrábět vzorek bez vláken by nemělo smysl ani pro porovnání, protože by neobsahoval nic (PP či skleněná vlákna), co by tyto trhliny překlenulo a zlomil by se tak možná ještě dříve, než by mohla být provedena zkouška. Zlomený vzorek s PP vlákny byl ale uchován a po 28 dnech po vyndání z vody bylo během vysychání vzorku vidět hned několik těchto mikrotrhlin (viz Obr. 5.15), které jsou po vyschnutí vzorku nepozorovatelné. Již v této fázi je tedy jednoznačně nutná přítomnost výztuže v průsvitném panelu.



Obr. 5.15: Průběžné trhliny na vzorku PP2 W200

Aby byla dodržena vzájemná vzdálenost sklíčků 10 mm, byla sklíčka přilepena k formě lepidlem (Mapefloor finish 52w) a mezi ně byla vkládána dřívka, která se po zaschnutí lepidla odstranila. Sklíčka s dřívky byla nejprve připravena mimo formu (aby se dala jejich poloha upravit) a až po zkompletování byla vložena do formy, na jejíž povrch bylo nanесeno lepidlo. Poté byla sklíčka zatížena, aby nedošlo k jejich uvolnění a vyplavání na povrch, a forma byla vybetonována.



Obr. 5.16: Výroba vzorků průsvitného vláknobetonu – Vlevo příprava plexiskel s dřívky, vpravo přilepená sklíčka k formě a odstraňování dřivek

5.2.2. Průběh experimentu a vyhodnocení

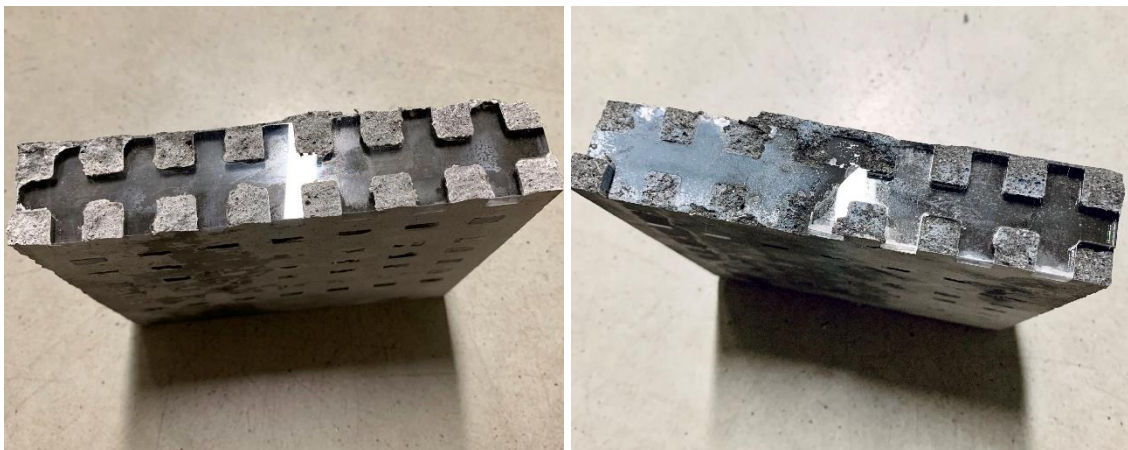
Během výroby byla opět nejprve provedena zkouška rozlití kužele. Skleněná i PP vlákna s vyšším obsahem vody již dosahovala poměrně slušné zpracovatelnosti (rozlití kužele 230 a 180 mm), přesto beton zejména v případě PP vláken vyplňoval úzký prostor mezi plexiskly poměrně stěží.

Tab. 5.4: Souhrnné výsledky vzorků průsvitného vláknobetonu

Vzorek	Rozlití kužele [mm]	a [mm]	b [mm]	v [mm]	V [m ³]	m [kg]	ρ [kg/m ³]	F [kN]	f _{cf} [MPa]	f _{cf,avg} [MPa]
ARG 6/10 W200_1	230	150	400	32,2	0,001932	4,0792	2111	1,38	2,66	2,14
ARG 6/10 W200_2		150	400	31,4	0,001884	3,9720	2108	0,79	1,61	
PP2 W200_1	180	150	400	31,3	0,001878	3,9492	2103	0,67	1,38	1,38
PP2 W200_2		150	400	31,4	0,001884	3,9066	2074	-	-	

Vzorky byly zkoušeny ve stáří 28 dnů zkouškou v tahu za ohybu (čtyřbodovým ohybem), rychlost zatěžování byla stanovena dle posunu, který byl nastaven na 1 mm/min, zatěžovací válečky byly ve vzdálenosti 100 mm.

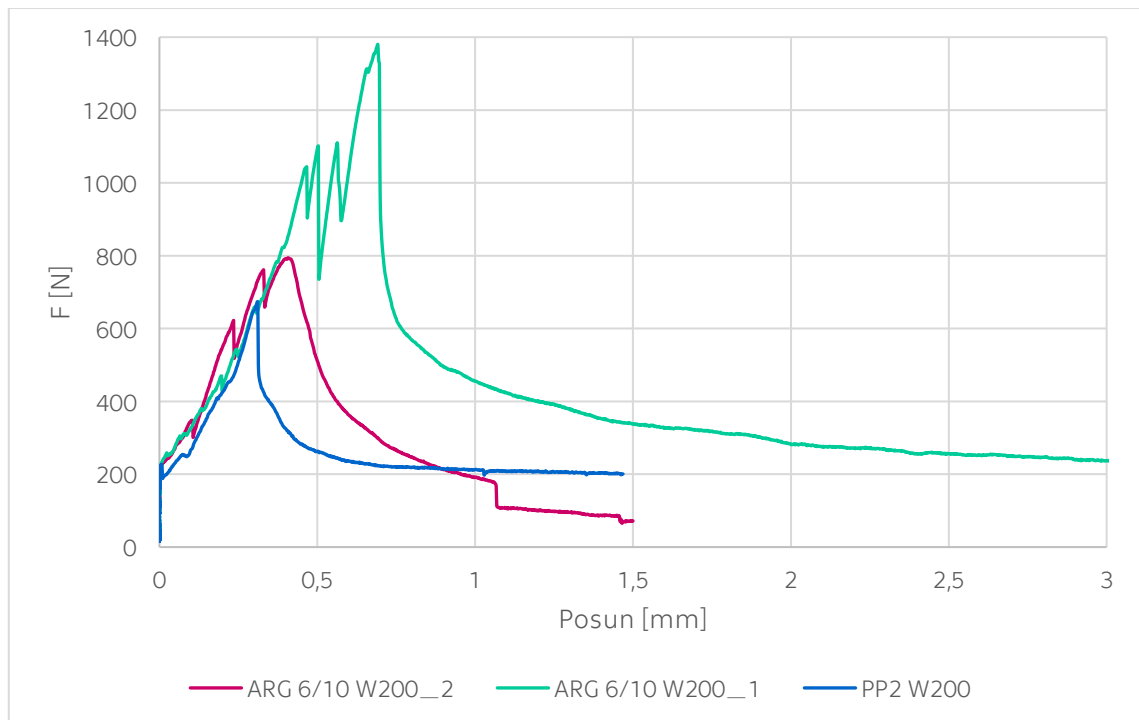
Z Tab. 5.4 vidíme, že skleněná vlákna opět dosahují vyšších pevností v tahu ohybem než PP vlákna. U skleněných vláken je vidět poměrně velký rozdíl v dosažených pevnostech u 1. a 2. vzorku (2,66 a 1,61 MPa). Není to ale bráno jako chyba, jelikož při pohledu na vzorky po zkoušce došlo u vzorku ARG 6/10 W200_1 k trhlině skrz plexisklo, zatímco u vzorku ARG 6/10 W200_2 podél plexiskla (viz Obr. 5.17). Síla potřebná k porušení vzorku podél plexiskla byla nižší, nejslabším místem vzorku je tedy rozhraní mezi betonem a plexisklem. Oba typy porušení se ale dají u takového panelu očekávat a nelze s jistotou říci, ke kterému dojde (i když druhý způsob porušení, tedy podél plexiskel, je pravděpodobnější a během zkoušení se vyskytoval nejčastěji). U vzorku s PP vlákny došlo k porušení podél plexiskla, ve srovnání se vzorkem ARG 6/10 W200_2, u kterého došlo ke stejnému porušení, je ale únosnost PP vláken stále nižší (1,61 MPa skleněná vlákna a 1,38 MPa PP vlákna).



Obr. 5.17: Porušení vzorků – Nalevo porušení podél plexiskla, napravo skrz plexisklo

Důležitější je ale opět pohled na graf závislosti síly na posunu (Obr. 5.18). Vidíme, že na rozdíl od vzorků bez plexiskel z kapitoly 5.1 Optimalizace množství výztuže (Obr. 5.6, Obr. 5.10 a Obr. 5.13) zde nedochází po vzniku trhlin ihned ke ztrátě únosnosti, respektive ke kolapsu vzorku po iniciaci první trhliny. Na druhou stranu dosahuje ale takovýto kompozitní materiál mnohem nižší pevnosti v tahu za ohybu, jelikož vložením plexiskla s hladkým povrchem vytvoříme v betonu nejslabší místo (tedy

opak toho, čeho se snažíme dosáhnout ve vysokohodnotných betonech – eliminovat výrazně nejslabší místa snížením obsahu vody a tedy i pórovitosti). Na grafu je jasně vidět, že vzorek s PP vlákny dosahuje jednoznačně nejnižší únosnosti, vliv na chování při namáhání prvku tahem za ohybu tak bude mít druh vláken, přestože při optimalizaci množství výztuže na zkušebních trámečcích se jejich vliv neprojevil a jak PP vlákna, tak skleněná vlákna se chovala téměř stejně. To může být dáno tím, že pevnost betonu s plexiskly je nižší a vlákna při vzniku první trhliny musí překlenout menší zatížení, vliv ale mohou mít jistě také již přítomné mikrotrhliny podél plexiskel od smršťování vzorku. Vliv vláken se tedy výrazněji projevil až v kombinaci s plexiskly, která samotná mají ale na únosnost zásadnější vliv – jak již bylo řečeno, díky téměř nulovému spolupůsobení s betonem výrazně snižují únosnost prvků, dále ale vidíme, že v případě, kdy trhlina vedla přímo skrz plexisklo, se únosnost vzorku zvýšila oproti situaci, kdy vedla trhlina podél plexiskla. V případě vláknobetonu vznikla u všech vzorků pouze 1 trhlina, která se rozvíjela z rohu některého z plexiskel (vlivem změny směru napětí v okolí plexiskel).

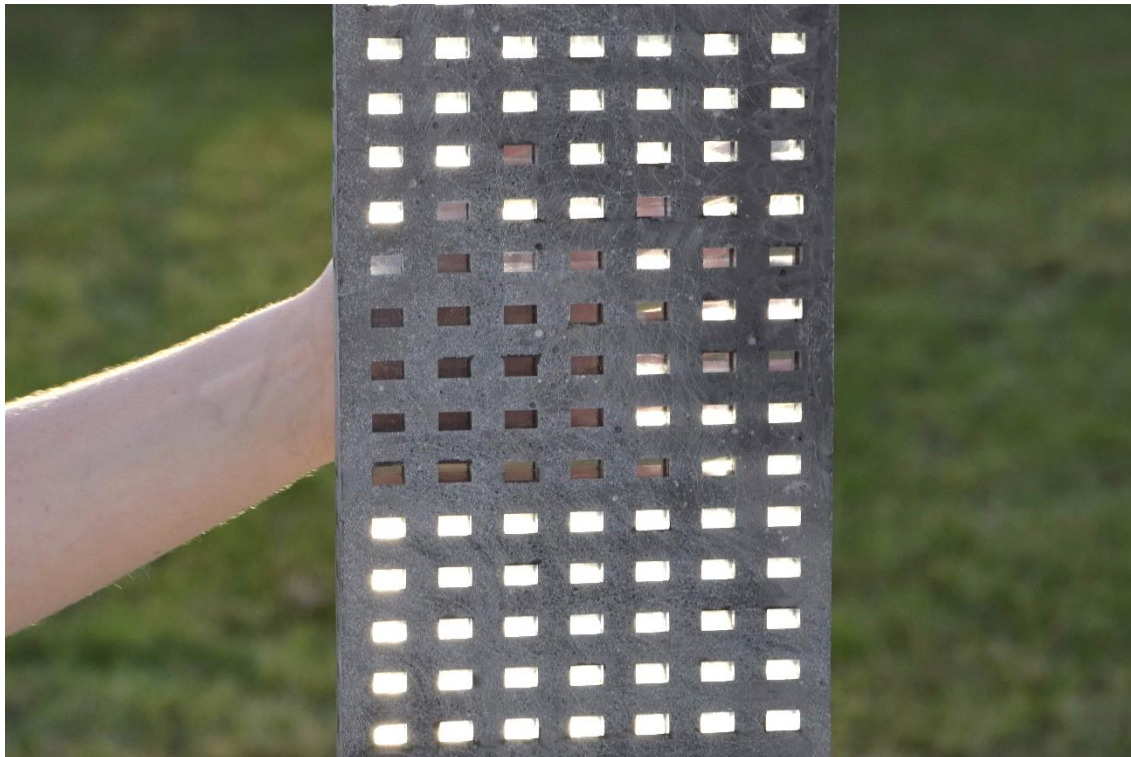


Obr. 5.18: Graf závislosti síly na posunu, průběh křivek všech 3 vzorků

Maximální síla dosažená při zatížení je tedy v případě všech vzorků mnohonásobně nižší než v případě vzorků bez plexiskel, což je zapříčiněno tím, že plexiskla mají v betonu velkou plochu průřezu a zároveň jsou na povrchu velmi hladká a beton tak s nimi téměř vůbec nespolečupůsobí. Rozhraní mezi plexiskly a betonem se pak stává výrazně nejslabším místem panelů a k porušení prvků dochází právě zde. Ani jedna vlákna nedosahují takové únosnosti a chování, aby je bylo možné bezpečně použít jako panel při těchto rozměrech (například pro porovnání lokální vodorovné zatížení je dle normy ČSN EN 1991-1-1 [44] v charakteristické hodnotě 0,5 kN, respektive 1 kN, zároveň se ale tyto hodnoty také nebezpečně blíží hodnotám zatížení, při kterých došlo během zkoušení ke kolapsu vzorků) a proto není jejich použití bez další optimalizace vláken, spolupůsobení s plexiskly či současného použití jiné výztuže (například uhlíkových či jiných rovingů) na subtilní deskové prvky možné.

5.3. Subtilní průsvitný beton s kompozitní výztuží

Jako druhý způsob vyztužení byl zvolen beton s kompozitní výztuží z uhlíkových (a nakonec také skleněných a lněných) rovingů. Vyráběny byly opět panely o rozměrech 30 x 150 x 400 mm s 21 plexiskly v každém vzorku.



Obr. 5.19: Výsledná podoba panelu s uhlíkovými rovingy

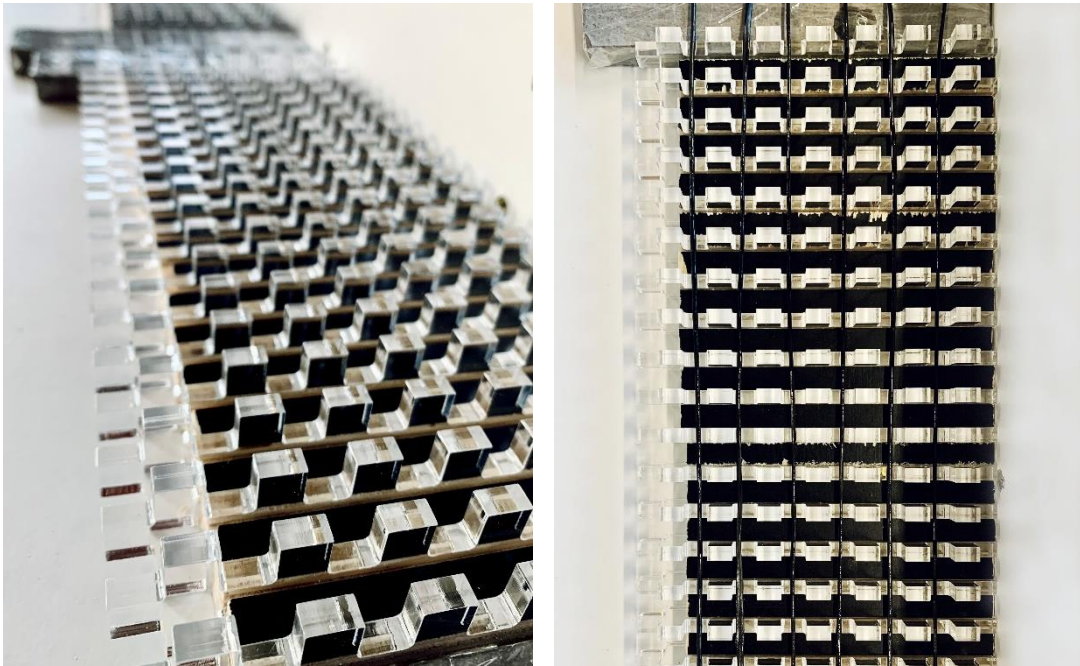
5.3.1. Postup výroby

Vyrobena byla sada průsvitných vzorků s uhlíkovými rovingy (U R, 2 vzorky) a sada s uhlíkovými rovingy bez plexiskel (U R ref, 2 vzorky) pro porovnání jejich vlivu, opět vzhledem k ceně plexiskel pouze 2 vzorky namísto 3. Vzhledem k tomu, že bylo nakonec od výroby průsvitných vzorků s prostým betonem ustoupeno, byly pro srovnání vyrobeny ještě 2 vzorky – jeden se skleněnými rovingy (ARG R, 1 vzorek) a druhý s rovingy ze lnu (L R, 1 vzorek). Nakonec bylo tedy vyrobeno celkem 6 vzorků – 4 s plexiskly, 2 bez nich.

U R	uhlíkové rovingy (Tenax STS40 F13 24K 1600tex) + plexiskla
U R ref	uhlíkové rovingy (Tenax STS40 F13 24K 1600tex)
L R	lněné rovingy (lněné potravinářské motouzy) + plexiskla
ARG R	skleněné rovingy (Cem-FIL® 5325) + plexiskla

Výroba průsvitných vzorků s rovingy (některé kroky výroby jsou demonstrovány na Obr. 5.20) se poměrně lišila od výroby vzorků s vlákny. Mezi plexiskla byla opět vkládána dřívka, aby mezi nimi byla dodržena požadovaná vzdálenost 10 mm, načež se takto připravená sklíčka s dřívky zajistila betonovými destičkami, aby držela svou polohu. Poté se uhlíková výztuž naimpregnovala epoxidovou pryskyřicí, umístila se do prostoru žeber plexiskel, posypala se jemnozrnným křemičitým

pískem a nechala se 24 hodin tvrdnout. Zatvrdlá pryskyřice již držela sklíčka v jejich poloze, dřívka mohla být tedy odstraněna a plexiskla byla otočena. Nakonec se znovu připravila uhlíková výztuž s epoxidovou pryskyřicí, výztuž byla položena na druhou stranu žeber, posypána pískem a opět se pryskyřice nechala 24 hodin tvrdnout. Plexiskla s výztuží byla umístěna do formy, opět zatížena, aby nedošlo k jejich vyplavání na povrch, a forma byla vybetonována. Receptura betonové směsi odpovídala receptuře při optimalizaci množství vláken (viz Tab. 5.1 výše, receptura pro vzorek ref).

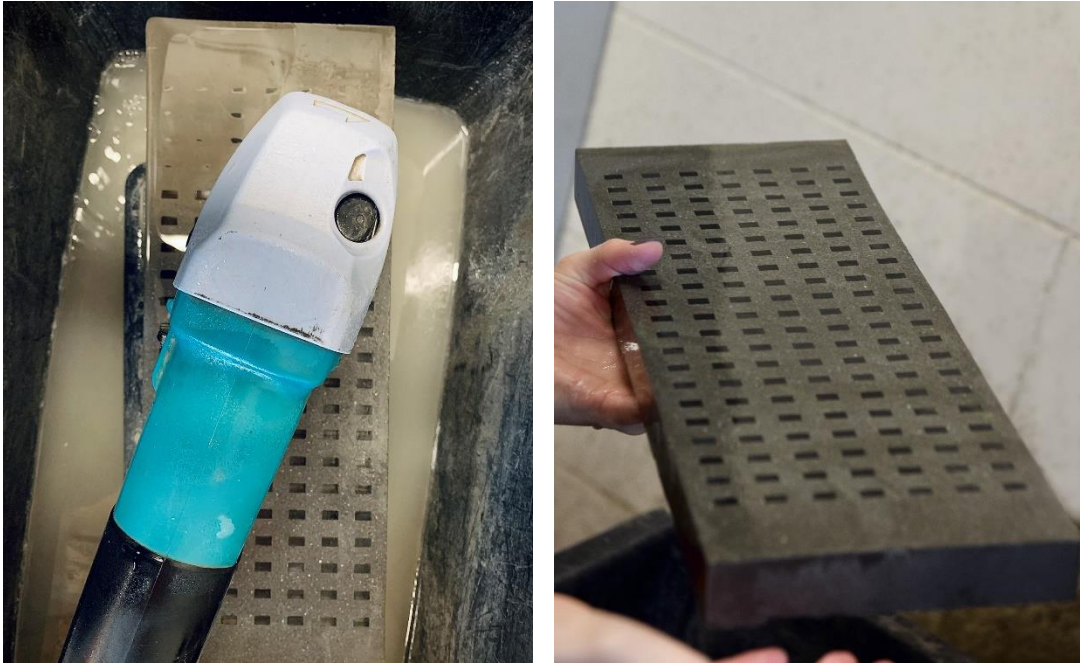


Obr. 5.20: Výroba vzorků průsvitného textilního betonu

Společně s touto sadou byla dále vyrobena sada s uhlíkovými rovingy bez plexiskel. Abychom se co nejvíce přiblížili poloze výztuže ve vzorcích s plexiskly, byly použity polystyrenové destičky, na kterých se vyznačila poloha výztuže. Výztuž byla zatlačena do těchto destiček, které pak držely její polohu odpovídající poloze výztuže ve vzorcích s plexiskly. Použity byly uhlíkové rovingy, které byly již naimpregnovány epoxidovou pryskyřicí a opatřeny jemnozrnným křemičitým pískem. Polystyrenové destičky byly přivrtány k formě, tím došlo k jejich stabilizaci a přitížení, aby nedošlo k uvolnění výztuže a prověšení uprostřed vzorku během betonáže vlivem tíhy čerstvého betonu.

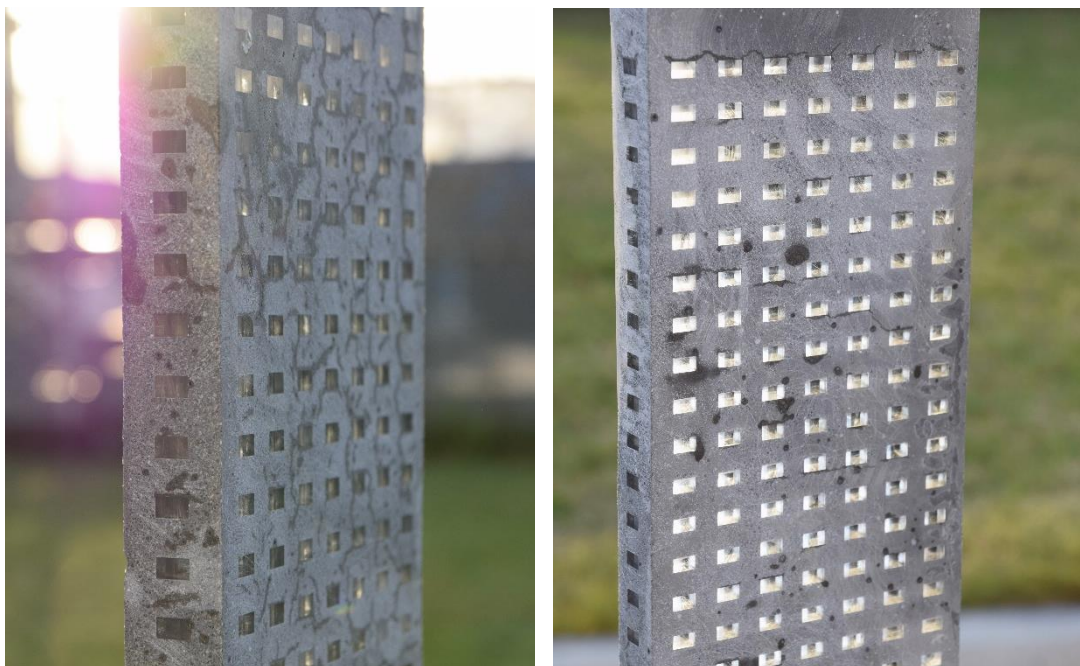
Nakonec byly, obdobným způsobem jako vzorky s uhlíkovými rovingy, vyrobeny vzorky s lněnými a skleněnými rovingy.

Vzorky byly po odbednění ponořeny do vody, po 7 dnech byly vzorky s uhlíkovými vlákny vyndány a jejich povrch byl broušen a vyleštěn tak, aby došlo k očištění plexiskel od betonu na jejich povrchu a maximalizovala se tak průsvitnost prvku (po 7 dnech je beton poměrně pevný a nehrozí jeho poškození, ale ještě nedosahuje finálních pevností a jeho broušení je snazší) (Obr. 5.21). Bruska musela být chlazená vodou, aby nedošlo k poničení povrchu plexiskel vlivem vysoké teploty při broušení. Poté byly vzorky opět umístěny do vody, kde byly uchovávány společně s ostatními vzorky až do dne zkoušení.



Obr. 5.21: Úprava povrchu vzorků textilního betonu s uhlíkovými vlákny

Během vysychání vzorků byly opět vidět mikrotrhliny, které ale, na rozdíl od mikrotrhlin u průsvitných vzorků z vláknobetonu, nebyly průběžné podél vzorku (Obr. 5.22). Po zaschnutí tyto trhliny viditelné nebyly a na finální podobu panelu ani funkci tak vliv neměly.



Obr. 5.22: Panel v průběhu vysychání

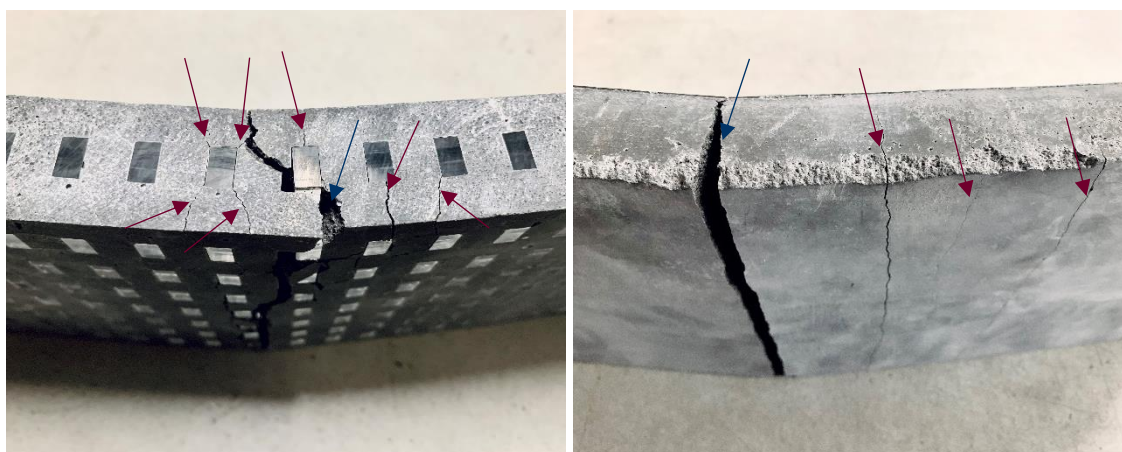
5.3.2. Průběh experimentu a vyhodnocení

Vzorky byly opět zkoušeny ve stáří 28 dnů v tahu za ohybu (čtyřbodovým ohybem), rychlost zatěžování se řídila dle posunu nastaveným na 1 mm/min, zatěžovací válečky byly umístěny ve vzdálenosti 100 mm.

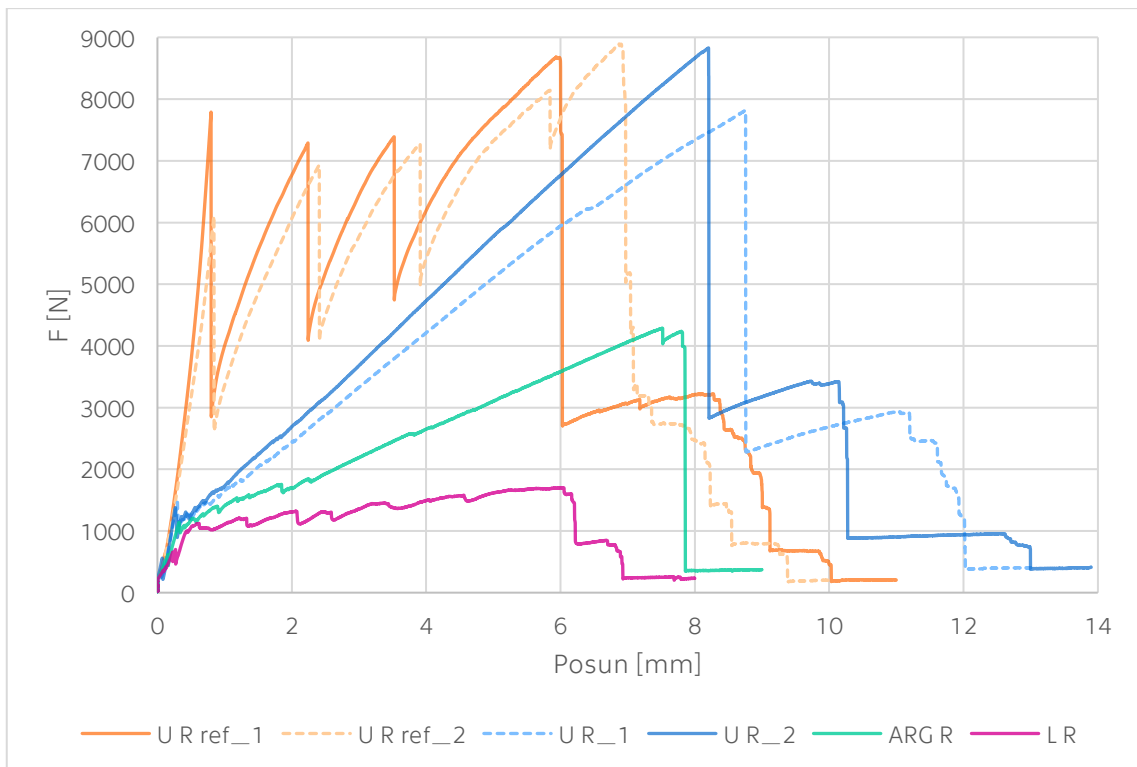
Tab. 5.5: Souhrnné výsledky vzorků průsvitného textilního betonu

Vzorek	Rozlití kužele [mm]	a [mm]	b [mm]	v [mm]	V [m ³]	m [kg]	ρ [kg/m ³]	F [kN]	f _{cf} [MPa]	f _{cf,avg} [MPa]
U R ref_1	300	150	400	30,8	0,001848	4,0146	2172	8,68	18,31	18,00
U R ref_2		150	400	31,7	0,001902	4,1162	2164	8,90	17,70	
U R_1	300	150	400	29,3	0,001758	3,6652	2085	7,82	18,22	18,79
U R_2		150	400	30,2	0,001812	3,8256	2111	8,83	19,36	
ARG R	300	150	400	31,9	0,001914	4,0016	2104	4,29	8,42	8,42
LR	300	150	400	31,9	0,001914	4,0274	2091	1,70	3,35	3,35

V Tab. 5.5 vidíme, že nejvyšších průměrných pevností v tahu za ohybu dosahují dle očekávání vzorky průsvitného betonu s uhlíkovými rovingy, a to i v porovnání se vzorky s uhlíkovými rovingy bez plexiskel (18,0 a 18,8 MPa). Zde se tedy na rozdíl od průsvitného vláknobetonu objevuje opačný efekt plexiskel – pevnost betonu se s jejich obsahem naopak mírně zvýšila. K vysvětlení tohoto efektu je zapotřebí podívat se na graf závislosti síly na posunu (viz Obr. 5.24). Na tomto grafu vidíme, že když byly zatěžovány vzorky s plexiskly, vzniklo kolem plexiskel poměrně rychle více trhlin (v případě vzorku U R_2 při zatížení 1379 N). Uhlíková výztuž tak musela téměř od začátku přenášet určitou část zatížení, na druhou stranu byl ale díky tomu nárůst zatížení, která tato výztuž musela přenášet, pozvolnějši. Naopak v případě vzorků bez plexiskel byl nárůst zatížení do vzniku první trhliny poměrně výrazný (v případě vzorku U R ref_1 působilo do vzniku první trhliny zatížení 7790 N, což je téměř 90 % maximální síly, která na vzorek působila) a ve chvíli vzniku a rozvoje trhlin na výztuž začala působit velká síla během velmi krátkého času. Na takto náhlý nárůst zatížení se pak výztuž hůře adaptuje a dojde rychleji k jejímu přetržení. Množství a velikost trhlin je možné vidět také na Obr. 5.23 níže. Vzorky s plexiskly tak dosahují nejenom vyšších tahových pevností, ale také k jejich kolapsu dochází až při větší deformaci.



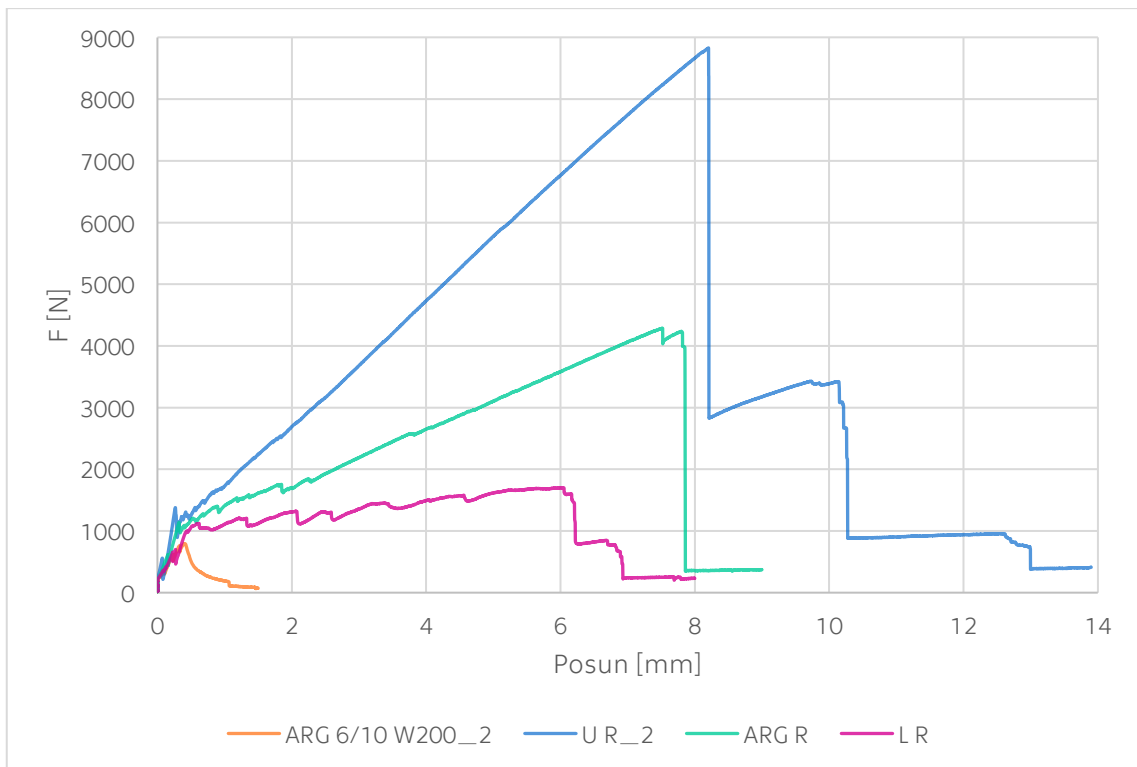
Obr. 5.23: Vzniklé trhliny na vzorcích s uhlíkovými vlákny – Vlevo s plexiskly, vpravo bez plexiskel



Obr. 5.24: Graf závislosti síly na posunu, průběh křivek všech 6 vzorků

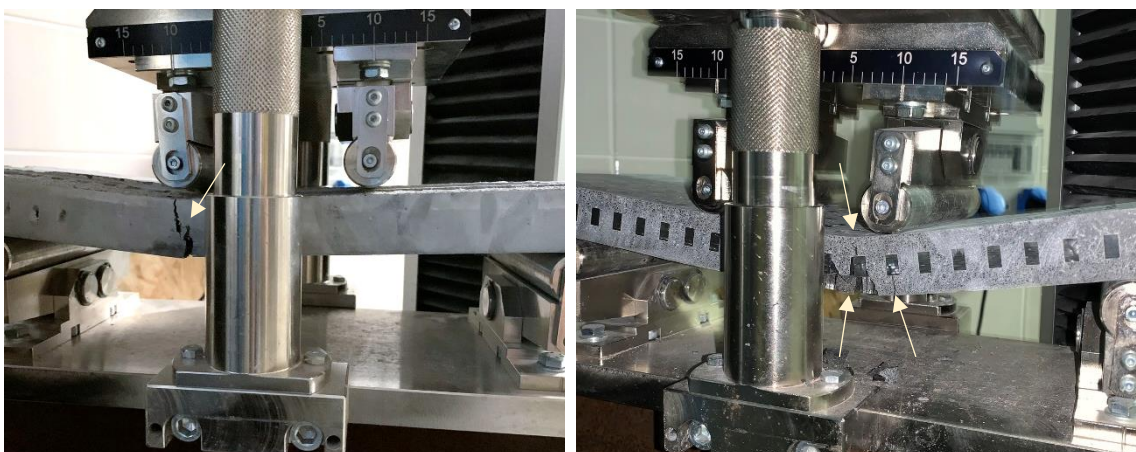
V porovnání se skleněnými rovingy jsou uhlíkové rovingy v tahu za ohybu dle očekávání více jak 2krát pevnější (8,42 MPa skleněná výztuž – ARG R, 18,8 MPa uhlíková výztuž – U R), podobně v porovnání s lněnými dosahují uhlíkové rovingy pevnosti v tahu ohybem více než 5,5krát vyšší (3,35 MPa lněná výztuž – L R, 18,8 MPa uhlíková výztuž – U R). Princip fungování průřezu při zatěžování je ale u všech třech vybraných materiálů rovingů obdobný. Ke kolapsu dochází u lněných rovingů po nejmenší deformaci ze všech vzorků (7 mm), u skleněných rovingů je dosažená deformace mírně vyšší (necelých 8 mm), uhlíková výztuž naopak dosahovala v kombinaci s plexiskly nejvyšší deformace (v průměru 12,5 mm).

Průsvitné vzorky s uhlíkovými a lněnými rovingy jsou po maximálním zatížení schopny dále přenášet zatížení, které odpovídá přibližně 40 % maximálního zatížení, u vzorků se skleněnými rovingy došlo po maximálním zatížení naopak téměř ihned ke kolapsu. Díky velkému poklesu síly při přetržení dolní výztuže však ve všech případech můžeme hovořit o křehkém porušení, které je charakteristické pro impregnované rovingy.



Obr. 5.25: Graf závislosti síly na posunu, porovnání vláknobetonu vyztuženého skleněnými vlákny a textilním betonem

Přestože skleněné rovingy dosahovaly přibližně polovičních hodnot pevností v tahu ohybem a lněné pouze 20 % hodnot oproti uhlíkovým rovingům, neznamená to, že by tato výztuž nebyla vhodná pro určitou aplikaci. V porovnání s vláknobetonem vyrobeným pomocí skleněných vláken (Obr. 5.25) je vidět, že všechny tyto rovingy stále dosahují vyšších pevností a k jejich kolapsu dochází až dlouho po vzniku a rozvoji trhlin. Můžeme tak říci, že takováto průsvitná konstrukce vyztužená s pomocí rovingů je z hlediska bezpečnosti při správném návrhu realizovatelná, na rozdíl od vláknobetonu.



Obr. 5.26: Porušení a průhyb vzorků – Nalevo vláknobeton se skleněnými vlákny (menší průhyb, 1 trhlina), napravo textilní beton s uhlíkovými rovingy (větší průhyb, větší množství trhlin)

5.4. Diskuze výsledků

Při optimalizaci množství výztužných vláken provedené na doprovodných neprůsvitných tělesech bylo maximální množství vláken poměrně výrazně limitováno dosaženou zpracovatelností. V případě průsvitného betonu je vzdálenost mezi jednotlivými plexiskly pouhých 10 mm a je potřeba, aby byla směs schopna vyplnit celý prostor formy rovnoměrně. V případě skleněných vláken tak bylo maximální zkoušené množství vláken 20 kg/m^3 , v případě PP vláken bylo maximální zkoušené množství vláken 4 kg/m^3 . Ovšem i s tímto množstvím by bylo další použití takovéto směsi vzhledem k její zpracovatelnosti bez další úpravy nemožné (rozlití kužele bylo v obou případech 100 mm, tedy prakticky žádné). Nejlepší zpracovatelnosti dosahovaly logicky vzorky s nejnižším množstvím vláken, tedy 10 kg/m^3 skleněných vláken (rozlití kužele 173 mm, při zvýšení vodního součinitele 190 mm) a 2 kg/m^3 PP vláken (rozlití kužele 150 mm).

Při zkoušení vzorků v tlaku v případě obou druhů vláken dosahovaly všechny vzorky nižší pevnosti v porovnání s prostým betonem. To je nejspíše dáno tím, že vlákna se nachází v prostoru okolo zrn cementu a částečně tak brání jeho hydrataci. K nejmenšímu poklesu dochází opět u nejnižšího obsahu vláken, tedy 10 kg/m^3 skleněných vláken délky 6 mm (ze 110,7 MPa na 107,1 MPa) a 2 kg/m^3 PP vláken (ze 110,7 MPa na 102,9 MPa). V případě delšího míchání skleněných vláken pevnost sice mírně vzrostla (107,1 MPa na 108,9 MPa), ale výrazně klesla zpracovatelnost (173 mm na 125 mm).

Ze zkoušení vzorků v tahu za ohybu (tříbodovým ohybem) vyplývá, že přidáním vláken došlo u většiny vzorků pouze k mírnému poklesu pevnosti, u vzorků s obsahem 10 kg/m^3 skleněných vláken došlo ale naopak k nárůstu (17,24 MPa na 18,76 MPa), stejně tak u vzorků s obsahem 2 kg/m^3 PP vláken (17,24 MPa na 17,65 MPa). Důležitější je ale graf závislosti síly na posunu, neboť je potřeba, aby vlákna po vzniku trhlin byla schopna trhliny překlenout a roznést zatížení, tedy aby nedošlo ke kolapsu ihned. K tomuto ale nedochází u žádného ze vzorků, a to jak se skleněnými, tak s PP vlákny. To je dáno pravděpodobně jejich délkou a nízkou koncentrací, společně s povahou křehkého lomu jemnozrnného vysokohodnotného betonu. Ani jeden aspekt ale nemůže být upraven, protože je nutné, aby směs s vlákny byla schopna vyplnit rovnoměrně prostor celé formy. Došlo pouze k velmi mírnému protažení křivky oproti referenční sadě bez vláken a ke kolapsu došlo při podobném zatížení, ale při větším posunu.

Vlákna byla ale přidávána vedle zvýšení duktility především z důvodu, aby zabránila vzniku a rozvoji průběžných trhlin mezi plexiskly vlivem smrštění a nedošlo tak ke zlomení průsvitných vzorků dřív, než by vůbec mohly být zkoušeny. Pro další zkoušení tak byly vybrány vzorky s obsahem 10 kg/m^3 skleněných vláken délky 6 mm a vzorky s obsahem 2 kg/m^3 PP vláken, jež se na základě výše uvedeného jeví jako nejvýhodnější. U obou vzorků bylo ale nutné zvýšit obsah vody ze 190 kg/m^3 na 200 kg/m^3 , což má za následek zlepšení zpracovatelnosti, která je v našem případě rozhodující, na úkor mechanických vlastností. Skleněná vlákna v porovnání s PP vlákny dosahovala pouze mírně vyšších hodnot.

Při následujícím zkoušení průsvitných vzorků se skleněnými a PP vlákny byly již rozdíly mezi jednotlivými druhy vláken výraznější díky přítomnosti smršťovacích

trhlin. Již během odbedňování došlo dokonce ke zlomení jednoho ze vzorků s PP vlákny, což bylo zapříčiněno právě vznikem a rozvojem průběžných mikrotrhlin podél plexiskel. To tedy znamená, že vyrábět vzorky úplně bez vláken nemá žádný smysl, vzhledem k tomu, že by k jejich zlomení téměř jistě také došlo.

Z výsledků zkoušky v tahu za ohybu (čtyřbodovým ohybem) je patrné, že zde dosahují skleněná vlákna vyšší pevnosti než PP vlákna (1,61 MPa a 1,38 MPa, kdy trhlinka vznikla v obou případech podél plexiskel). Během zkoušky se také vyskytl vzorek se skleněnými vlákny, kde došlo k trhlině skrz plexisklo a vykazuje tak vyšší pevnost (2,66 MPa). Z grafu závislosti síly na posunu vyplývá, že na rozdíl od vzorků bez plexiskel nedochází ke kolapsu ihned po iniciaci první trhliny. To je způsobeno tím, že plexiskla a kolem nich již vzniklé mikrotrhliny od smršťování oslabí průřez natolik, že vlákna musí v případě průsvitných prvků po vzniku první trhliny překlenout daleko menší zatížení (pevnost vzorků s PP vlákny byla u neprůsvitných vzorků 17,65 MPa, zatímco u vzorků s plexiskly pouhých 1,38 MPa, obdobná situace byla i v případě skleněných vláken).

Ani jedna vlákna tak nedosahují takové únosnosti, aby bylo jejich bezpečné použití v konstrukci většího formátu subtilního panelu možné. V rámci navazujícího výzkumu by tak bylo vhodné zaměřit se právě například na optimalizaci vláken, spolupůsobení betonu s plexiskly (jejichž povrch je velmi hladký, což způsobuje výrazné oslabení průřezu betonu) či na současné použití jiné výztuže (kupříkladu uhlíkových a jiných rovingů). Kromě toho některé studie naznačují, že pevnost průsvitného vláknobetonu se může časem zvýšit, kdy produkty hydratace efektivněji propojí zrna cementu a výztužná vlákna. Další možností by tedy mohlo být zaměřit se současně s předchozím doporučením také na zkoušení vzorků v čase delším, než je běžných 28 dní. Nakonec může být také optimalizován tvar a rozměry použitých plexiskel tak, aby bylo možné použít také jiná vlákna (například ocelová či PVA).

Následně byly vyrobeny a zkoušeny vzorky, kde výztuž tvořily uhlíkové, skleněné a lněné rovingy. Pro srovnání byly také vyrobeny vzorky s uhlíkovými rovingy bez plexiskel. Při porovnání výsledků zkoušky v tahu za ohybu (čtyřbodovým ohybem) dosahují dle předpokladů nejvyšších pevností průsvitné vzorky s uhlíkovými rovingy (18,8 MPa), a to i oproti stejným vzorkům bez plexiskel (18 MPa), dosažená pevnost je ale pouze mírně vyšší. Tento jev je nejspíše způsoben tím, že i zde se vyskytují v okolí plexiskel mikrotrhliny od smršťování, při zatížení tak vznikne velmi rychle více trhlin a výztuž tedy od počátku přenáší nějaké zatížení, na které se může pozvolna adaptovat. Uhlíkové rovingy jsou oproti skleněným více jak 2krát pevnější (18,8 MPa a 8,42 MPa), oproti lněným jsou uhlíkové rovingy pevnější dokonce více než 5,5krát (18,8 MPa a 3,35 MPa). Z grafu závislosti síly na posunu je vidět, že uhlíkové a lněné rovingy jsou po maximálním zatížení stále schopny přenášet okolo 40 % maximálního zatížení, v případě skleněných rovingů naopak došlo téměř ihned ke kolapsu.

Pro aplikaci průsvitného betonu se tak jeví z hlediska mechanických vlastností jako nejvýhodnější beton s výztuží tvořenou uhlíkovými rovingy, následovanou skleněnými rovingy. Lněné rovingy sice nedosahují nejlepších mechanických vlastností, vzhledem k jejich nízké ceně a přírodnímu původu se ale pro samonosné konstrukce bez dalšího zatížení nabízí jako ideální alternativa. Pro následující

výzkum by bylo vhodné zaměřit se například na problematiku požární odolnosti takovéto konstrukce či na její duktilitu.

Dále by bylo ale vhodné zaměřit se také na efektivitu výroby, jelikož výše popsany postup výroby jak průsvitného vláknobetonu tak průsvitného betonu s kompozitní výztuží by byl v případě větších rozměrů panelu velmi náročný, pro širší výrobu téměř nerealizovatelný.

V neposlední je řadě je také možné zvážit případné aplikace takového kompozitního materiálu. Vzhledem k dosaženým mechanickým vlastnostem by bylo možné jej po vhodné optimalizaci použít například jako vnitřní (případně i vnější) stěny, ale také fasádní panely. Ideální je jeho využití v tmavších prostorách objektů, což vede ke snížení potřebné energie na osvětlení. Takovýto subtilní prvek snižuje množství potřebného materiálu na jeho výrobu, díky mnohonásobně nižší hmotnosti zajišťuje snazší manipulovatelnost, ale snižuje také dimenze navazujících nosných prvků. To vše má za následek snížení dopadů jak environmentálních, tak ekonomických. Průsvitný beton je zároveň betonem pohledovým, což nabízí také výhodu architektonickou. Velkou nevýhodou je zde cena plexiskel, která se pohybovala okolo 760 Kč/panel o rozměrech 30 x 150 x 400 mm bez DPH, při stejném rozložení plexiskel v panelu by tedy jejich cena vycházela přibližně 12 650 Kč/m² bez DPH.

6 Závěr

V rámci této práce byla nejprve provedena rešerše, kde byly prozkoumány současné průsvitné betony, prvky, jež zde zajišťují průsvitnost, a způsob výroby takových betonů. Průsvitnými prvky jsou nejčastěji optická vlákna, různé polymery či sklo. Průsvitný beton je možné vyrábět buď strojově, kdy se střídají vrstvy betonové směsi a vrstvy optických vláken odvíjených z cívky, které jsou do směsi následně zavibrovány, anebo ručně například pomocí tvarovaných plexiskel skládaných do mřížky.

Poté byla provedena rešerše zaměřená na mechanické vlastnosti takových betonů. V současné době jsou na trhu k dostání pouze betony nevyztužené či vyztužené klasickou ocelovou výztuží, která ale vyžaduje krycí vrstvu betonu, což má za následek větší tloušťky prvků a tedy i větší spotřebu materiálů. Z mnoha studií provedených na toto téma bylo zjištěno, že vliv na mechanické vlastnosti mají samotné průsvitné prvky, na což byla zaměřena naprostá většina studií. Některé další studie byly také zaměřeny na vliv přidání výztužných vláken (například skleněných či ocelových). Jejich výsledky ale byly velmi nekonzistentní, neboť na finální vlastnosti má vliv velké množství aspektů – druh prvků zajišťujících přenos světla (optická vlákna, plexiskla), jejich tvar a rozměry, povrch, distribuce prvků (hustota a vzájemná vzdálenost), dále také receptura směsi betonu a pevnost samotného betonu, ale také například směr zatěžování. Pouze v případě přidání výztužných vláken se studie povětšinou shodují v tom, že pevnost v tahu za ohybu se jejich přidáním zvýšila.

Pro praktickou část byly tedy zvoleny průsvitné prvky z plexiskla a jako vyztužení byla vybrána skleněná a PP vlákna (aby byla schopna vyplnit úzký prostor mezi jednotlivými plexiskly, musela být vlákna krátká a ohebná) a dále uhlíkové, skleněné a pro zájímavost také lněné rovingy.

Nejprve byla vyrobena a zkoušena doprovodná tělesa k optimalizaci množství výztužných vláken. Množství vláken bylo výrazně limitováno dosaženou zpracovatelností, aby byla směs schopna vyplnit celý prostor formy, maximální obsah skleněných vláken tak byl 20 kg/m^3 a PP vláken 4 kg/m^3 . U všech vzorků došlo k poklesu pevnosti v tlaku oproti referenční sadě bez vláken (k nejmenšímu poklesu došlo u vzorků s obsahem 10 kg/m^3 skleněných vláken a s obsahem 2 kg/m^3 PP vláken), u většiny vzorků došlo také k poklesu pevnosti v tahu za ohybu, výjimku tvořily pouze opět vzorky s obsahem 10 kg/m^3 skleněných vláken a s obsahem 2 kg/m^3 PP vláken, kdy došlo naopak k mírnému nárůstu pevnosti v tahu za ohybu. U všech vzorků ale došlo ke kolapsu ihned po iniciaci první trhliny. Nicméně vlákna bylo nutné použít především z důvodu omezení vzniku a rozvoje podélných trhlin od smrštění betonu podél plexiskel. Pro další zkoušení bylo tedy vybráno množství skleněných vláken 10 kg/m^3 délky 6 mm a množství PP vláken 2 kg/m^3 , u obou ale bylo potřeba zvýšit obsah vody pro dosažení lepší zpracovatelnosti na úkor mechanických vlastností.

Poté byly vyrobeny a zkoušeny průsvitné vzorky. Jako první byly porovnávány vzorky s výztužnými skleněnými a PP vlákny. Zde se již při výrobě projevila významnost přidání vláken, jelikož při odbednění došlo ke zlomení jednoho ze vzorků s PP vlákny, což bylo zapříčiněno rozvojem trhlin podél plexiskel od smrštění betonu, u vzorků

s prostým betonem by tedy ke zlomení téměř jistě také došlo. Při zkoušce v tahu za ohybu se projevil výrazný vliv plexiskel, kdy díky jejich hladkému povrchu bylo spolupůsobení s betonem téměř nulové, k porušení vzorku došlo v naprosté většině případů právě na tomto rozhraní a pevnost v tahu za ohybu těchto vzorků tak byla mnohonásobně nižší oproti vzorkům bez plexiskel (cca 12krát). Na takto oslabených vzorkách se naopak mohl lépe projevit vliv výztužných vláken, kdy již nedošlo ke kolapsu ihned po vzniku první trhliny, vyšší pevnosti pak dosahují vzorky se skleněnými vlákny. Vzorky s oběma druhy vláken nicméně dosahují tak nízkých pevností v tahu za ohybu, že jejich bezpečné použití v konstrukci není bez další optimalizace možné.

Jako druhé byly porovnávány průsvitné vzorky s uhlíkovými, skleněnými a lněnými rovingy. Ty již dosahovaly výrazně vyšších pevností v tahu za ohybu, v porovnání s neprůsvitnými vzorky dosahovaly průsvitné vzorky s uhlíkovými rovingy téměř stejných (dokonce mírně vyšších) pevností. Nejvyšších pevností dosahovaly tedy dle předpokladu uhlíkové rovingy následované skleněnými (více jak 2krát nižší pevnost) a nakonec lněnými rovingy (více než 5,5krát nižší pevnost). Z hlediska chování po vzniku prvních trhlin byly vzorky s uhlíkovými a lněnými rovingy schopny dále přenášet určitou část zatížení (okolo 40 % maximálního zatížení), na rozdíl od skleněných rovingů.

Na základě výsledků můžeme tedy říci, že průsvitný beton s těmito konkrétními výztužnými rozptýlenými vlákny je bez další optimalizace pro použití v konstrukci nerealizovatelný. Naopak průsvitný beton s kompozitní výztuží (především uhlíkovými rovingy) by z hlediska mechanických vlastností mohl být v konstrukci použitelný. Je zde ale stále potřeba zaměřit se například na požární odolnost takového betonu, pokud by na ni byly kladeny požadavky, či na zvýšení jeho duktility.

Použitá literatura

- [1] HÁJEK, Petr. Význam betonu a betonových konstrukcí z hlediska kritérií udržitelné výstavby. *Časopis Stavebnictví* [online]. 2007 [vid. 2022-12-16]. Dostupné z: <https://www.casopisstavebnictvi.cz/clanky-vyznam-betonu-a-betonovych-konstrukci-zhlediska-kriterii-udrzitelne-vystavby.html>
- [2] HABEL, Jiří. *ZÁKLADY SVĚTELNÉ TECHNIKY* [online]. 2012 [vid. 2022-12-16]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/18762728-Zaklady-svetelne-techniky.html>
- [3] KABÍČKOVÁ, Věra. *Beton a světlo* [online]. Praha, 2021 [vid. 2022-12-16]. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/95423>
- [4] *LitraCon* [online]. [vid. 2022-11-13]. Dostupné z: <http://www.litracon.hu/en>
- [5] *Lucem - Light transmitting Concrete – Lucem GmbH Aachen, Germany* [online]. [vid. 2022-11-13]. Dostupné z: <https://lucem.com/>
- [6] LOSONCZI, Aron. Light transmitting building block, manufacturing method for the same and lining element [online]. HU226967B1. 29. březen 2010. [vid. 2022-11-13]. Dostupné z: <https://patents.google.com/patent/HU226967B1/en>
- [7] PUNČOCHÁŘ, J. *2. kapitola: Přenosová cesta optická* [online]. [vid. 2022-12-11]. Dostupné z: https://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/FEI/AEO/sylaby/AEO_02.pdf
- [8] LOSONCZI, Aron. Building blocks comprising light-permeable fibers and method of making the same [online]. SE522171C2. 20. leden 2004. [vid. 2022-11-13]. Dostupné z: <https://patents.google.com/patent/SE522171C2/en>
- [9] PETERS, Jiri, Ladislav EBERI a Vladan ANTONOVIC. Bauelement mit lichtdurchlässigen eigenschaften, seine multiplen anordnungen und herstellungsverfahren [online]. WO2014019559A1. 6. únor 2014. [vid. 2022-11-13]. Dostupné z: <https://patents.google.com/patent/WO2014019559A1/zh-TW>
- [10] *LiCrete® – innovative building material composed of high quality concrete and transparent elements* [online]. [vid. 2022-11-13]. Dostupné z: <https://licrete.com/>
- [11] LiCrete® - kombinace nadčasovosti a efektivity. www.stavebnictvi3000.cz [online]. [vid. 2022-11-13]. Dostupné z: <https://www.stavebnictvi3000.cz/clanky/licrete-kombinace-nadcasovosti-a-efektivita>
- [12] Co je to textilní beton (TRC). *TZB-info* [online]. [vid. 2022-11-13]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/18732-co-je-to-textilni-beton-trc>

- [13] VLACH, Tomáš. *Interakce textilní výztuže a vysokopevnostní betonové matrice* [online]. Praha, 2021 [vid. 2022-11-21]. Disertační práce. České vysoké učení technické v Praze. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/98215>
- [14] BRAMESHUBER, W. *Textile Reinforced Concrete - State-of-the-Art Report of RILEM TC 201-TRC* [online]. 2006 [vid. 2022-11-14]. Dostupné z: <https://www.rilem.net/publication/publication/100>
- [15] SILVA, Rebecca Mansur de Castro, Jitong ZHAO, Marco LIEBSCHER, Iurie CUROSU, Flávio de Andrade SILVA a Viktor MECHTCHERINE. Bond behavior of polymer- and mineral-impregnated carbon fiber yarns towards concrete matrices at elevated temperature levels. *Cement and Concrete Composites* [online]. 2022, 133 [vid. 2023-01-04]. ISSN 0958-9465. Dostupné z: [doi:10.1016/j.cemconcomp.2022.104685](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104685)
- [16] AÏTCIN, Pierre-Claude. *Vysokohodnotný beton*. 1. Praha: IC ČKAIT, 2005.
- [17] LAIBLOVÁ, Lenka. *Vyztužování silikátových kompozitů pomocí nekorozivních výztuží* [online]. Praha, 2019 [vid. 2022-12-15]. Disertační práce. České vysoké učení technické v Praze. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/85388?locale-attribute=en>
- [18] ČSN EN ISO 14040 *Environmentální management - Posuzování životního cyklu - Zásady a osnova*. Praha: ÚNMZ, 2006.
- [19] HOSSAIN, Md Akhtar, M. RAHMAN, A MORSHED a SK HAQUE. Investigation of the Effect of Nylon Fiber in Concrete Rehabilitation. In: *International Conference on Civil Engineering for Sustainable Development* [online]. 2012. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/326646258__Investigation__of__the__Effect__of__Nylon__Fiber__in__Concrete__Rehabilitation
- [20] CHANH, Nguyen Van. Steel Fiber Reinforced Concrete [online]. 2015 [vid. 2022-11-13]. Dostupné z: https://www.academia.edu/70854322/Steel__Fiber__Reinforced__Concrete
- [21] ZOLLO, Ronald F. Fiber-reinforced concrete: an overview after 30 years of development. *Cement and Concrete Composites* [online]. 1997, 19(2), 107–122 [vid. 2022-11-13]. ISSN 0958-9465. Dostupné z: [doi:10.1016/S0958-9465\(96\)00046-7](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(96)00046-7)
- [22] ALTLOMATE, Abdelmajeed, Faesal ALATSHAN, Fidelis MASHIRI a Mohamed JADAN. Experimental study of light-transmitting concrete. *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development* [online]. 2016, 133–139 [vid. 2023-01-04]. Dostupné z: [doi:10.1080/2093761X.2016.1237396](https://doi.org/10.1080/2093761X.2016.1237396)
- [23] SUBHARAJIT, Roy, C. G. SHURTHI, J. SANJITH a G. N. SUDHAKAR. Mechanical Properties of Concrete Using Optical and Glass Fibre. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering* [online]. 2018, 15(1), 56–65 [vid. 2023-01-04]. Dostupné z: [doi:10.9790/1684-1501035665](https://doi.org/10.9790/1684-1501035665)
- [24] LI, Yue, Jiaqi LI, Yuhong WAN a Zhiyuan XU. Experimental study of light transmitting cement-based material (LTCM). *Construction and Building*

- Materials* [online]. 2015, 96, 319–325 [vid. 2023-01-04]. ISSN 0950-0618.
Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.08.055
- [25] HENRIQUES, Thiago dos S., Denise C. DAL MOLIN a Ângela B. MASUERO. Study of the influence of sorted polymeric optical fibers (POFs) in samples of a light-transmitting cement-based material (LTCM). *Construction and Building Materials* [online]. 2018, 161, 305–315 [vid. 2023-01-04]. ISSN 0950-0618.
Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.11.137
- [26] CHIEW, Shing Mei, Izni Syahrizal IBRAHIM, Mohd Azreen MOHD ARIFFIN, Han-Seung LEE a Jitendra Kumar SINGH. Development and properties of light-transmitting concrete (LTC) – A review. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2021, 284, 124780 [vid. 2023-01-04]. ISSN 0959-6526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2020.124780
- [27] HUANG, Baofeng, Yeqing WANG, Wensheng LU a Meng CHENG. Fabrication and energy efficiency of translucent concrete panel for building envelope. *Energy* [online]. 2022, 248, 123635 [vid. 2023-01-04]. ISSN 0360-5442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2022.123635
- [28] PRAVEEN, Mathew, Raju BIBIN, Venugopal KIRAN, Eldho MAYA a Thomas ROSE. Light Weight Translucent Concrete Blocks for Load Bearing Components. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)* [online]. 2019, 6(5), 1372–1378 [vid. 2023-01-04]. Dostupné z: https://www.academia.edu/39761331/IRJET_Light_Weight_Translucent_Concrete_Blocks_for_Load_Bearing_Components
- [29] SHAHANA, Sheril P.T. Self Compacting Concrete Using Fly Ash and Glass Fibre. *International Journal of Engineering Research and Technology (IJERT)* [online]. 2013, 2(9), 3074–3076 [vid. 2023-01-04]. Dostupné z: https://www.academia.edu/47782605/IJERT_Self_Compacting_Concrete_Using_Fly_Ash_and_Glass_Fibre
- [30] FOUAD, Walid, Essam ODAH, Isam ABUQASMIEH, Amany HENDY, Awel MISR, Assiut EL, Zeraay RD a El GIZA. Mechanical Properties of Translucent Concrete Using Plexiglass Bars and Fiberglass. *Civil Engineering and Architecture* [online]. 2021, 9(2), 293–300 [vid. 2022-12-18]. Dostupné z: doi:10.13189/cea.2021.090203
- [31] TAHWIA, Ahmed M., Nirmen ABDELAZIZ, Mohamed SAMY a Mohamed AMIN. Mechanical and light transmittance properties of high-performance translucent concrete. *Case Studies in Construction Materials* [online]. 2022, 17 [vid. 2022-12-20]. ISSN 2214-5095. Dostupné z: doi:10.1016/j.cscm.2022.e01260
- [32] SALIH, Shakir, Hasan JONI a Safaa ADNANMOHAMED. Effect of Plastic Optical Fiber on Some Properties of Translucent Concrete. *Engineering & Technology Journal* [online]. 2014, 32, 16 [vid. 2022-12-20]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/301697305_Effect_of_Plastic_Optical_Fiber_on_Some_Properties_of_Translucent_Concrete
- [33] KYNCLOVA, Magdalena, Ctislav FIALA a Petr HAJEK. High Performance Concrete as a Sustainable Material. *International Journal of Sustainable Building*

- Technology and Urban Development* [online]. 2011, 2(1), 63–68 [vid. 2023-01-03]. ISSN 2093-761X. Dostupné z: doi:10.5390/SUSB.2011.2.1.063
- [34] PLEXISKLO - Polymethylmetakrylát (PMMA) - technické aspekty. *koplast.cz* [online]. [vid. 2022-11-22]. Dostupné z: <https://www.koplast.cz/plexisklo-popis-plexiskla/>
- [35] *Uhlíkový roving Tenax STS40 F13 24K 1600tex* [online]. [vid. 2022-11-30]. Dostupné z: <https://www.havel-composites.com/cs/produkty/uhlikovy-roving-tenax-sts40-f13-24k-1600tex-12-6217>
- [36] Anti-Crak® HP (62.4). *Sklocement Beneš, s.r.o.* [online]. [vid. 2022-12-01]. Dostupné z: <https://www.sklocement.cz/sklenena-vlakna-cem-fil/anti-crak-hp/>
- [37] MasterFiber 012 | Monofilní vlákno. CZ/SK [online]. [vid. 2022-11-30]. Dostupné z: <https://www.master-builders-solutions.com/cs-cz/produkty/masterfiber/masterfiber-012-polypropylenové-monofilní-vlákno-do-betonu>
- [38] *Cem-FIL® 5325 | Owens Corning Composites* [online]. [vid. 2023-01-02]. Dostupné z: <https://www.owenscorning.com/en-us/composites/product/cem-fil-5325>
- [39] *Lněné potravinářské mot. - cívky | JUTA Zemědělství / zahrada* [online]. [vid. 2023-01-02]. Dostupné z: <https://www.juta-zemedelstvi-zahrada.cz/obalove-materialy/komercni-motouzy/lnene-potravinarske-civky>
- [40] *Sikafloor®-150* [online]. [vid. 2022-12-04]. Dostupné z: <https://cze.sika.com/cs/produkty-pro-stavebnictvi/podlahy/penetrace/sikafloor-150.html>
- [41] ČSN EN 1015-3 *Zkušební metody malt pro zdivo - Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střešacího stolku)*. Praha: ÚNMZ, 2000.
- [42] ČSN EN 12390-3 *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. Praha: ÚNMZ, 2020.
- [43] ČSN EN 12390-5 *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles*. Praha: ÚNMZ, 2020.
- [44] ČSN EN 1991-1-1 *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-1: Obecná zatížení - Objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení pozemních staveb*. Praha: ÚNMZ, 2004.

Seznam obrázků

Obr. 2.1: Dělení optických vláken [7]	10
Obr. 2.2: Postup strojové výroby průsvitného betonu [8]	11
Obr. 2.3: Dělicí stěna mezi obývacím pokojem a japonskou zahradou (tl. 65 mm), Budapešť (Litracon) [4]	12
Obr. 2.4: Veřejné lavičky na Letišti Mnichov, Německo (Lucem), viditelné vrstvení optických vláken [5]	12
Obr. 2.5: Bloky LiCrete [10]	13
Obr. 2.6: Součásti prvků LiCrete [9]	13
Obr. 2.7: Výroba bloků Litracon pXL [6]	14
Obr. 2.8: Podsvícený barový pult, Klub ON, Praha, Litracon pXL [4]	15
Obr. 2.9: Stěna z tvárnic LiCrete, viditelné členění jednotlivých bloků [10]	15
Obr. 3.1: Možné vyztužení (H) bloků LiTraCon [6]	16
Obr. 3.2: Možné vyztužení (9) bloků LiCrete [9]	17
Obr. 3.3: Graf chování rovingu s impregnací a bez impregnace [14]	18
Obr. 3.4: Mikrosilika mezi zrny cementu [12]	19
Obr. 3.5: Příklad působení plastifikátoru [13]	19
Obr. 3.6: Procentuální porovnání výsledků potenciálů kategorií dopadů [17]	21
Obr. 3.7: Výsledky citlivostní analýzy, potenciál globálního oteplování [17]	21
Obr. 3.8: Typický průběh deformace v závislosti na napětí vláknobetonu [19]	22
Obr. 3.9: Lobby budovy Hansa Carrée, Hamburg, Německo (Lucem) [5], směr namáhání tahem za ohybu podél vláken (například zatížení větrem) a tlakem kolmo na vlákna (vlastní tíha)	23
Obr. 3.10: Způsob zatěžování vzorků [30]	24
Obr. 3.11: Výsledky zkoušky pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu [30]	24
Obr. 3.12: Způsob zatěžování vzorků průsvitného vysokohodnotného betonu [31]	25
Obr. 3.13: Výsledky zkoušky v tlaku ve stáří 28 dní [31]	26
Obr. 3.14: Výsledky zkoušky pevnost v tahu za ohybu [31]	26
Obr. 3.15: Pevnost v tlaku a v tahu za ohybu ve stáří 28 dní [32]	27
Obr. 4.1: Plexiskla – žebra spojující „tyčinky“, které probíhají z jednoho povrchu prvku na druhý	28

Obr. 4.2: Použité typy výztuže – zleva: Uhlíkové rovingy, skleněná vlákna, PP pazdeří.....	29
Obr. 5.1: Uspořádání zatěžování tělesa při zkoušce třibodovým ohybem [43].....	31
Obr. 5.2: Uspořádání zatěžování tělesa při zkoušce čtyřbodovým ohybem [43]	32
Obr. 5.3: 9 sad vzorků k optimalizaci množství vláken	34
Obr. 5.4: Rozlití kužele – zleva: ARG 6/10, ARG 6/20 a ARG 6/10 W200.....	34
Obr. 5.5: Průměrné hodnoty pevností v tlaku zkoušené na krychlích	35
Obr. 5.6: Graf závislosti síly na posunu, průběh křivek typického vzorku	36
Obr. 5.7: Průměrné hodnoty pevností v tlaku zkoušené na úlomcích trámečků	37
Obr. 5.8: Zkoušení a porušení zkušebních těles	37
Obr. 5.9: Průměrné hodnoty pevností v tlaku zkoušené na krychlích	38
Obr. 5.10: Graf závislosti síly na posunu, průběh křivek typického vzorku	39
Obr. 5.11: Způsob porušení trámečků po zkoušce třibodovým ohybem (skleněná i PP vlákna)	40
Obr. 5.12: Průměrné hodnoty pevností v tlaku zkoušené na trámečcích.....	40
Obr. 5.13: Graf závislosti síly na posunu, průběh křivek typického vzorku – porovnání vybraných skleněných vláken a PP vláken	41
Obr. 5.14: Nákras průsvitného panelu s plexiskly	42
Obr. 5.15: Průběžné trhliny na vzorku PP2 W200.....	43
Obr. 5.16: Výroba vzorků průsvitného vláknobetonu – Vlevo příprava plexiskel s dřívky, vpravo přilepená sklíčka k formě a odstraňování dřivek	43
Obr. 5.17: Porušení vzorků – Nalevo porušení podél plexiskla, napravo skrz plexisklo	44
Obr. 5.18: Graf závislosti síly na posunu, průběh křivek všech 3 vzorků	45
Obr. 5.19: Výsledná podoba panelu s uhlíkovými rovingy	46
Obr. 5.20: Výroba vzorků průsvitného textilního betonu	47
Obr. 5.21: Úprava povrchu vzorků textilního betonu s uhlíkovými vlákny	48
Obr. 5.22: Panel v průběhu vysychání.....	48
Obr. 5.23: Vzniklé trhliny na vzorcích s uhlíkovými vlákny – Vlevo s plexiskly, vpravo bez plexiskel.....	49
Obr. 5.24: Graf závislosti síly na posunu, průběh křivek všech 6 vzorků	50
Obr. 5.25: Graf závislosti síly na posunu, porovnání vláknobetonu vyztuženého skleněnými vlákny a textilním betonem.....	51

Obr. 5.26: Porušení a průhyb vzorků – Nalevo vláknobeton se skleněnými vlákny (menší průhyb, 1 trhlina), napravo textilní beton s uhlíkovými rovingy (větší průhyb, větší množství trhlín) 51

Seznam tabulek

Tab. 3.1: Obecné shrnutí dopadů přidání různých prvků na pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu v popisovaných studiích [30–32]	23
Tab. 3.2: Výsledky zkoušek pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu [30]	24
Tab. 3.3: Receptury vzorků průsvitného vysokohodnotného betonu [31].....	25
Tab. 3.4: Výsledky zkoušek pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu průsvitného vysokohodnotného betonu [31]	25
Tab. 3.5: Receptura betonové směsi shodná pro všechny vzorky [32]	27
Tab. 4.1: Receptura směsi vysokohodnotného betonu	28
Tab. 5.1: Receptura doprovodných těles.....	33
Tab. 5.2: Průměrné výsledky vzorků s obsahem skleněných vláken v porovnání s referenční sadou.....	35
Tab. 5.3: Průměrné výsledky vzorků s obsahem PP vláken v porovnání s referenční sadou.....	38
Tab. 5.4: Souhrnné výsledky vzorků průsvitného vláknobetonu.....	44
Tab. 5.5: Souhrnné výsledky vzorků průsvitného textilního betonu.....	49

Seznam příloh

Příloha 1: Tah za ohybu, PP vlákna

Příloha 2: Tah za ohybu, ARG vlákna

Příloha 3: Tlak na úlomcích trámečků, PP vlákna

Příloha 4: Tlak na úlomcích trámečků, ARG vlákna

Příloha 5: Tlak na krychlích, PP vlákna

Příloha 6: Tlak na krychlích, ARG vlákna