

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta stavební

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2021

Patricie Gajdušková



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

## ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

# VLIV DRUHU ROZPTÝLENÉ VÝZTUŽE NA VYBRANÉ VLASTNOSTI BETONU

INFLUENCE OF THE TYPE OF DISPERSED REINFORCEMENT ON SELECTED PROPERTIES  
OF CONCRETE

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Patricie Gajdušková

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MARTIN SEDLMAJER, Ph.D.



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607R020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců
ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	
Student	Patricie Gajdušková
Název	Vliv druhu rozptýlené výztuže na vybrané vlastnosti betonu
Vedoucí práce	Ing. Martin Sedlmajer, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2020
Datum odevzdání	28. 5. 2021

V Brně dne 30. 11. 2020

---

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA,  
dr.h.c.  
Vedoucí ústavu

---

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.  
Děkan Fakulty stavební VUT

## Podklady a literatura

1. Arnon Bentur, Sidney Mindess, Fibre Reinforced Concrete, Taylor & Francis, 2007
2. Gideon P.A.G. van Zijl, Folker H. Wittmann, F. Wittmann, G. Van Zijl, Durability of Strain-Hardening Fibre-Reinforced Cement-Based Composites (SHCC), Springer Netherlands, 2011
3. Colin D Johnston, Fiber-Reinforced Cements and Concretes, Taylor & Francis, 2010
4. D. J. Kim, K. Wille, A. E. Naaman, S. El-Tawil, Gustavo J. Parra-Montesinos, Hans W. Reinhardt, High Performance Fiber Reinforced Cement Composites: HPFRCC 6
5. Harvinder Singh, Steel Fiber Reinforced Concrete, Springer, 2017
6. Collepari, Mario, Moderní beton, ČKAIT, 2009.
7. Normy, předpisy, tuzemské a zahraniční publikace v odborných časopisech

## Zásady pro vypracování

Zaměření práce je věnováno využití vláken v betonu, vstupujících do tohoto kompozitu ve formě rozptýlené výztuže. Především by měla být řešena problematika vláken z pohledu jejich vlastností a geometrického tvaru. Základní charakteristiky vláken materiálové či geometrické vymezují a předurčují vhodnou oblast pro jejich aplikaci tak, aby byla patrná přidaná hodnota z pohledu výsledných vlastností, byl patrný jejich účinek a pozitivní přínos pro zvýšení užitných vlastností betonu. Pozornost by měla být zaměřena také na betony vystavené účinku vysokých teplot, které mohou představovat bezpečnostní riziko v případě vzniku požáru.

V teoretické části by měla být shrnuta a popsána jednotlivá vlákna, která jsou aktuálně využívána v betonu, včetně těch vláken, která by mohla být vhodná či jsou v tomto směru vyvíjena. Dále by měly být popsány vlastnosti vláken, materiálová báze, geometrie a další důležité charakteristiky, které předurčují jejich vhodnost pro konkrétní aplikace v betonu s popisem funkce a principů jejich působení. Je očekávána návaznost na studie stávajících poznatků a využívání těchto vláken pro různé druhy betonů.

Poznatky z teoretické části a dosažené výsledky v odborných publikacích poslouží pro vyvození závěrů a porovnání jednotlivých druhů vláken. Bude určena vhodnost vláken v betonu ve vztahu k vlivu vlákna na konkrétní fyzikálně-mechanické vlastnosti betonu. Funkce vybraných druhů vláken bude prakticky ověřena při zatěžování extrémně vysokou teplotou okolo 1 000 °C, při sledování chování betonu při tomto extrémním zatěžování. Budou vyvozeny závěry z působení vysokých teplot ve vztahu k vhodnosti druhu vlákna.

Pro vypracování bakalářské práce bude využita uvedená literatura, doplněná o vlastní zdroje. Rozsah práce cca 40 stran.

## Struktura bakalářské práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).
2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

---

Ing. Martin Sedlmajer, Ph.D.  
Vedoucí bakalářské práce

## ABSTRAKT

Tato práce se zabývá využitím vláken v betonu. Vlákná jsou rozptýlenou výztuží, která může mít různé vlastnosti na základě materiálové charakteristiky nebo geometrického tvaru vlákna, podle kterých je předurčena jejich vhodná aplikace s ohledem na přínos pro zlepšení vlastností betonu. Zároveň je pozorován vliv použitých vláken na chování betonu při vystavení vysokým teplotám, a tedy požární odolnost materiálu. Cílem práce je porovnání vlastností jednotlivých druhů vláken v betonu a jejich využití pro konkrétní aplikace vláknobetonu.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Beton, vláknobeton, explozivní odprýskávání, rozptýlená výztuž, organická vlákna, anorganická vlákna, požární odolnost, působení vysokých teplot, udržitelnost.

## ABSTRACT

This thesis is focused on the usage of fibers in concrete. The fibers are dispersed reinforcement which may have different behaviour based on the material characteristics or the geometric shape of the fibers. Due to this, we may predict the appropriate application of fibers and possibly improve mechanical properties of concrete. At the same time, the influence of used fibers on the behaviour of the concrete when exposed to high temperatures, thus the fire resistance of material, is observed. The purpose of this thesis is to compare the properties of the individual fiber types in concrete, which are suitable for specific application of fibre reinforced concrete.

## KEYWORDS

Concrete, fibre reinforced concrete, explosive spalling, dispersed reinforcement, organic fibre, anorganic fibre, fire resistance, effect of high temperature, sustainability.

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Patricie Gajdušková *Vliv druhu rozptýlené výztuže na vybrané vlastnosti betonu*. Brno, 2021. 86 s., 0 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Martin Sedlmajer, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Vliv druhu rozptýlené výztuže na vybrané vlastnosti betonu* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 28. 5. 2021

---

Patricie Gajdušková  
autor práce



## PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Vliv druhu rozptýlené výztuže na vybrané vlastnosti betonu* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 28.5. 2021

---

Patricie Gajdušková  
autor práce

## PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych velice ráda poděkovala vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Martinu Sedlmajerovi, Ph.D., za jeho ochotu, odborné vedení a trpělivý přístup při konzultacích. Poděkování patří také mé rodině, která mě po celou dobu studia podporovala.

## OBSAH

1. Úvod .....	13
2. Cíl práce .....	14
3. Teoretická část .....	15
3.1 Beton .....	15
3.1.1 Základní složky betonu .....	15
3.2 Vláknobeton .....	17
3.2.1 Historie vláknobetonu .....	18
3.2.2 Složení vláknobetonu .....	20
3.3 Požadavky na vláknobeton .....	21
3.4 Požadavky na vlákna do betonu .....	23
3.5 Druhy vláken do betonu .....	26
3.5.1 Ocelová vlákna .....	28
3.5.2 Skleněná vlákna .....	30
3.5.3 Čedičová vlákna .....	32
3.5.4 Polymerní vlákna .....	33
3.5.5 Textilní vlákna .....	35
3.5.6 Celulózová vlákna .....	35
3.5.7 Recyklovaná vlákna .....	38
3.6 Použití vláknobetonu .....	40
3.6.1 Princip působení vláken v betonu .....	41
3.6.2 Požární odolnost betonu .....	42
3.6.3 Možné aplikace vláknobetonu .....	48
4. Praktická část .....	50
4.1 Vhodná geometrie vlákna pro vláknobeton .....	50
4.2 Vliv délky a dávky vlákna na vlastnosti čerstvého betonu .....	54
4.3 Vliv druhu vlákna na odolnost betonu při působení vysokých teplot .....	57
5. Experimentální část .....	65
5.1 Použité metody a suroviny .....	65
5.2 Zkoušení mechanických vlastností .....	69
6. Diskuze výsledků .....	74

7. Závěr.....	78
8. Seznam použité literatury .....	80
9. Seznam tabulek .....	85
10. Seznam obrázků .....	86

## 1. Úvod

V dnešní době, kdy neustále vystává otázka týkající se ekologického dopadu jednotlivých odvětví průmyslu na životní prostředí, je snaha se pomocí neustále se vyvíjejících moderních technologií více zabývat využíváním druhotných materiálů, které už ve své podstatě nenachází další využití. Na základě této podstaty je možné najít využití pro tyto materiály i ve stavebnictví. Přírodní či recyklovatelné materiály lze například ve formě vláken zakomponovat do struktury betonu a dosáhnout v určitých oblastech vylepšení jeho vlastností. Nejen, že použitím druhotných surovin bude dosaženo snížení ekologické stopy ušetřením produkce energie pro výrobu zcela nových materiálů, ale také mohou být sníženy i finanční náklady. Beton je jeden z nejvíce používaných stavebních materiálů, se kterým se denně setkáváme. Nejen, že má velmi příznivé mechanické vlastnosti, ale také vhodnou úpravou jeho složení je možné docílit jeho využití ve velmi široké škále aplikací, které jsou přesně navrženy na využití jeho vlastností.

I tento všestranně používaný materiál naráží na některá úskalí, jako jsou mechanické vlastnosti, především tahové pevnosti betonu nebo jeho chování při působení extrémně vysokých teplot, které souvisí i s požární odolností materiálu. Všechny tyto vlastnosti jsou důležitým faktorem i pro posuzování bezpečnosti konstrukce, a proto je kladen velký důraz na splnění požadovaných hodnot, aby riziko bezpečnosti bylo, co vůbec nejnižší.

## 2. Cíl práce

Cílem této práce je popsat a porovnat materiálové a geometrické vlastnosti vláken do betonu, které vstupují do betonu ve formě rozptýlené výztuže, aby bylo dosaženo co nejpříznivějších výsledných vlastností betonu. Jednotlivá vlákna budou z pohledu geometrie, materiálu a vhodnosti použití, podrobněji popsána v teoretické části práce. Proto budou nejprve popsány požadavky na vláknobeton a samotná vlákna. Pozornost bude dále věnována chování betonu při působení vysokých teplot, se zaměřením na přidání vhodných vláken do betonu a jeho chování za vysokých teplot ovlivnit tak, aby bylo eliminováno bezpečnostní riziko v případě vzniku požáru. Zároveň bude řešena problematika chování betonu při vystavení extrémnímu vysokoteplotnímu zatěžování, které již v minulosti ohrožovalo bezpečnost při vzniku požáru, a proto je tato problematika žádoucí. Popsána také budou vlákna využívající přírodní suroviny nebo materiály, které lze recyklovat a využít ve formě rozptýlené výztuže pro vláknobeton, a jejich přínos na konkrétní fyzikálně-mechanické vlastnosti betonu.

V praktické části je cílem studium aktuálních konkrétních poznatků vlivu vláken na fyzikální vlastnosti betonu v kontextu s poznatky z teoretické části. Součástí praktické části bude také experimentální část, kde budou vybrány různé druhy vláken a budou podrobeny stanovení základních vlastností. Výběr vláken bude korespondovat s aktuálně využívanými vlákny s možností využít také vlákna z recyklovaných surovin v souladu s aktuálním směrem souvisejícím s udržitelností výstavby. Zároveň bude sledováno chování betonu a funkce vláken při zatížení teplotou 1 000 °C, která by měla simulovat chování vláknobetonu při působení požáru, na základě čehož budou vyvozeny závěry o vhodnosti použití jednotlivých druhů vláken.

### 3. Teoretická část

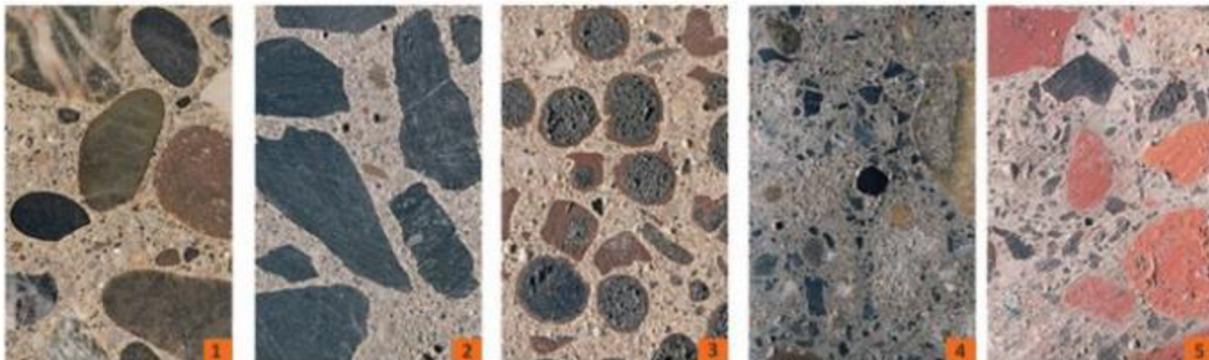
V teoretické části je řešena problematika související s vláknobetonem, pro jehož výrobu je možné využít nejrůznější vlákna, přičemž tato vlákna musí mít předpoklady pro vhodné použití, zároveň jejich vliv na vlastnosti vláknobetonu musí být přínosný z pohledu výsledných vlastností. Popsány jsou vybrané druhy vláken, jejich použití ve vláknobetonu včetně principu jejich působení a možné aplikace v betonu.

#### 3.1 Beton

Beton je kompozitní materiál složený ze směsi cementu, kameniva (hrubého a drobného) a vody. Dalšími složkami mohou být příměsi a přísady, které mají za účel zpravidla vylepšit fyzikálně mechanické vlastnosti betonu, ale také mohou vést ke snížení nákladů na výslednou cenu produktu. S tímto souvisí i zpracování vedlejších energetických produktů z výroby jiných průmyslových odvětví, které se pozitivně promítají z ekologického hlediska na tuto problematiku. Pro samotný návrh betonových konstrukcí je stěžejní vlastností ztvrdlého betonu pevnost v tlaku, které málokterý stavební materiál může na rozdíl od betonu konkurovat. Výraznou slabinou je ovšem pevnost v tahu, která dosahuje zpravidla hodnot 10–15% pevnosti v tlaku. Aby mohl odolávat i tahovým napětím, je standardně vyztužován betonářskou výztuží, předpínací výztuží nebo se do čerstvého betonu přidává rozptýlená výztuž ve formě nejrůznějších vláken.

##### 3.1.1 Zakládání složky betonu

Pevná kostra betonu je utvářena kamenivem. Celkově zaujímá zhruba 70–80 % celkového objemu betonu. Kamenivo může být přírodní nebo uměle vyrobené. Využit lze i kamenivo recyklované. Kamenivo můžeme dále rozdělit podle původu, objemové hmotnosti a frakce, která obsahuje zrna kameniva určité velikosti. Různé druhy betonu z pohledu použitého kameniva můžeme vidět na obrázku č.1, kde jsou snímky jednotlivých druhů použitého kameniva přírodního, umělého nebo recyklovaného původu.



Obrázek 1: Řezy betonem s různými druhy kameniva: 1 - přírodní těžené, 2 - přírodní těžené drcené, 3 - umělé, 4 - recyklované z betonu, 5 - recyklované ze zdiva [1]

Z pohledu objemové hmotnosti, může být beton vylehčen právě vhodně zvoleným kamenivem, vzhledem k jeho zastoupení. Pro výrobu lehkých betonů je nejčastěji využíváno kamenivo umělé, které má vysokou pórovitost a nízkou objemovou hmotnost. V České republice je nejpoužívanější formou kamenivo na bázi expandovaných jílu vypalovaných v rotačních pecích, známé jako keramzit.

Jednou z dalších nezbytných složek betonové směsi je cement. Cement je hydraulické pojivo anorganického původu, které po smíchání s vodou vytváří kaši, která tuhne a tvrdne v důsledku hydratačních procesů silikátů a aluminátů v něm obsažených. Co se týče množství cementu v betonu, tak záleží na druhu betonu a konkrétní aplikaci, pro kterou je beton používán, a jaké jsou na něj kladeny požadavky. Obecně se udává 300–500 kg cementu na 1 kubický metr betonu. Ze základních 5 druhů cementu je pro výrobu betonu stěžejním portlandský cement–CEM I, a to i přes stále se zvyšující tlak na využívání směsných cementů pro výrobu betonu a minimalizaci používání portlandského slínku.

Poslední základní složkou betonu je zmíněná voda. Vodu rozlišujeme na záměsovou (míchání čerstvého betonu) a ošetřovací (udržení betonu ve vlhkém stavu po zatuhnutí). Oba typy musí splňovat kvalitativní požadavky. Vhodnost použití vody závisí zpravidla na jejím zdroji a použitelnost. Například pitná voda je použitelná vždy, zatímco podzemní přírodní voda nebo povrchová musí být nejdříve vyzkoušena. Průmyslová voda může být použita pouze za určitých podmínek. Splašková voda je vždy nepoužitelná. Mořskou vodu lze využít pro prostý beton, do železobetonu je ovšem nevhodná [1].



Nezbytnými složkami jsou i přísady, které zásadním způsobem ovlivňují vlastnosti čerstvého a ztvrdlého betonu. Jde o chemické sloučeniny, které jsou přidávány zpravidla v množství do 5 % hmotnosti cementu. Některé z jejich vlastností jsou závislé na použitém druhu cementu. Nejvyužívanějšími přísadami jsou plastifikační, které snižují potřebné množství záměsové vody, přičemž není ovlivněna zpracovatelnost betonu, ale zároveň snížením vodního součinitele umožňují dosažení vyšších pevností ztvrdlého betonu. Pro betony vystaveným mrazu a chemickým látkám (CHRL), silniční, jsou provzdušňující přísady nepostradatelné z důvodu vytvoření vzduchových pórů, které jsou prostorem pro zvětšující se objem krystalů ledu a zvyšují tak jejich odolnost proti tomuto specifickému zatížení. Chemické přísady jsou dnes neoddělitelnou součástí moderní technologie betonu.

Poslední složkou přidávanou do betonu jsou příměsi. Jde o většinou práškovité látky, které se přidávají do betonu za účelem zlepšení stávajících vlastností nebo k docílení speciálních vlastností. U čerstvého betonu se jedná zejména o konzistenci a zpracovatelnost, u ztvrdlého betonu o pevnostní charakteristiky, hutnost, trvanlivost nebo odolnost proti chemicky agresivním prostředím. Jedná se především o mletou strusku, vápenec, kamenné moučky, křemičitý úlet (tzv. mikrosilika), popílek a další. Příměsi se přidávají v takovém množství, aby negativně neovlivnily vlastnosti betonu, především jeho trvanlivost nebo korozi oceli z pohledu dostatečné pasivace výztuže alkalickým prostředím.

V dnešní době málokdy pracujeme pouze s prostým betonem. Většina betonových konstrukcí je vyztužena buď ocelářskou výztuží, předpínací výztuží nebo vlákny. V případě ocelářské výztuže se bavíme o železobetonu, u předpínacího vyztužení o předpjatém betonu a v souvislosti s užitím vláken jako rozptýlené výztuže jde o tzv. vláknobeton.

## 3.2 Vláknobeton

Vláknobeton je speciálním typem konstrukčního stavebního materiálu, při jehož výrobě se k základním složkám betonu přidává vhodně zvolená rozptýlená výztuž. Jejich přidáním do matrice betonu jsou významně ovlivněny některé vlastnosti jako schopnost

odolávat účinkům objemových změn betonu vlivem smršťování při jeho tuhnutí a tvrdnutí, tahovým napětím vlivem mechanického namáhání a zmírnění křehkého charakteru betonu [43]. Některé typy vláken s vyšším modulem pružnosti mohou tuto funkci plnit i po jeho zatvrdnutí, ovšem nelze konkurovat klasickému vyztužení pomocí tyčí cíleně soustředěných v těch místech, kde má výztuž nejvyšší účinnost [3].

### 3.2.1 Historie vláknobetonu

Prostý beton vykazuje nízkou pevnost v tahu. Zároveň má omezenou tažnost a malou odolnost proti šíření trhlin. Během jeho výroby jsou v materiálu vyvíjeny mikroskopické praskliny v důsledku jeho inherentních objemových a strukturálních změn, a to ještě před jeho externím zatížením. Aby tedy bylo beton možné využít jako nosný konstrukční prvek, je potřeba do betonu vnést tahovou odolnost. Díky tomu tedy došlo k hledání odpovědi na to, jak slabou matici vyztužit silnými tuhými vlákny za vzniku kompozitu vynikajících vlastností a výkonu [1].

Koncept využití vláken v betonu za účelem posílení matrice slabší v pevnosti v tahu je starší více jak 4 500 let. Starověké civilizace na Středním východě hojně využívaly slámová vlákna již před 10 000 let, která byla přidávána do sluncem sušených hliněných cihel s cílem vytvořit kompozit s lepší houževnatostí, tj. maticí s vyšší odolností proti praskání a snížení šíření trhlin. Vzhledem k rozšířenému využití portlandského cementu do betonu jako jednoho z hlavních stavebních materiálů byla vznesena otázka k vylepšení jeho nedostatků určitých vlastností–nízké pevnosti v tahu, křehkosti, šíření trhlin [1].

Francouzský inženýr Joseph Lambot v roce 1847 přišel s myšlenkou přidání spojitých drátů ve formě drátů či drátěných sítí od betonu. To dalo za vznik železobetonu, jak jej dnes známe. Použití spojitých ocelových výztužných prutů v tahové zóně betonového průřezu pomohlo vyřešit problém nízké pevnosti v tahu. Roku 1874 byl udělen první patent v Kalifornii pro A. Bernarda, později také patent získal G. C. Martin pro trubky, které byly vyrobeny z betonu vyztuženého ocelovými vlákny [4].

Vývoj vláken do betonu byl před rokem 1960 velmi pozvolný. Sice již existovaly studie popisující základní koncepci využít vláken v betonu ovšem bez její aplikace. V 50. letech 20. století byl zejména v USA, Velké Británii a v Rusku výzkum zaměřen na vlákna skleněná. V Rusku zároveň byla ve stavebnictví skleněná vlákna využívána. Bylo ovšem zjištěno, že tento druh vláken je náchylný k působení alkalického prostředí. Na konci 50. let tedy Portlandská cementová asociace začala vlákna zkoumat [5].

Od začátku 60. let minulého století došlo k enormnímu zájmu o vláknobeton. Tento rok byl stěžejní pro jeho rozvoj, co se týká rostoucího počtu aplikací díky moderním pokrokům, tak i představení širší škály vláken. Ta zahrnovala jak vlákna ocelová, skleněná a uhlíková, tak i přírodní organická a polypropylenová. Vědec James Romualdi v roce 1963 svým výzkumem a experimenty dokázal, že nízká pevnost betonu v tahu může být překonána použitím vláken s vysokou pevností a vysokým modulem pružnosti, pokud je vzdálenost těchto vláken snížena na méně než 1,0 mm. Rovněž jejich výzkum poukázal na to, že vlákna fungují jako tzv. lapače trhlin, tedy omezují růst trhlin [4], [5].

David Lankard se ve svém výzkumu například zaměřil na to, jak samotné charakteristiky ocelového vlákna, tj. jeho délka, průměr a kvalita, ovlivňují konečné vlastnosti betonu. Bylo zjištěno, že použitím krátkých ocelových vláken a malých průměrů lze dosáhnout až čtyřnásobné pevnosti v ohybu. Vyvinul lineární vztah mezi pevností v ohybu první trhliny a konečnou pevností v ohybu jako funkce obsahu vláken. Pevnost v ohybu první trhliny významně vzrostla jako funkce zmenšeného rozteče vláken pod 5,7 mm, když byla délka a procento vláken udržováno konstantní a rozteč byla zmenšována pomocí vláken s malým průměrem [4].

Vývoj vláknobetonu, jakožto specifického kompozitního materiálu, stále pokračuje, v posledních letech vzrůstá úsilí na vypracování pokynů týkajících se testování a návrhové metodiky využívající zejména ocelová vlákna samostatně nebo společně s vlákny syntetickými. V současné době je stále sledován vliv materiálových charakteristik jednotlivých vláken, především pak vliv jejich geometrie, tj. délky a průměru vlákna, ale

také dávkování, na vlastnosti betonu na základě použití vláken různých materiálů a chování vláken v betonu při nejrůznějších extrémních podmínkách zatěžování.

V minulosti byla hojně používána vlákna azbestová, která významně zvyšovala užité vlastnosti materiálu. Vlákna z azbestu jsou vysoce odolná vůči vysokým teplotám, většině chemikálií a vykazují vysokou pevnost v tahu. Používala se zejména jako izolační materiál, brzdové obložení, těsnící vložky, ohnivzdorné textilie, těsnící pásy, azbestové nitě a materiál pro zpevnění trubek. Na základě těchto vlastností se v 70. letech 20. století hojně využíval, dokud se nezačaly objevovat studie o zdravotní závadnosti. Od té doby se jejich použití postupně snižovalo. V České republice byl azbest přidán na seznam karcinogenních látek v roce 1984 a v roce 1997 bylo jeho používání zakázáno úplně [18], [18]. Dnes se s nimi již při výrobě vláknobetonu spíš nesetkáme, ale na stávajících starších konstrukcích zastoupeny být mohou.

### 3.2.2 Složení vláknobetonu

Dobře navržená směs je klíčovým faktorem pro optimální funkčnost vlákna a dosažení požadovaných vlastností, které by měl vláknobeton splňovat. Složení betonové směsi musí být navrženo tak, aby byla zajištěna odpovídající zpracovatelnost a optimální vazba na cementovou matici, která je stěžejním faktorem pro zajištění dokonalého spolupůsobení vlákna s cementovou maticí. Tento synergický účinek je předpokladem pro využití potenciálu, který tento stavební materiál nabízí.

Pro návrh a výrobu vláknobetonu lze uvažovat stejné charakteristiky týkající se cementu a přísad jako pro beton prostý. Jedním z důležitých kritérií je splnění vhodného množství záměsové vody, a to v poměru  $w/c$  v rozmezí 0,4–0,5, aby byla snížena pravděpodobnost tvorby shluků vláken [6]. Shluky vláken jsou ve struktuře nežádoucí, jelikož by mohlo docházet k segregaci celého betonu. Segregace následně může být příčinou snížení mechanických vlastností sledovaných u ztvrdlého betonu, ale také ovlivnění celkové homogenity výsledného betonu. Z tohoto pohledu je nezbytné, aby bylo dosaženo homogenní směsi v celém jejím objemu a byla tak zajištěna správná distribuce vláken v celém cementovém kompozitu.

Mezi další sledované požadavky patří vlastnosti kameniva přidávaného do vláknobetonu, které závisí zpravidla na tuhosti přidaných vláken, například u vláken ocelových je nutné upravit křivku zrnitosti pro správné spolupůsobení s cementovou matricí. Tohoto aspektu se nemusí uvažovat u vláken syntetických, která jsou obecně elastičtější. Také délka rozptýlené výztuže by neměla přesáhnout trojnásobek velikosti maximálního zrna kameniva [16].

Do struktury vláknobetonu bývají častěji ve větší míře přidávány příměsi, než je tomu u prostého betonu. Je to zejména z důvodu k navýšení jemných podílů matrice pro dokonalé obalení celého povrchu přidaných vláken. Pro přidávání platí stejné zásady jako pro beton prostý.

Co se týče využití přísad do vláknobetonu, tak zde jsou zcela stěžejní, a to z důvodu, že po přidání rozptýlené výztuže do betonu zásadním způsobem klesá jeho zpracovatelnost a také reologické vlastnosti, tj. pohyblivost čerstvé směsi betonu. Plastifikační a superplastifikační přísady mají ve složení zásadní roli. Betony s vlákny zpravidla vykazují vyšší náročnost na množství vody, a to především z toho důvodu, že je významně navýšen vnitřní povrch v kompozitu vlivem povrchu vláken, který nelze označit za zanedbatelný. Některé technické listy návrhů směsí dokonce obsahují informaci o tom, jak moc se zpracovatelnost betonu po přidání vláken oslabí. Z pohledu reologie vláknobetonu vlákna způsobují blokaci čerstvé směsi, a tím snižují volný pohyb, který by byl výrazně vyšší v případě čerstvého betonu bez vláken.

### 3.3 Požadavky na vláknobeton

S rozvojem použití vláknobetonu pro různé účely ve stavebních materiálech byla v roce 2015 vydána česká technická norma pro vláknobetony ČSN P 73 2450 navazující na normu evropskou ČSN EN 206, na základě které platí pro vláknobeton stejná klasifikace jako pro běžné betony. Rozdílem je pouze značení, kde namísto značením písmenem C (Concrete) je uvedena zkratka FRC (Fibre Reinforced Concrete). Zároveň však může a nemusí být uvedena informativní hodnota charakteristické pevnosti vláknobetonu v příčném tahu například FRC 2,5/2,4/2,0 v jednotkách MPa.

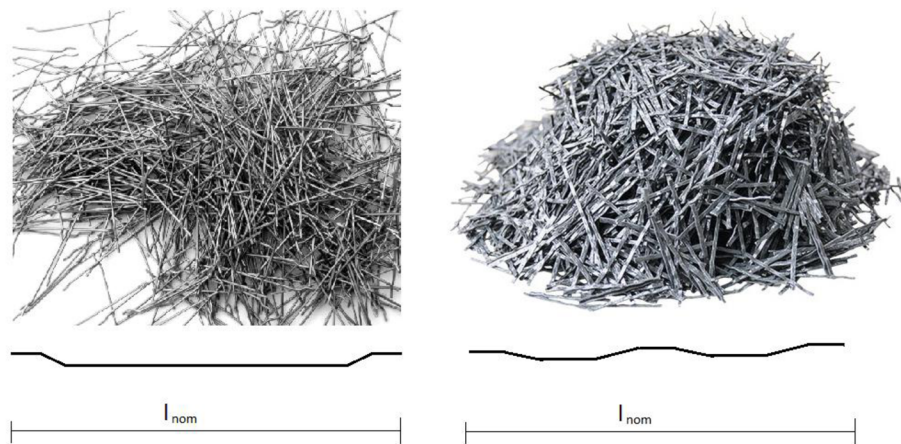
V návaznosti na složení prostého betonu se postupuje i u vláknobetonu, kdy jsou používány pro recepturu vláknobetonu stejné složky, včetně přísad a příměsí. V potaz se musí ale brát, že složení se liší přidáním vláken, čímž mohou být ovlivněny dávky složek na jednotku objemu betonu. Důvodem jsou různé charakteristiky vláken ať už materiál, ze kterého jsou vlákna vyrobena, geometrie vláken a různé objemové koncentrace. Řešením tohoto možného výkyvu je úprava objemu složek betonu, a to zejména jemných podílů v kamenivu, cementu nebo příměsí tak, aby došlo k eliminaci vlivu nakypření směsi kameniva náhodně rozptýlenými vlákny. Užitá vlákna ovlivňují tedy nejen celkové složení, ale i technologii výroby vláknobetonu [8].

Podle požadavků a požadovaných vlastností kladených na navrhované vláknobetonové konstrukce, je proveden výběr vhodných vláken. V tomto ohledu jsou v normě ČSN EN 206 uvedena možná doporučení např. pro vlákna ocelová, kdy je doporučení minimální dávky do vláknobetonu alespoň 0,5 % objemového stupně ztužení, což umožňuje při použití vláken délky 35 mm výrobu homogenní vláknobetonové směsi bez vytvoření shluku vláken, které jsou nežádoucí, jelikož by v různých místech konstrukce nebyly konstantní vlastnosti [8].

Pokud se budeme zabývat zkouškami na čerstvém vláknobetonu jako např. konzistencí, musíme s ohledem na rozmanitost druhů a typů vláken posoudit, která z používaných zkoušek je vhodná. Pokud pracujeme s vlákny ocelovými, není vhodné použít pro stanovení konzistence zkoušku sednutí kužele podle Abramse [9] nebo metodou VeBe [10], jelikož při hutnění čerstvého vláknobetonu ocelovou tyčí dochází k násilné změně struktury vláknobetonu, ale také k deformaci jednotlivých drátků, čímž je výsledek zkoušky zásadně ovlivněn a je nepoužitelný pro získání odpovídajících hodnot. Naopak vhodnou zkouškou z pohledu provádění je zkouška rozlitím ČSN EN 12350-5 nebo zkouška zhutnitelnosti ČSN EN 12350-4, kdy struktura čerstvého vláknobetonu není ovlivněna [11].

Po provedení zkoušek na čerstvém betonu je nutné dodržet požadavky na tvar a rozměry zkušebních těles. Obecně je norma ČSN EN 12390-1 doplněna o ČSN P 73 2452,

kde je určen jmenovitý rozměr zkušebního tělesa z vláknobetonu tak, aby rozměr byl alespoň 3,5krát větší, než je velikost maximálního zrna kameniva a zároveň 1,5krát větší, než je jmenovitá délka  $l_{nom}$  použitých vláken, jak je uvedeno na obrázku č. 2. Zpravidla se volí délka zkušební krychle jako u prostého betonu, a to 150 mm a v případě válce je průměr 150 mm s dvojnásobnou výškou [11].



Obrázek 2: Jmenovitá délka vlákna  $l_{nom}$  ocelového vlákna (vlevo) a polymerového vlákna (vpravo) [12]

Zkoušky objemové hmotnosti ztvrdlého vláknobetonu, hloubka průsaku vody a další se řídí dle ustanovení ČSN EN 12390-6 bez jakýchkoliv dalších požadavků či doporučení. Většinou se řídí při jejich výrobě doporučeními od výrobce, které jsou vždy individuálně dána pro specifický tvar vlákna a účel využití vláknobetonu konkrétních požadovaných vlastností [13].

### 3.4 Požadavky na vlákna do betonu

Aktuální požadavky na vlákna přidávaná do betonu se řídí řadou norem ČSN EN 14889, kde jsou stanoveny konkrétní požadavky na vlákna vzhledem k jejich materiálové charakteristice. Norma rozděluje požadavky zvlášť pro vlákna ocelová a polymerová. Požadavky na vlákna ocelová se řídí ČSN EN 14889-1 [14] Vlákna do betonu – Část 1: Ocelová vlákna a polymerová vlákna ČSN EN 14889-2 [15] Vlákna do betonu – Část 2: Polymerová vlákna. Ostatní druhy vláken se považují za vhodné, pokud splňují požadavky

vydaných technických norem, na které je v České republice vydáno stavebně technické osvědčení. Od plné účinnosti normy EN 14889-2 tj. od května 2008 lze ve všech členských zemích Evropské unie prodávat pouze vlákna do betonu s označením CE.

Co se týče požadavků na vlákna ocelová, která jsou nejpoužívanější, tak vlákna musí odpovídat jedné z následujících skupin podle základního materiálu použitého pro jejich výrobu.

- skupina I: za studena tažený drát
- skupina II: vlákna stříhaná z plechu
- skupina III: vlákna oddělovaná z taveniny
- skupina IV: vlákna protahovaná z drátu taženého za studena
- skupina V: vlákna frézovaná z ocelového bloku [14].

Pro skupinu vláken I a II musí být uvedena délka vlákna, jeho průměr a štíhlostní poměr. Dalším důležitým požadavkem pro tyto dvě skupiny vláken je hodnota modulu pružnosti s použitím tahové zkoušky, která se provádí podle ustanovení v EN 10002-1. Zkouška se provádí před deformací vlákna a modul pružnosti se poté vypočte podle napětí deformace při 10% a 30% pevnosti v tahu. Typická hodnota modulu pružnosti ocelových vláken bývá kolem 200 GPa, u nerezové oceli 170 GPa. U zbývajících skupin III, IV a V se uvádí rozpětí délek, průměrů a štíhlostních poměrů. Požadavek na modul pružnosti není výrobce povinen deklarovat [14].

Dalším důležitým parametrem pro ocelové vlákno je jeho tvar. Vlákno musí být buď přímé, nebo tvarované, přičemž výrobce je povinen jej deklarovat. Kontrola tvaru či případných odchylek je specifikována pro každý jednotlivý tvar samostatně, nefunguje zde žádný univerzální vzorec. Vlákno může být i nějakým způsobem povrchově ošetřeno např. zinkováním, což musí být taktéž pro vlákno uvedeno i množstvím v  $\text{g/m}^2$ .

Výrobce ocelových vláken je dále povinen uvést několik dalších parametrů zejména týkajících se zkoušek na čerstvém vláknobetonu. Mezi ně patří návod k výrobě čerstvého vláknobetonu, kde je uvedeno doporučené pořadí postupů k výrobě při přidávání vláken,



aby bylo dosaženo co nejoptimálnějších podmínek soudržnosti s matricí nebo aby nedocházelo k tvoření nežádoucích shluků vláken. S tím souvisí tedy i uvedení vlivu vláken na konzistenci betonu, který se stanovuje na základě ČSN EN 14845-1, kdy je pracováno s referenčním betonem bez vláken a identickou směsí s vlákny [14].

Druhá část normy ČSN EN 14889-2 rozděluje vlákna polymerová na tři třídy podle jejich fyzického tvaru, přičemž vlákna třídy II se využívají zpravidla tam, kde je vyžadováno zvýšení zbytkové pevnosti v tahu ohybem [15].

- Třída Ia – mikrovlákna s průměrem do 0,3 mm; jednovláknovitá (monofilamentická)
- Třída Ib – mikrovlákna s průměrem do 0,3 mm; vláknitá (fibrilovaná)
- Třída II – makrovlákna s průměrem nad 3 mm

Všeobecné požadavky polymerových vláken jako je druh použitého polymeru k jejich výrobě, tvar (přímá nebo tvarovaná) včetně způsobu tvarování, jejich druh a velikost je výrobce povinen deklarovat. Při výrobě vláken se zároveň často využívá povrchové úpravy nebo povlaku na vláknech tzv. „spin finish“ neboli kluzná úprava, což je druh úpravy vlákna přidáním různých chemických látek za účelem vytvoření povlaku, aby byla zabráněno k tvorbě shluků vláken a bylo dosaženo optimálního rozptýlení vláken v betonu. Zároveň je ovšem nutné dbát pozornosti při přidávání těchto chemikálií na vliv vnesení vzduch do čerstvého vláknobetonu, který by mohl ovlivňovat některé výsledné vlastnosti betonu jako např. pevnostní. Také je nutno věnovat pozornost zajištění dobré soudržnosti s cementovou matricí.

Shodně jako u vláken ocelových je u polymerových vláken řešena deklarace parametrů vlivu vláken na konzistenci, modulu pružnosti vláken, pevností v tahu a doporučení pořadí složek pro výrobu vláknobetonu. Navíc je uváděna hodnota bodu tavení a vznícení, někdy také uvedeno jako teplota tání/měknutí, která je sledována zejména v případě, kdy jsou vlákna používána za účelem modifikace chování betonu při zvýšení odolnosti při požáru. Pro ilustraci jsou uvedeny některé hodnoty teploty tání polymerových vláken v tabulce č.1 [15].

*Tabulka 1: Hodnoty teplot tání polymerových vláken*

Teplota tání, °C	Název vlákna / zkratka
163–175	Polypropylen / PP
180–190 za rozkladu	Polyvinylchlorid / PVC
183	Polyuretan / PU
250–260	Polyester / PL

### 3.5 Druhy vláken do betonu

Vlákna do betonu jsou důležitou složkou, která umožňuje modifikaci vlastností betonu pro zvýšení jeho užitných vlastností, a to na základě uplatnění výhod vlastností konkrétního druhu vlákna. Zejména zvýšení tahové, tvarové a ohybové pevnosti materiálu. Zároveň některé druhy vláken příznivě ovlivňují chování betonu během průběhu objemových změn materiálu, konkrétně potom u smršťování. Vlákna polypropylenová zamezují vzniku trhlin při smršťování betonu, a to jak ve stadiu tuhnutí a tvrdnutí, tak i v zatvrdlém betonu. Schopnost vylepšení konkrétních vlastností betonu závisí především na materiálu, z kterého jsou vlákna vyrobena a jejich geometrických parametrech.

Z materiálového hlediska lze vlákna rozdělit na anorganická a organická vlákna. Mezi anorganická vlákna patří kovová a minerální vlákna. Organická vlákna lze dále rozdělit na dvě větší podskupiny, a to na vlákna přírodní a uměle vytvořená neboli syntetická. V případě přírodních vláken je příznivé jejich ekologické hledisko, ovšem vzhledem k různorodé kvalitě surovin, ze kterých přírodní vlákna můžeme získat, by mohlo ve struktuře vláknobetonu dojít k nehomogenním vlastnostem. Často je zde také řešena problematika kontinuální dostupnosti. Naopak je tomu u vláken uměle vytvořených, kdy je zaručena konzistentní kvalita vlákna, tudíž se nemusíme obávat, že by došlo k rozdílným vlastnostem vláknobetonu či aktuální nedostupnosti těchto vláken.

Podle způsobu výroby jsou vlákna dělena na monofilamentní a fibrilovaná. Monofilamentní vlákna, pro příklad v případě polymerních či skleněných vláken, jsou

vyráběna tzv. metodou nekonečných vláken, což je kontinuální proces výroby, při kterém dochází k tavení a homogenizování suroviny (sklářský kmen, tavenina, roztok polymeru) a jeho následnému vytlačování tryskou, po kterém následuje zachycení a tažení vlákna, jehož principem je proces podélné deformace materiálu až o 20–2000 % původní délky. Tažením jsou vlákna navedena na navíječky protahující vlákno konstantní rychlostí na předem definované rozměry. Monofilamentní vlákna mají kruhový průřez a jsou velmi jemná ve srovnání s fibrilovanými, které zpravidla kruhový průřez nemají a dosahují i větších průměrů vláken, jak je možno pozorovat na obrázku č. 3. V případě skleněných vláken bývají hodnoty průměrů v rozmezí 3,5–20  $\mu\text{m}$ , u polymerních vláken 20–380  $\mu\text{m}$  [22].



*Obrázek 3: Monofilamentní polypropylenová vlákna (vlevo) a fibrilovaná polypropylenová vlákna (vpravo) [17]*

Výroba fibrilovaných vláken spočívá v řezání fólie podle požadovaných délek finálního vlákna. Průřez fibrilovaných vláken je hranatější a jejich povrch je výrazně drsnější než monofilamentních. Vyšší drsnost povrchu zajišťuje lepší soudržnost s betonem.

U jednotlivých vláken tedy kromě materiálových vlastností a způsobu výroby sledujeme další vlastnosti, které předurčují jejich vhodnost pro použití v konkrétních typech konstrukcí.

Sledovány jsou zejména tyto základní vlastnosti:

- materiál vlákna jeho chemické složení,
- geometrii vlákna, tj. délka, průměr a tvar vlákna,
- štíhlostní poměr,
- povrchová úprava vlákna, jeho drsnost,
- doporučené a vhodné dávkování.

Je celá řada vláken, která jsou využívána, anebo je možné, je využít do betonu, respektive jsou kompatibilní s cementovou matricí. Primárním dělením je především materiálová báze, která definuje a vymezuje užší oblast pro použití vlákna vzhledem k vlastnostem, které konkrétní vlákno charakterizují. Možností vyztužování betonu rozptýlenou výztuží ve formě vláken je celá řada. Vždy se odvíjí od konkrétního požadavku, který u výsledného materiálu očekáváme a jaké jsou jeho účely použití. Existuje nespočet variant vláken, která se používala ať už v historii nebo jsou aktuálním trendem při výrobě vláknobetonu. Vždy záleží na materiálu, z kterého je vlákno vyrobeno, jeho geometrickému uspořádání a dávce. Každé vlákno je vhodnější do vláknobetonu pro určitou aplikaci v závislosti na požadovaných vlastnostech betonu a jeho funkci v konstrukci.

Používají se úspěšně jak vlákna organická, tak i anorganická. Anorganická vlákna zastupují typ vláken vyrobených na bázi kovů nebo minerálů. V současné praxi se nejčastěji setkáváme s přidáváním vláken ocelových, které tvoří tzv. drátkobeton, nebo skleněnými vlákny ve sklovláknobetonu. V případě organických vláken dominují především polymerní vlákna.

### 3.5.1 Ocelová vlákna

Nejčastěji se ve složení vláknobetonu setkáváme s vlákny ocelovými. Najdeme je hlavně u konstrukčních plochých prvků – podlahy, komunikace, základové desky, chodníky, prefabrikované prvky, žáruvzdorné materiály (použití vláken z nerezové oceli) ale i u stříkaných betonů s uplatněním například u rekonstrukcí dopravních staveb (mosty) [7].

Primární funkcí ocelových vláken je eliminace a snížení vzniku trhlin a jejich rovnoměrné umístění v konstrukci. S tím souvisí jejich význam pro zvýšení pevnosti v tahu a ohybu betonového prvku, zlepšení houževnatosti a smykové pevnosti [18]. Ocelová vlákna mohou být míchána s betonovou hmotou jak v betonárnách, tak v betonových směsích na staveništi, což umožňuje pružnější plánování prací a samozřejmě pozitivní vliv na investiční náklady. V praxi bylo zjištěno, že s přidavkem ocelových vláken došlo k nárůstu množství vzduchu v drátkobetonu oproti prostému betonu, aniž by byly použity provzdušňovací přísady. To může mít zásadní dopad na pevnostní charakteristiky, ale také trvanlivost. Trvanlivost je zásadní problematika s životností materiálu, nevýhodou u ocelových vláken je možnost koroze drátků vlivem okolního prostředí, případně mechanické působení, pokud vlákna vyčnívají z povrchu [20].

Ocelová vlákna musí být zatříděna do jedné z následujících skupin dle základního materiálu použitého pro jejich výrobu:

- Skupina I: za studena tažený drát
- Skupina II: vlákna stříhaná z plechu
- Skupina III: vlákna oddělovaná z taveniny
- Skupina IV: vlákna protahovaná z drátu taženého za studena
- Skupina V: vlákna frézovaná z ocelového bloku.

Kromě třídění, jsou vlákna vyráběna v různých geometrických tvarech, průměrech a délkách pro rozdílné aplikace. Na obrázku č.19 je možné vidět některé varianty drátků používaných do betonu.



Obrázek 4: Druhy ocelových vláken do vláknobetonu [21]

Dávkování ocelových vláken do betonu se pohybuje v rozmezí 20–300 kg/m<sup>3</sup>, přičemž u stříkaného betonu 20–80 kg/m<sup>3</sup>. Průměr vlákna bývá 0,4–1,3 mm a délka 25–60 mm. Ocelová vlákna do betonu musí splňovat požadavky normy ČSN EN 14889-1.

### 3.5.2 Skleněná vlákna

Primárním záměrem k využívání skleněných vláken v kompozitech byla možnost jeho aplikace k vyztužování velmi tenkých deskových konstrukcí. Skleněné vlákno je amorfní materiál, který je vyráběn tažením z taveniny – dloužením proudu skla, který vytéká z platinových trysek s průměrem 1–2 mm. Vytažené vlákno je sdružováno do pramene a je navíjeno na buben. Ještě před navinutím se musí vlákno za horka opatřit tenkým ochranným povlakem, kterým bývá nejčastěji lubrikační vosk. Ochranné povlaky se využívají z důvodu, že skleněné vlákno je velmi lámavé a abrazivní. Vlákna musí být upravena pro vyšší odolnost v alkalickém prostředí cementového kamene, jednak úpravou chemického složení sklářského kmene a jednak lubrikací (velmi tenkým povlakem na povrchu vláken). Bez lubrikace by se vlákna díky jejich křehkosti mohla lámat, což je nežádoucí [22]. Lubrikace skleněných vláken je buď dočasná, kdy se po dokončení výroby odstraní a bývá nahrazena povrchovou úpravou kvůli lepšímu spolupůsobení vlákna s matricí. Pokud je lubrikace trvalá, plní jak ochranou funkci, tak i vazební funkci, právě pro

vazbu vlákno – matrice. Lubrikace navíc také pozitivně ovlivňuje rozmísení vláken ve směsi, aby bylo zabráněno tvorbě shluků [23].

Průměr skleněných vláken bývá obvykle od 3,5 do 20  $\mu\text{m}$ , přičemž vyhotovení je dostupné v několika podobách, buď ve formě krátkých vláken, dlouhých kontinuálních vláken, svazků tzv. rovingů nebo ve formě rohoží. Na obrázku č. 5 lze pozorovat struktura skleněných vláken.



*Obrázek 5: Skleněná vlákna [24]*

Skleněná vlákna mají široké pole využití v nejrůznějších matricích. Mezi matrice, kde jsou vlákna úspěšně využívána, je právě beton, respektive cementová matrice. Jednou z hlavních předností vyztužování betonových konstrukcí skleněným vláknem je jeho nízká cena, která se pohybuje kolem 250–350 Kč/kg. Navíc se skleněná vlákna vyznačují dobrými technickými vlastnostmi jako vysokou pevností, odolností vůči vysokým teplotám, nehořlavostí a dobrou chemickou odolností. V současnosti jsou hojně využívána v aplikacích pro vyztužování polymerních matric, anorganických materiálů, ale také do tepelně a zvukově izolačních stavebních materiálů. U sklovláknobetonových prvků se dávkování pohybuje kolem 100  $\text{kg}/\text{m}^3$  [22].

### 3.5.3 Čedičová vlákna

Mezi minerální vlákna, která lze využít do betonu, ovšem nevyžívají se ve větším měřítku, patří i vlákna čedičová. Čedič je nerost, který zaujímá zhruba 30 % zemské kůry. Jde o odolný, tvrdý materiál s jemnozrnnou strukturou. Vlákna čediče jsou vyráběna obdobnou technologií jako vlákna skleněná. Jsou tvořena dlouhými fibrilami, jak je vyobrazeno na obrázku č. 6, přičemž fibrily vznikají rozvlákňováním taveniny čediče.



*Obrázek 6: Čedičová vlákna [27]*

Čedičová vlákna se vyznačují dobrou ohebností, pevností, nehořlavostí, nenasákavostí, nízkou tepelnou vodivostí a vysokým elektrickým odporem. Díky jejich chemické a tepelné odolnosti se využívá zejména u tepelně a zvukově izolačních desek, potrubí, podlah a u rekonstrukcí a oprav železobetonových prvků. Jednou z negativních vlastností je křehkost čedičového vlákna.

V porovnání s jinými typy vláken např. skleněnými vlákny jsou levnější, uvádí se, že výroba čedičových vláken je méně energeticky náročná než výroba vláken skleněných. Navíc není potřeba použít dalších přísad k jejich homogenizaci a obohacení, jelikož k těmto procesům dochází samovolně v přírodě při vulkanických činnostech. Vlákna čediče se tak dají použít i do aplikací, kde se běžně používají jak skleněná, anebo dříve byla používána azbestová vlákna [28].



### 3.5.4 Polymerní vlákna

Mezi uměle vytvořená vlákna se primárně řadí polymerní vlákna, která jsou vyrobena z polymerních materiálů jako je například polypropylen (PP), polyethylen (PE), polyester, nylon, polyvinylalkohol (PVA), polyakryl, aramid nebo jejich směsi. S aktuálním trendem udržitelnost nejen ve stavebním průmyslu, ale také například oděvním, se do betonu začala komponovat například vlákna textilní nebo recyklovaná vlákna, která se společně s vlákny polymerními řadí mezi uměle vytvořená vlákna. Nejčastějším polymerním materiálem pro výrobu vláken jsou polypropylenová vlákna, která mají širokou škálu využití díky jejich specifickým vlastnostem. S tím souvisí i několik možných způsobů jejich výroby a geometrických vlastností, které jsou ustanoveny i v normě speciálně pro polymerní vlákna ČSN EN 14889-2, jak bylo zmíněno v předchozí kapitole 3.4 Požadavky na vlákna.

Nejpodstatnějším využitím polymerních vláken v betonu je jejich vliv na požární odolnost betonových konstrukcí. Když dojde u konstrukce k požáru, beton má tendenci k explozivnímu odprýskávání, z tohoto důvodu je nutné materiál od tohoto jevu co nejnáze ochránit. Hlavní příčinou explozivního odprýskávání je vysoký pórový tlak v betonu vyvolaný změnou skupenství vody z kapalné fáze na plynnou, který mnohonásobně převyšuje hodnotu pevnosti v tahu. Jednou z možností ochrany je právě použití polymerních vláken, ta totiž při určité teplotě roztaví a změní svůj objem a společně se změnou objemu a následným vyhoříváním vlákna dojde ve struktuře betonu k tvorbě sítě kanálků, které umožňují odpařování volné i vázané vody a pórový tlak se může do nově vzniklých pórů uvolnit. Právě díky tomu nedojde k explozivnímu odprýskávání povrchových vrstev betonu, která by měla za následek rychlou ztrátu pevností konstrukce a nebyla by zajištěna dostatečná ochrana. Teplota, při které dojde k tavení polymerních vláken, se nazývá teplota tání nebo bod měknutí. Další předností těchto vláken je odolnost vůči kyselému i zásaditému prostředí, nízká cena a nízká hmotnost [32].

V tabulce č. 2 jsou uvedeny vybrané vlastnosti některých polymerních vláken, jako je právě zmíněný bod tání, průměr vlákna, či pevnostní charakteristiky.

Tabulka 2: Vlastnosti polymerních vláken [33]

Druh vlákna	Průměr [mm]	Teplota tání [°C]	Modul pružnosti [GPa]	Pevnost v tahu [MPa]
Polypropylen	0,015–1,0	160–170	5–77	345–2100
Polyvinylalkohol	0,01	200	20–50	1200–1500
Polyethylen	0,09–0,03	120–135	80–120	3000

Co se týká nevýhod použití těchto vláken, se kterými se můžeme u tohoto druhu vláken setkat, je například jejich nízká hodnota modulu pružnosti, která se pohybuje v rozmezí 5–77 GPa, zejména ve srovnání s vlákny ocelovými, u kterých se udává nejčastější hodnota okolo 200 GPa, což je typická hodnota pro ocel. Se zvětšujícím se modulem pružnosti bude materiál vykazovat menší deformace při větším napětí. Další nepříznivou vlastností polymerních vláken je jejich vysoká deformovatelnost v čase nebo horší soudržnost s cementovou matricí v důsledku chemické setrvačnosti polypropylenových a polymerních materiálů obecně. Ke zmírněné nízké adhezi polypropylenových vláken k cementové matrici byly implementovány některá mechanická opatření, jako je poskytnutí příznivého tvaru vlákna (zvlněná, žebrovaná, fibrilovaná), která zvýší jejich přilnavost k matrici a tím nedochází k segregaci betonu [34].

Jedním z dalších způsobů, jak neoptimálněji podpořit jak soudržnost matrice s vlákny, tak i jejich dokonalé promísení a homogenizaci, aby nedocházelo k tvorbě shluků vláken, je ošetření povrchu PP vláken. Díky speciální úpravě povrchu vláken se tak vlákna v matrici snadno a rovnoměrně rozmísí i v běžných místních zařízeních (spádové míchačky na stavbách, cyklónové míchačky v betonárnách, autodomíchače). Polypropylenová vlákna do betonu mají nejčastěji délku 12 mm. Dávkování PP vláken do směsi vláknobetonu se nejčastěji pohybuje v rozmezí 0,8 až 1,1 kg/m<sup>3</sup> betonu [3].

### 3.5.5 Textilní vlákna

Aktuálně je kladen čím dál větší důraz na udržitelnost vyrobených materiálů. Oděvní průmysl je enormním zdrojem textilního odpadu, který je dále téměř nerecyklovatelný. Jsou tedy nyní snahy zakomponování textilních vláken do betonu. Vznikl tedy termín textilní beton. Použitím textilního betonu zejména ve štíhlých konstrukcích lze dosáhnout snížení potřeby primárních zdrojů (kamenivo, cement, přísady a příměsi) a zároveň snížení dopadu na životní prostředí.

Nekorodující vlastnosti výztuže tak poskytují výrazné snížení hmotnosti prvků až o 70 %, zejména minimalizaci krytí výztuže a zlepšení pevnostních parametrů. Zároveň je snížena i uhlíková stopa konstrukce, tj. redukce množství CO<sub>2</sub>, které je vpuštěno do atmosféry při produkci cementu a oceli. Textilní vlákna rovněž zamezují vzniku šíření mikrotrhlin v betonové konstrukci, které vznikají při zrání betonu nebo v místech lokálního namáhání [52]. Tento efekt platí obecně pro vlákna a přidáním vláken je tento pozitivní dopad očekáván.

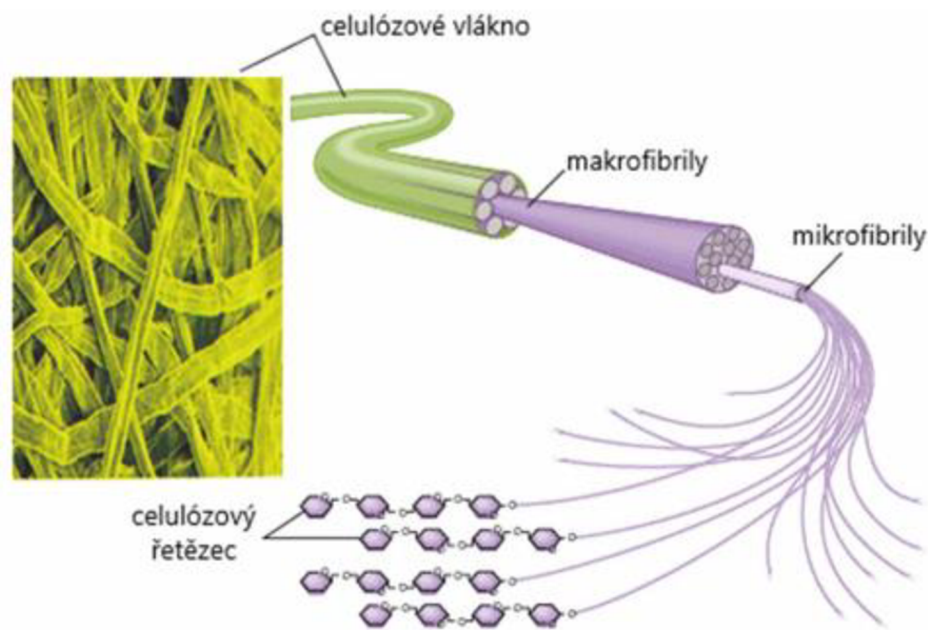
Rozhodujícím faktorem je spolupůsobení textilní výztuže a jemné betonové matrice, kde je kladen důraz na návrh jejího složení tak, aby pronikla do betonové matrice vlákna rovnoměrně. Pozornost je třeba věnovat alkalickému prostředí betonu, který může některé typy vláken textilií nenávratně poškodit. Na základě zmíněných vlastností se dá textilní beton využít u drobných mostních prvků nebo fasádní obkladových panelů [53].

### 3.5.6 Celulózová vlákna

V dnešní době je stavební průmysl nedílnou součástí ekologického znečištění naší planety. Stavebnictví nezahrnuje pouze environmentální náročnost samotné výstavby budov a jejich provozu, ale také celý životní cyklus budov od těžby surovin, výrobu samotných materiálů a dopravu až po demolici stavby či případnou recyklaci stavebních materiálů. Proto se klade větší důraz na výzkumy a zkoušení nových technologií a materiálů k eliminaci tohoto negativního dopadu. Jednou z cest, kde je hledán potenciální zdroj surovin, jsou přírodní obnovitelné zdroje. Škála těchto zdrojů je opravdu rozmanitá, může jít o dřevo, jutu, konopí, listy, len, kokos a mnoho dalších. Účelem úpravy těchto

materiálů je získání celulóзовých vláken jako výztuže s použitím do betonu a dalších aplikací, kde by takto získaná vlákna mohla být využita.

Celulóza je nejrozšířenější organická sloučenina s chemickým vzorcem  $C_6H_{10}O_5$  a její vlákna jsou složena z makrofibril, které jsou tvořeny mikrofibrilami, a se skládají z celulóзовých řetězců. Struktura celulóзовého vlákna je znázorněna na obrázku č.7.



Obrázek 7: Struktura celulóзовého vlákna [37]

Celulóza je významný obnovitelný zdroj, který doprovází další sloučeniny jako jsou pektiny, ligniny, a hemicelulóza. Najdeme ji téměř ve všech rostlinách v různém množství. Mladé listy stromů obsahují zhruba 10 % celulózy, starší listy 20 %, rostliny obsahují přibližně 33 %, dřevo přibližně 50 % a bavlna přibližně 90 % celulózy. Nejčastěji je získávána ze dřeva jehličnatých stromů odstraněním přebytečných složek (hemicelulóza, lignin, tuky, vosky) [37]. Dalším způsobem pro získání celulózy je mechanické broušení, kdy jsou klády dřeva přiváděny na rotující brusný kámen a následně po vaření dochází k rozvláknění dřevoviny společně s technologickými procesy praní, mletí, třídění, bělení a na závěr sušení. Druhým způsobem je chemickou metodou vaření štěpků dřeva v roztoku chemikálií, kdy získáváme čistá vlákna celulózy [36].

K již zmíněné trendu recyklace materiálů je možné získat vlákna celulózy recyklací starého papíru. Jednou z možností je jeho rozvláknění chemickým způsobem, kdy se odstraní nečistoty (tisková barva) ovšem nedokonale, část jich v surovině zůstane, proto je nutné je po rozvláknění ještě prát. Poté probíhá obdobný proces jako u mechanického postupu, tedy třídění, čištění, bělení a sušení [36].

Dále je možné rozdužení vlákna z vhodného recyklovaného papíru mechanickým způsobem, kdy nejprve dojde magneticky ke zbavení nečistot a poté k drcení v rozvláknovací turbíně, což je mlýn s vířivým proudem. Turbína následně extrahuje buničinu ve formě vláken, která jsou dále upravována přísadami kyseliny borité nebo síranu hořečnatého, přičemž tyto složky pozitivně ovlivňují zvýšení požární odolnosti, ochranu proti plísním a škůdcům [36].

Celulózová vlákna jsou hygroskopická a jsou schopna absorbovat vlhkost až 85 % jejich hmotnosti a udržet vlhkost v okolí vlákna. Díky tomu dochází k jejich dobrému ukotvení a spojení mezi vlákny a maticí. Na rozdíl od skleněných vláken nekorodují ve vysoce alkalickém prostředí betonu. Použitím celulózové rozptýlené výztuže je zvýšena odolnost proti rázu, kde vlákna nárazem absorbují a následně se rozptýlí. Také se dají využít v kombinaci s ocelovou výztuží, zejména v oblastech seismických aktivit [51]. Využití také mají u prefabrikovaných dílců, jejichž přísadami je snazší odformování a je zvýšena manipulační pevnost výrobku.

Výhodou použití celulózových vláken je jejich vysoká dostupnost ve všech částech světa, nízká cena a nízká objemová hmotnost. V případě použití vláken s vysokým obsahem sacharidů je nutné provést i proces mineralizace, jelikož sacharidy zpomalují hydrataci cementu. Vlákna jsou tak na několik dní uložena ve vápenném mléku, čímž získají vlastností a charakteristik anorganického plniva. Využití ve stavebnictví nachází zejména u pevnostně méně náročných prvků a lehkých dílců. Před zakomponováním do betonu je nutné je důsledně naimpregnovat [37].

Naopak nehomogenita těchto vláken je jedním z negativních faktorů pro jejich použití zejména z hlediska rozdílů mechanických vlastností. To je způsobeno například

různými podmínkami jejich růstu. Obecně přírodní vlákna bývají náchylná k degradaci vlivem vlhkosti prostředí a bakteriím. Co se týče délky vlákna, tak například výrobce celulósových vláken CHRYSO pro typ Fibre UF-500 udává délku 1,9–2,3 mm, což je v porovnání s například s polymerním vláknem stejného výrobce CHRYSO S 25 s délkou 25 mm razantně nižší.

### 3.5.7 Recyklovaná vlákna

Podobně jako je tomu u vláken textilních z hlediska stále se zvyšujícího tlaku na využití druhotných materiálů a šetrnosti k čerpání neobnovitelných zdrojů, jsou hledány možné alternativy pro výrobu vláken z recyklovatelných surovin. Kromě textilních vláken a celulósových vláken, která byla již zmíněna, je snaha o využití formou recyklace velmi znatelná napříč různými materiály. Aktuální trend udržitelnosti materiálů se mimo jiné dotýká pochopitelně i oblasti stavebnictví, která má velký podíl na naše životní prostředí. Regulace přichází nejen z iniciativy technologických pokroků k využití druhotných materiálů, které ve své původní působnosti již nenachází využití, ale také z legislativy. Nová evropská legislativa vyžaduje šetrnost stavebních výrobků k životnímu prostředí. Nahrazení doposud platné evropské Směrnice Rady 89/106/EHS novým nařízením Evropského parlamentu a Rady EU č. 305/2011, nově zavádí požadavek na udržitelné využívání přírodních zdrojů. Tento požadavek stanoví, že: „Stavba musí být navržena, provedena a zbourána takovým způsobem, aby bylo zajištěno udržitelné použití přírodních zdrojů a také:

- recyklovatelnost staveb, použitých materiálů a částí po zbourání
- trvanlivost staveb
- použití surovin a druhotných materiálů šetrných k životnímu prostředí při stavbě [30].“

Nejvýznamnější a nejvíce diskutovanou skupinou materiálů, které je věnována pozornost v recyklaci, je skupina polymerů. Jde o velmi širokou a rozmanitou skupinu materiálů s velkým rozptylem disponujících vlastností. Produkce plastů je velmi rozšířená a nepřetržitě rostoucí s ohledem na univerzálnost plastového materiálu, nízké výrobní ceny, doby trvanlivosti. Mezi nejpoužívanější plasty řadíme polyolefiny jako polyethylen

(PE) a polypropylen (PP), se kterými se denně setkáváme buď v obalové technice, elektrotechnice, zdravotnictví a i stavebnictví. Plastová produkce v globálu roste, v Evropě je celkem stabilní. Nejvhodnějším řešením přebytků s ohledem na dopad na životního prostředí plastových materiálů je recyklace, ačkoliv skládkování je stále nejčastějším způsobem jeho likvidaci navzdory špatné biologické rozložitelnosti. Vlastnost dlouhé životnosti činí likvidaci plastového odpadu velmi závažným problémem pro životní prostředí a rovnováhu ekosystému.

Jednou z možností, jak získat recyklovaná vlákna, je nastříhání plastových lahví vyrobených z polyethylentereftalátu (PET). Výhodou použití recyklovaných plastových materiálů PET vláken je nenáročnost jejich výroby, jelikož stačí jejich jednoduché nastříhání na proužky nebo kruhová vlákna. Dalším plusem při použití recyklovaného PET vlákna je jeho chemická inertnost, nižší hmotnost při stejném počtu jako u vláken ocelových a zároveň lepší kontrola nad vznikem trhlin vlivem plastického smrštění. Makrovlákna získaná z recyklovaných PET lahví jsou znázorněna na obrázku č. 8, kde jsou vidět dvě varianty vláken, a to proužky a kruhová vlákna.



*Obrázek 8: Vlákna z PET proužků (vlevo), kruhová PET vlákna (vpravo) [31]*

Uměle vytvořená vlákna mohou mít různé hodnoty modulů pružnosti a je možné je potom rozdělit na vlákna s vysokým modulem pružnosti, mezi které řadíme uhlíková, aramidová a akrylová vlákna. Tato vlákna bývají nákladnější na výrobu. Vlákna s nižším modulem pružnosti jsou např. vlákna z polyethylenu, polypropylenu, polyesteru a nylonu.

Výroba je méně nákladná, ovšem jejich použitím nejsou výrazně zvýšeny tahové pevnosti betonu, ale vliv mají v účinnosti při vzniku trhlin [31].

Už přidáním velmi malého množství PET vláken do betonu, získává beton vyšší tuhost a odolnosti proti nárazu, jelikož vzniklé praskliny se dále volně nešíří skrz konstrukční prvek a vyvozené zatížení je pomocí sítě vytvořené z vláken rozneseno do větší plochy. K samotnému šíření trhlin je zabráněno právě recyklovanými vlákny, podobně jako jinými vlákna, jejichž vlastnosti v matrici betonu je vytvoření trojrozměrné síťoviny zachycující trhliny. Vlivem toho nedochází k náhlému porušení betonu. Jedním z dalších pozitiv je nepatrné zlepšení tepelné vodivosti betonu použitím PET vláken buď z plastových vláken nebo například i kousky odpadních pneumatik [31].

Snížení zpracovatelnosti čerstvého vláknobetonu je velkou nevýhodou použití tohoto druhu vláken, proto je regulován obsah přidání do 1 % hmotnosti betonu. Při překročení této hranice by mohlo dojít k segregaci betonu, což je nežádoucí. Zásadní vliv přídavku vláken se však týká v menší či větší míře všech vláken, která se do betonu přidávají.

### 3.6 Použití vláknobetonu

Jak je ve stavebnictví známo, beton může mít nespočet podob. Pokrok v technologických postupech, vývoji materiálů se projevuje i v oblasti betonů s rozptýlenou výztuží tedy vláknobetonu. Mezi nejběžnější aplikace tohoto betonového kompozitu patří například průmyslové podlahy, komunikace, letištní a parkovací plochy, nebo i základové desky. Díky velkému počtu výzkumů se jeho spektrum využití stále rozšiřuje a možnosti jeho aplikace se v kontextu kladení důrazu na zvýšení trvanlivosti materiálů stále posouvají. Jedním z možných novějších směrů je kombinace běžné ocelové výztuže spolu s rozptýlenou výztuží ve formě vláken, který doznává výrazných přínosů u náročnějších konstrukčních prvků.

Výrazné uplatnění u výroby segmentů pro ostění tunelů našla polymerní vlákna, která pozitivně ovlivňují odolnost proti odprýskání betonu při požáru a tím výrazně



přispěla ke zvýšení požární odolnosti betonových prvků. Doposud provedené aplikace vláknobetonu prokázaly, že vlákna přidaná do betonu zlepšují vlastnosti ztvrdlého betonu jako například pevnost v tahu nebo požární odolnost, a při jeho vhodném využití lze dospět zvýšené životnosti a bezpečnosti konstrukce.

### 3.6.1 Princip působení vláken v betonu

Vlákna společně s betonovou maticí tvoří dvoufázový kompozitní materiál tzv. vláknobeton. Vlákna zakomponovaná do složení betonu mohou plnit různé účely. Ocelová vlákna jsou nejčastěji spojována s konstrukční funkcí, zatímco polymerní nebo skleněná používáme pro omezení vzniku trhlin ve struktuře betonu, které mohou vznikat vlivem objemových změn či zatížením. Parametry vláken jako je jejich množství, tvar, délka, tloušťka a materiál, ze kterého jsou vyrobeny, tak ovlivňují výsledné vlastnosti kompozitu například tahové pevnosti, tlaková pevnost není jejich použitím nijak výrazně ovlivněna. Musí se ovšem respektovat i nepříznivý vliv vláken na konzistenci, kdy je potřeba zajistit především správnou distribuci vláken v betonu, dostatečně zhutnění, aby nedocházelo k tvorbě shluků vláken a tím nebyly ovlivněny mechanické vlastnosti koncového výrobku.

Při tahových napětích je matrice porušena trhlinou, načež nastává aktivace vláken, kdy již nefunkční beton v oblasti tahových napětí zastoupí vlákno, které z části přebere tahová napětí a přenáší je přes zakotvené části cementové matrici. Toto však působí jen omezeně do určité míry. Působení vláken se odvíjí od materiálových charakteristik jako je pevnost, modul pružnosti, soudržnost s betonem případně mechanické zakotvení. V případě vláken ocelových, která mají poměrně vysoké hodnoty pevností a modulu pružnosti, dochází k aktivaci velmi rychle i při malém rozevření trhliny. Pokud poté dochází k dalšímu namáhání, vzrůstá v nich tahová síla, která dosahuje takových hodnot, že ještě před jejich samotným přetržením, dojde k porušení soudržnosti a kotvení. Následkem je tedy vytáhnutí ocelových vláken z matrice betonu. Z tohoto důvodu se klade důraz na kotvení ocelových vláken a co nejvyšší soudržnost s cementovou maticí, kterou můžeme podpořit úpravou koncové oblasti vlákna, případně povrchu vlákna. Nejen zakončení vláken hraje roli při tom, zda dojde k vytržení nebo vytažení drátku z betonu. Ovlivňuje jej

i úhel, kterým překlenuje vznikající trhlinu. V rámci výzkumných prací byly zveřejněny výsledky pozorování vlivu působení drátků při různé kotevní délce. Zkoušeny byly ocelové drátky o délce 60 mm a průměru 1 mm s jedenkrát zalomenou koncovou úpravou, přičemž drátky kolmo na povrch byly vytaženy ze struktury betonu ve 100 % případech, naopak u šikmých drátků došlo k jejich přetržení ve více než 50 % případech. Únosnost šikmých drátků byla větší, ale jejich tuhost byla menší než u drátků kolmých k povrchu. Bylo zároveň prokázáno, že vliv měla i koncová úprava drátků [38].

U vláken z polymerních materiálů, která jsou hned po ocelových často vyhledávána jako další složka betonu, dochází k aktivaci po vzniku trhliny a následnému protažení vlákna, jelikož jejich modul pružnosti je výrazně nižší. V porovnání s ocelovými vlákny je tak zaznamenán větší pokles únosnosti. Následně se vlákna opětovně aktivují a nastává oblast jejich maximálního využití, kdy únosnost zatěžovaného prvku vlivem vláken opět vzroste. Pak nastane konečné porušení, kdy se začnou vlákna trhat. Vlákna z polymerních materiálů se na rozdíl od ocelových vláken zpravidla nevytahují, protože jsou lépe zakotvena a dojde k jejich přetržení. Jak již bylo uvedeno, polymerní vlákna mají zpravidla nižší modul pružnosti, který je téměř srovnatelný s modulem betonu v době počátku tuhnutí. Během této doby je beton citlivý na jakékoliv porušení, zde tedy vlákna působí i jako výztuž. Po zatvrdnutí betonu jsou vlákna schopna částečně roznášet zatížení při zatížení, ale nedá se uvažovat jejich statické působení. Obvyklou a unikátní funkcí polymerních vláken je zvyšování odolnosti proti požáru [38]. Tato závislost je podrobně přiblížena v následující kapitole 3.6.2 Požární odolnost betonu.

### 3.6.2 Požární odolnost betonu

V kontextu nejběžnějších stavebních materiálů pro budovy a občanskou infrastrukturu je beton na prvním místě, co se týká používaných materiálů, kde předpokládána odolnost při vystavení vysokým teplotám a požáru, zejména v dopravních infrastrukturách, ale také v občanské a bytové výstavbě. V mezinárodních normách jsou definovány proměnné, kterým je jeho výkon v těchto ohledech hodnocen, a zároveň v nich jsou obsažena doporučení ke splnění strukturálních požadavků pro tyto případy jako např.

minimální betonové krytí pro konkrétní požární odolnost v případě železobetonových konstrukcí, nebo i základ pro pokročilé metody numerického modelování pro stanovení odolnosti daného typu profilu vůči vysokým teplotám odpovídajících působení požáru.

### 3.6.2.1 Historie působení vysokých teplot na beton

V minulosti bylo konkrétní zaměření výzkumu směřováno ke strukturnímu chování materiálu za vysokých teplot, což vyplývalo z rozvoje jaderných elektráren kolem roku 1970, jejichž reaktory byly vyráběny právě z betonu. Po roce 1980 se výzkum ubíral směrem k vysoce pevným betonům HSC (High Strength Concrete), který měl kompaktnější mikrostrukturu než standardní beton. Právě tato hutná vnitřní struktura je příčinou citlivosti HSC na rozštěpení betonového povrchu v teplých elementech. Tento jev je znám jako odprýskávání nebo také spalling, ke kterému dochází vlivem vznikajícího napětí od teplotních přechodů a termální nekompatibility různých složek železobetonových prvků: cementového kamene, kameniva, ocelové výztuže, přičemž každá složka disponuje různým koeficientem teplotní roztažnosti. Jednou z dalších příčin spallingu je dehydratace C-S-H gelu a rozklad portlanditu, přičemž se odpařuje vodní pára, což způsobuje zvýšení tlaku v pórech betonu [40].

Právě z tohoto důvodu je spalling jeden z problémů bezpečnostních kritérií u betonových či železobetonových konstrukcí. Konkrétními příklady jsou požární katastrofy v Eurotunelu La Manche v roce 1996, v roce 1999 tunel Tauern v Rakousku nebo tunel Mont Blanc v roce 1999 ve Francii, kde na obrázku č.9 je možno vidět fotografii místa katastrofy.



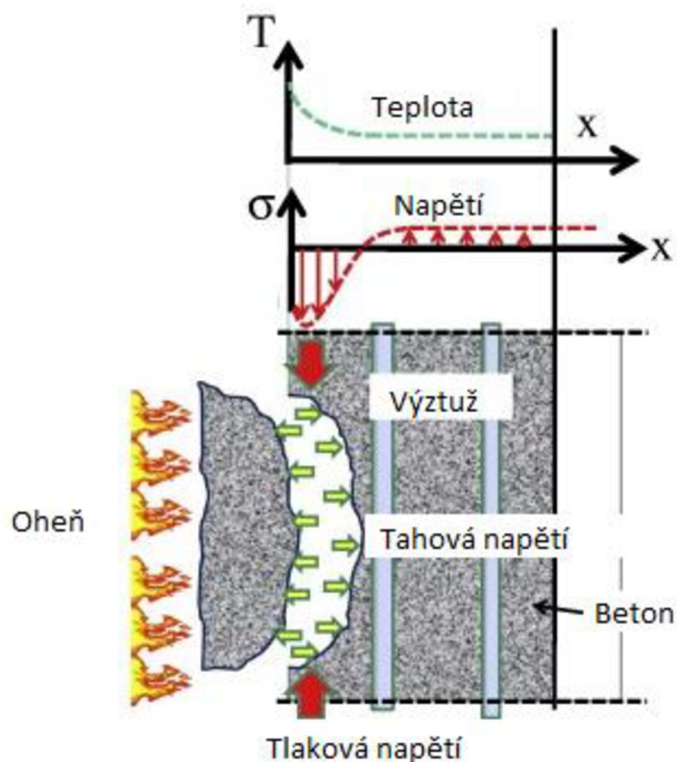
*Obrázek 9: Požární katastrofa v tunelu Mont Blanc ve Francii [43]*

U těchto případů došlo k tepelné explozi ve stísněném prostředí, vysoce rychlý nárůst teploty vedl k silnému poškození betonu formou odlupování a odstřelování velkých kusů betonu. Konstrukční část byla rapidně redukována a tím docházelo k odkrytí vnitřních vrstev struktury, čímž byla narušena bezpečnost konstrukčních hodnot návrhových zatížení [40].

### 3.6.2.2 Explosivní odprýskávání betonu

Jak již bylo zmíněno, odprýskávání betonu při extrémně vysokých teplotách může mít u betonu velmi vážná bezpečnostní rizika, která mohou vyústit ve fatální havárie, ke kterým došlo v minulosti především u stavebních konstrukci tunelů. Jedná se o specifické podmínky, které souvisí především s typem konstrukce, umístěním a jsou zde velmi omezené evakuační podmínky. Právě v tunelech je výrazně vyšší vlhkost prostředí pohybující se kolem hodnoty 75 % oproti běžným budovám, kde se udává hodnota okolo 50 %. Právě proto jsou tunely vnímány jako vysoce rizikové konstrukce ke vzniku explozivního odprýskávání betonového ostění při požáru. Explosivní odprýskávání betonu může mít za následek snížení mechanických vlastností konstrukce, které může vést až ke zhroucení. Je tedy nutné se tomuto katastrofálnímu selhání betonu vyhnout, přičemž jednou z možností je právě použití vláken do betonu [44].

K odprýskávání dochází v různých formách, může dojít ke spallingu kameniva, rohů, povrchu betonu nebo odlupování betonu jak při požáru, tak i po hašení, přičemž každá z těchto forem má svůj vlastní mechanismus. Příčinou odprýskávání při pórovém tlaku je nárůst tlaků páry v pórech betonu, kdy dochází k přechodu kapaliny ve struktuře betonu na plynnou fázi. Při průběhu této přeměny dochází k nárůstu objemu a zvýšení tlaku. Jednou z klíčových vlastností je propustnost betonu, kdy struktura ztvrdlého betonu obsahuje póry, které v sobě nesou různou vlhkost v závislosti na prostředí, kde se konstrukce nachází, nebo i na jejím stáří. Pokud je tedy systém pórů v betonu dostatečně kompaktní, vznikající pára má možnost se v nich rozpínat a nemusí nutně dojít k deformacím a iniciaci trhlin. Ovšem v méně pórovitých betonech tento tlak namáhá beton tlakovým i tahovým napětím, kdy konstrukce již není schopna odolávat těmto jevům a dojde k explozivnímu odprýskávání [44],[45]. Schematicky je mechanismus odprýsknutí betonu znázorněn na obrázku č. 10, kde je vidět působení teploty s rostoucím napětím směrem od ohřívaného povrchu betonové konstrukce.



Obrázek 10: Mechanismus explozivního odprýskávání betonu při požáru [46]

Další formu odprýskávání je spalling v důsledku napětí od změny teploty související s tepelnou roztažností betonu, poměru tepla a pevnosti betonu v tahu. Pokud je beton zahříván, dochází k tvorbě teplotních gradientů způsobujících napětí v tlaku v blízkosti zahřívajícího povrchu a napětí v tahu v chladnějších spodních vrstvách betonu [44]. Navíc v železobetonových konstrukcích je nutné uvažovat i s výztuží, která už při teplotách okolo 450 °C začíná být náchylná ke ztrátě svých mechanických vlastností, proto je nutné, aby beton výztuž chránil po co nejdelší možnou dobu, s čímž souvisí při návrhu konstrukce krycí vrstva výztuže. Soudržnost betonu a výztuže bývá za normálních podmínek založena na jejich podobné hodnotě součinitele teplotní roztažnosti, který je pro ocel stanoven na  $13 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  a pro beton je hodnota  $14,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . Při zvyšující se teplotě nad 100 °C se součinitel teplotní roztažnosti betonu a oceli začíná lišit, jelikož u oceli hodnota narůstá, což vede k rozpínání výztuže v betonu souvisejícího se vznikem napětí v materiálu a nepříznivému snižování soudržnosti mezi betonem a ocelovou výztuží.

Explozivní odprýskávání betonu při požáru bývá často právě kombinací obou popsanych druhů spallingu. Jak v důsledku vlivu pórového tlaku, tak i tlaku v oblasti betonového povrchu vystaveného teplotnímu namáhání, při nichž dochází ke vzniku trhlin uvnitř struktury betonu. Trhliny se tvoří paralelně s povrchem, pokud je součet napětí větší než pevnost materiálu v tahu. To je doprovázeno náhlým uvolněním energie a prudkým zhroucením části rozžhaveného povrchu. Ačkoliv se tento jev podrobuje několika výzkumům a testování, nebyla zatím nalezena univerzální predikce odprýskávání betonu. Bylo již použito několik metod (numerické, teoretické, nomografické), ale zatím žádná nesplňovala všechna nutná kritéria [44].

### 3.6.2.3 Eliminace explozivního odprýskávání

Kvůli zmíněným požárním katastrofám byl v posledních dvou desetiletích výzkum zaměřen na přidávání vláken do betonu za účelem zvýšení požární odolnosti betonu, který je vystaven extrémně vysokým teplotám simulujícím požár. Nejde o jedinou možnost, jak můžeme k eliminaci tohoto jevu přispět. Existuje také několik studií, které pracují například s komplexním řešením pro zvýšení požární odolnosti a ucelený soubor opatření zajistí

zvýšenou odolnost betonu vůči působení vysokých teplot, ale především předchází odprýskávání, které vyvolává velké bezpečnostní riziko. Zásadní částí těchto opatření společně s vhodně zvolenými vlákny a jejich dávkou, je také zastoupení ostatních složek betonu, především jejich vhodná volba. Dobře zvolená kompozice složení betonu společně s vlákny je velmi účinným řešením proti odprýskávání betonu a vyšší odolnosti při působení požáru.

V několika výzkumech bylo prokázáno, že u polypropylenových vláken dochází k tavení materiálu kolem 170 °C, což je dostačující hodnota pro kontrolu odprýskávání betonové konstrukce. Jejich tavením uvnitř betonové struktury se vytváří sítě kapilárních pórů, které umožňují uvolňování vodní páry generované dehydratačními reakcemi [40]. Vlákna se tedy ne vždy primárně používají jako konstrukční výztuže, nýbrž pro zlepšení požární odolnosti betonu.

Při využití ocelových vláken některé výzkumy naopak uvádí, že struktura těchto vláken přispívá k urychlení zahřívání betonu a tím může být beton náchylnější k produkci vnitřních mikrotrhlin v důsledku neslučitelnosti s betonovou maticí a také různým hodnotám teplotní roztažnosti. Nedávné výzkumy studovaly hybridně vyztužený beton, který ve svém složení zahrnuje kombinaci jak vláken polypropylenových, tak vláken ocelových. Experimentální výsledky ukázaly synergii obou typů vláken při zlepšování mechanických vlastností betonu vystaveného vysokým teplotám [20].

Aktuální verze evropské normy pro strukturu betonu poskytuje tabulková data pro vývoj mechanických vlastností betonů vystavených zvýšeným teplotám. Norma má však nedostatek údajů pro případ vysokopevnostních betonů při použití rozdílných typů kameniva. Navíc tato norma neobsahuje data pro vláknobeton vystavený vysokým teplotám. Vhodná volba kameniva, vzhledem k jeho zastoupení v betonu, je velmi důležitou složkou v oblasti odolnosti betonu při teplotách požáru. Každé kamenivo má jiné chemické a fyzikální vlastnosti, které mohou významně ovlivnit chování betonu vystavenému extrémně vysokým teplotám. Jednou z nejvíce sledovaných vlastností je koeficient teplotní deformace kameniva, která se odvíjí od mineralogického složení.

Konkrétní dobře známý příklad je např. u křemičitého kameniva, kdy při teplotě 574 °C dochází k fázové přeměně  $\beta$  – křemene, který není mineralogicky stabilní, na  $\alpha$  – křemen, přičemž tato změna je doprovázena zvýšením objemu až o 5 %. Expanze zapříčiní v mikrostruktuře namáhání a v případě, že budou překročeny tahové pevnosti jednotlivých komponent materiálu, dojde k makroskopickým projevům ve formě trhlin a ztrátě mechanických charakteristik. Z tohoto důvodu je vhodné vybrat do receptury betonu jiný druh kameniva, kdy dochází ke změnám na fázových rozhraních při vyšších teplotách, jako je tomu u kameniva vápencového, kdy k objemovým změnám dochází při teplotách vyšších jak 700 °C [38].

Na chování betonu při vystavení vysokým teplotám má vliv kromě vhodného výběru kameniva i výběr cementu. Cement s vysokým obsahem portlandského slínku je méně vhodný, protože již při teplotách kolem 400 °C dochází k transportu vody a rozkladu portlanditu podle chemické rovnice  $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$ . Zvýšením obsahu CaO v cementovém tmelu, nebo chlazení, kdy dojde expanzi vlivem reakce CaO s vodou, může dojít k rozpadu betonu [38]. Jak vyplývá z výběru kameniva vhodného pro betony vystavené extrémně vysokým teplotám, je na místě použít do receptury například portlandský směsný beton s vápencem CEM II/A-L, případně jinou alternativu než samostatný portlandský cement CEM I.

### 3.6.3 Možné aplikace vláknobetonu

Odolnost betonu vůči vysokým teplotám při požáru a jeho spojení s využitím polymerních vláken, je velmi důležitým tématem, protože se dotýká otázek bezpečnosti. Ale aplikací, kde je možné se s vlákny v betonu setkat, je celá řada. S vláknobetom se ve stavebnictví dále můžeme setkat u prefabrikovaných dílců využívaných pro pozemní stavby a komunikace, konkrétně u kanalizačních rour, železničních pražců, mostních říms tvořící pohledový líc mostu. Tento typ konstrukcí bývá často vystaven značnému namáhání, působení atmosférických vlivů a solí. U těchto prvků je tedy nutné eliminovat vznik a rozvoj trhlin od objemových změn, kvůli zachování estetických požadavků při



pohledu na mostní římsu a také pro dosažení zvýšení soudržnosti kotev římsových prvků a zabránění korozi úchytných prvků a eliminaci nebezpečí vytržení kotev [41].

Díky tvárnému chování vláknobetonu, které zajistí příznivý charakter porušení prvku a zároveň zamezí nebezpečnému porušení křehkým lomem, je možné redukovat množství klasické ocelové betonářské výztuže. Příkladem může být vyzkoušený vláknobetonový nenosný prvek mostní římsy s jednaprocentním obsahem polypropylenových vláken, který v roce 2008 vyhrál ocenění v soutěži Inovace roku. Prvek umožnil vyrábět subtilnější konstrukce, aniž by docházelo k poškození mostního římsového prefabrikátu při dopravě a osazování prvku. U tohoto druhu prvku se setkáváme s přísnými požadavky jak na trvanlivost vláknobetonu, tak i náročnost vyhovění velkému zatížení klimatickými podmínkami či působení chemickému prostředí [41].

V případě nosných prvků nachází své využití v panelové výrobě u průmyslové výstavby. Jedná se o různé fasádní panely, nosníky, vazníky nebo střešní prvky. Výhody použití vláknobetonu nalezneme i u jeho využití při výrobě segmentů tunelového ostění, kdy se často využívají ocelová vlákna. Pro tento typ použití ale musí být splněny kvalitativní požadavky prostředí, proto se s tímto typem setkáváme zejména v Severní Evropě, kde je horninové prostředí velmi kvalitní. Výhodu použití vláknobetonu je dosaženo hlavně výbornou propustností mezi pruty výztuže, jednodušším armováním a samozřejmě omezením vznikem trhlin. Další příznivou vlastností použití ocelových vláken je trvanlivost a úspora finančních nákladů spojených s realizací (úspora výztuže a energie, menší pracnost) i například omezením produkce CO<sub>2</sub>, díky čemuž je napomáháno i životnímu prostředí [41].

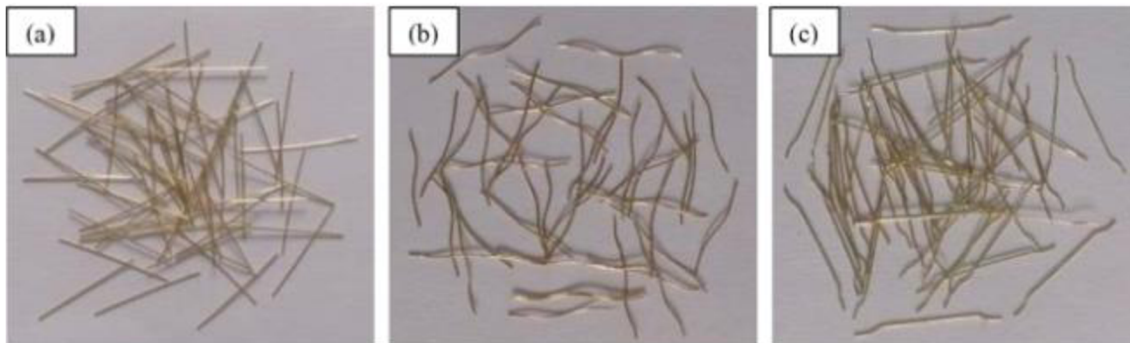
Vhodně vybraný materiál pro konstrukci hraje významnou roli při posuzování hospodárnosti konstrukce s ohledem na trvanlivost a životnost. Vláknobetonové tyto požadavky splňují v rámci dostatečných hodnot jak spolehlivosti, tak únosných a použitelných požadavků. U zmíněných příkladů použití výše, využitím vláknobetonu můžeme těchto parametrů u výsledné konstrukce spolehlivě dosáhnout.

## 4. Praktická část

Konkrétní vlastnosti jednotlivých druhů vláken, především z pohledu jejich materiálové báze a geometrie, se odráží na vlastnostech vláknobetonu, tj. základní fyzikální a mechanické vlastnosti jsou pak tímto druhem výběru ovlivněny. Specifickou oblastí je pak aplikace vybraných druhů vláken v případech, kdy je očekáváno zatížení konstrukce extrémně vysokými teplotami. Zde je očekávána především celková odolnost konstrukce, kde je zásadní také samotné složení betonu.

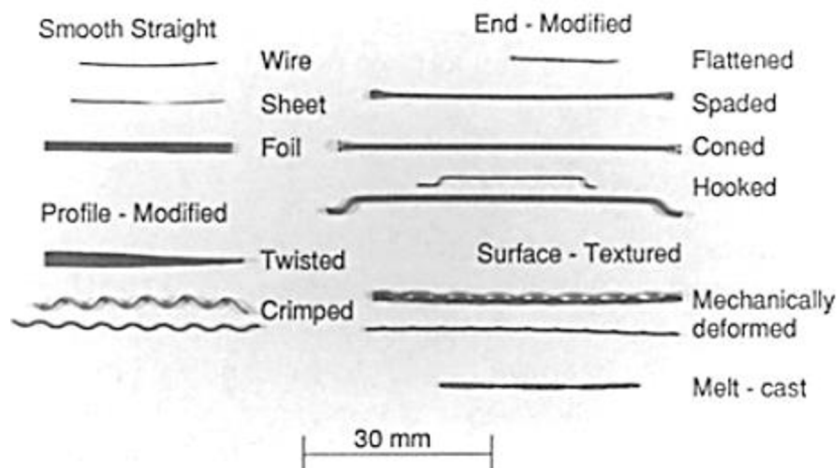
### 4.1 Vhodná geometrie vlákna pro vláknobeton

Jelikož je několik druhů vláken z pohledu materiálové báze, existuje velká rozmanitost těchto vláken. Hned po volbě materiálu je zásadní geometrie použitých vláken, které je taktéž poměrně rozmanitá, a co se týká délky, tak je ve své podstatě velmi variabilní. Vnitřní geometrické charakteristiky vlákna a povaha vazby mezi vlákny a cementovou maticí jsou do určité míry kontrolovatelné a měnitelné. Geometrie vlákna má velký vliv na výsledné vlastnosti betonu, ve kterém jsou vlákna obsažena. Kromě množství dávky vláken a jejich různých délek, může mít na výsledné vlastnosti betonu vliv také tvar vlákna, poměr stran vlákna a pevnost matrice. S tím velmi úzce souvisí i zakotvení a soudržnost vlákna s cementovou maticí. Cílem úpravy tvaru vlákna je dosažení lepšího ukotvení v matici tak, aby bylo příznivě ovlivněno chování prvku v místě možného vzniku trhliny nebo zabráněné jejímu šíření. Vlákna mohou mít různou tvarovou podobu, na obrázku č.11 je například vidět ocelové vlákno rovné (a), zvlněné (b) a zahnuté (c). Možných variant podob tvarů vláken je spousta, přičemž každý výrobce se snaží o co nejatraktivnější variantu a nejúčinnější variantu vlákna pro dosažení potřebného zakotvení a soudržnosti v matici. To je předpokladem pro účinnou funkci vlákna.



Obrázek 11: Různé tvary ocelových vláken [42]

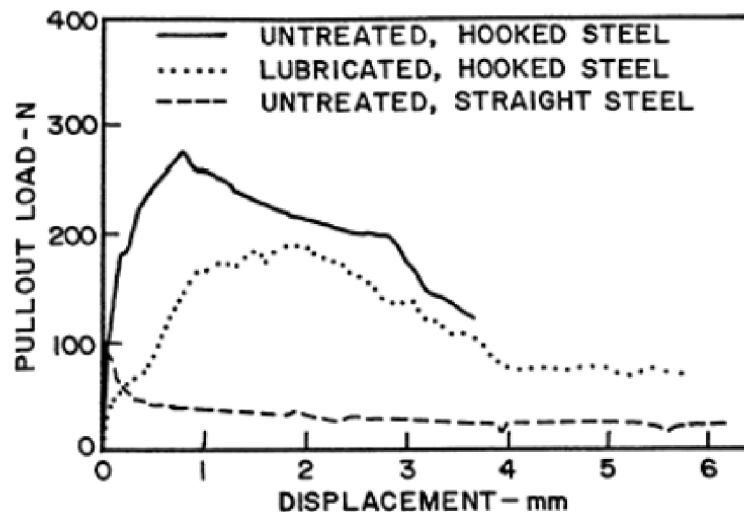
Inovace kombinující snížení délky vláken nebo štíhlostní poměr definovaný jako poměr délky vlákna k ekvivalentnímu průměru vlákna, tak minimalizují nepříznivé účinky vysokého poměru stran na konzistenci a zpracovatelnost při míchání a zpracování čerstvého betonu. Zároveň však dochází ke zvýšení odolnosti proti vytažení vláken, což zlepšuje účinnost vyztužení ve ztvrdlém stavu. Rovná monofilamentní vlákna jednotného průřezu jsou tedy využívány méně často. Nyní jsou spíše používána zvlňená a zahnutá vlákna, případně v jiných dvourozměrných či trojrozměrných tvarech, což je vidět na obrázku č. 12 společně s dalšími variantami tvarů ocelových vláken [54].



Obrázek 12: Varianty geometrických tvarů ocelových vláken [54]

Navrhováním zakončení nebo úpravou do různých profilů ocelových vláken byly zkoumány závislosti na odolnost vlákna proti vytažení. Počínaje patentem ocelových vláken ve tvaru prstenců v roce 1931, pokračující v 90. letech s vlákny s konci kuželovitými [49] (Destrée a Sahloul, 1991) nebo vlákny s profilem připomínající kancelářské sponky

[50] (Rossi a Chanvillard, 1994). Zvýšení odolnosti proti vytažení vláken se zahnutými konci byla prokázána zkouškou vytažení jednoho vlákna, což je znázorněno na obrázku č. 13, kde je znázorněna závislost síly, která je nutná k vytažení rovného a zahnutého vlákna z matrice [54].

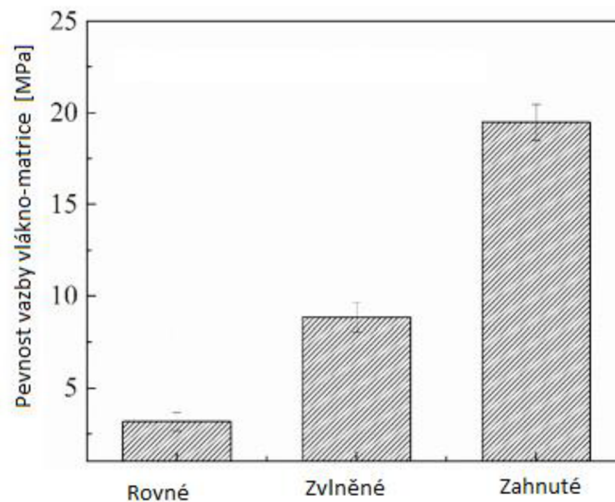


Obrázek 13: Porovnání odolnosti proti vytažení rovných a zahnutých ocelových vláken [54]

V jedné ze svých studií se Naaman a Najm [48] zabývali konkrétně tvarem ocelového vlákna, respektive která tvarová podoba je vůbec nejpříznivější proti vytažení vlákna z matrice. Zejména šlo o porovnání rovného vlákna, vlákna se zahnutými konci a tvarovaného vlákna v celé délce (dále již pouze tvarovaná), nikoliv pouze s tvarovaným zakončením. Výsledky jejich studie jednoznačně prokázaly, že tvarovaná vlákna odolávala vytažení prokazatelně více než vlákna se zahnutými konci. Vlákna s tvarovaným zakončením při zatěžování tahovým napětím mění svůj tvar tím způsobem, že dochází k jejich narovnání, čímž získávají srovnatelně shodné vlastnosti jako vlákno rovné [48].

Výzkumů zabývajících se vlivem geometrie vlákna na vlastnosti betonu je celá řada. Je nutné si ale uvědomit, že každá ze studií pracuje s různou délkou vlákna, různým průměrem vlákna, a i jiných betonových směsí. Všechny tyto faktory mohou významně ovlivnit disperzi a orientaci vláken, a tím také mechanické a další sledované vlastnosti betonu.

Stěžejní vlastností betonu, kterou je snaha vylepšit přidáním vláken, je pevnost v tahu za ohybu. V jedné z dalších studií autoři pozorovali vliv tvaru vlákna na pevnost v tahu za ohybu u vysokopevnostního betonu (UHPC). Zahnuté vlákno vykazovalo nejvyšší hodnoty tahové pevnosti a vazby mezi vláknem a matricí při tahové zkoušce ohybem, za ním následovalo zvlněné vlákno a potom až vlákno rovné. Začlenění 1–3 % vlnitých a háčkových vláken zvýšilo pevnost v ohybu o 10–27 % ve srovnání s rovnými vlákny, jak je vidět na obrázku č. 14. Tvarovaná vlákna mohou zvýšit pevnost tahu za ohybu betonového prvku kvůli zlepšení pevnosti vazby vlákno–matrice spojené s mechanickým ukotvením deformovaného úseku [58].



Obrázek 14: Vliv tvaru vlákna na pevnost vazby vlákno–matrice [58]

Pevnost vazby vlákno–matrice při zkoušce pevnosti v tahu za ohybu byla pro rovná vlákna stanovena hodnotou 3,1 MPa, při použití zvlněného vlákna byla tato hodnota podstatně vyšší a to 8,8 MPa, přičemž nejvyšší hodnoty, jak vyplývá z obrázku č. 14, dosáhl beton s použitím zahnutého tvaru vláken s pevností vazby 19,5 MPa. Příznivější mechanické spojení je způsobeno třením a mechanickým blokováním souvisejícím s tvarovaným koncem vlákna. Použití tvarovaných vláken značně zvýšilo jak pevnost vazby vlákno–matrice, tak i pevnost v tahu za ohybu UHPC [58].

## 4.2 Vliv délky a dávky vlákna na vlastnosti čerstvého betonu

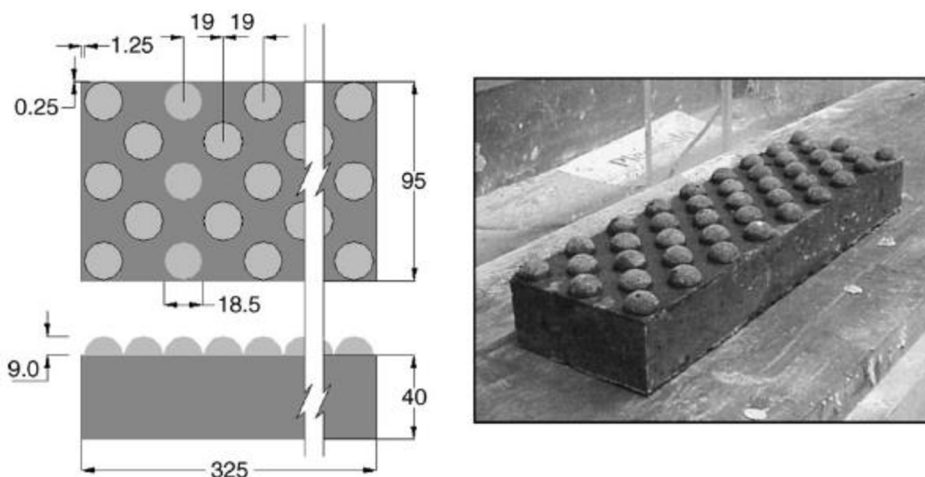
Kromě typu materiálu vlákna hraje ve výsledných vlastnostech čerstvého i ztvrdlého betonu důležitou roli také jeho délka a množství. Absolutní velikost vláken určuje počet dávkovaných vláken na jednotku hmotnosti a počet na metr krychlový betonu. Vzhledem k tomu, že celková hmotnost spíše, než absolutní velikost odráží materiálové náklady, vyvstává otázka, zda větší počet malých vláken nabízí vyšší účinek z pohledu vyztužení než stejná hmotnost menšího počtu vláken s větší délkou vlákna. Vlákna, která jsou dostupná pro použití do betonu, se zpravidla pohybují v délkách 15–65 mm [54]. Navíc každý výrobce vláken udává pro daný typ vlákna doporučené dávkování s ohledem na využití pro konkrétní aplikaci betonu.

Podmínky pro správnou funkci vlákna z pohledu soudržnosti a spolupůsobení vlákna a betonu, jejich vzájemné vazby, jak již bylo zmíněno výše, je třeba řešit už při samotném návrhu betonu, a především jeho složení. Důležitým faktorem v tomto směru je i dávkování vody, jelikož přidáním vláken do složení betonu zvyšujeme množství povrchu částic ve struktuře betonu, které vyžadují větší množství záměsové vody. Z tohoto důvodu je velmi důležitý přechod z plastického do pevného stavu a možný vznik trhlin v tomto období, který může negativně ovlivnit mechanické vlastnosti a trvanlivost betonu.

V jedním z výzkumů byla pozornost věnována vlivu délky a dávkovanému množství polypropylenových vláken na vznik trhlin plastickým smršťováním u vysokopevnostního betonu třídy C80/95. Plastické smršťování je proces, kdy voda uniká z čerstvého betonu ještě před jeho tuhnutím a tvrdnutím. Když je beton v plastickém stavu, může docházet ke ztrátě vlhkosti odpařováním do okolního prostředí atmosféry, bednění nebo jeho podkladu obecně, což může mít negativní dopad na nárůst pevností betonu. Ta část vody, která je tímto způsobem ztracena, je doplňována odlučováním vody z betonu (krvácením betonu), pokud ztráta povrchové vlhkosti nepřekročí  $0,5 \text{ kg/m}^2/\text{h}$ . Tento jev je velkým problémem zejména u velkopovrchových konstrukcí jako jsou desky, opravy tenkých povrchů či tunelová ostění. Jednou z nejúčinnějších technik pro zmírnění praskání plastickým smršťováním je prevence ztráty vody z povrchu prodloužením vytvrzování

betonu. Mezi další techniky patří regulace teploty nebo ochrana před silným větrem. Dalším vysoce účinným způsobem je právě vyztužení betonu vlákny. Náhodně distribuovaná vlákna z oceli, polypropylenu a jiných materiálů poskytují překlenovací síly napříč trhlinami a zabraňují tak jejich růstu. Právě polypropylenová vlákna jsou považována za vůbec neúčinnější [55].

Existuje již několik způsobů studia vzniku trhlin ve struktuře betonu vyvolaného smršťováním. Jednou z nejčastějších metod je použití vzorku kruhového typu, lineárního vzorku s ukotvením na konci, desky zadržené ve dvou ortogonálních směrech. Ani jedna z těchto metod ovšem není schopna nasimulovat skutečná pole napětí, účinné jsou pouze pro studium v laboratořích. Teprve nedávno tak byla vyvinuta technika vytvářející reálné smršťovací podmínky. U této metody je vrstva čerstvého betonu nanесena na plně vytvrzenou podložku, jejíž povrch je opatřen výčnělky, které zvyšují její drsnost, jak je uvedeno na obrázku č. 15. Celá sestava je poté vystavena sušicímu prostředí, aby se vyvolalo praskání ve vrstvě, která je následně charakterizována pomocí mikroskopu s velkým zvětšením [56].



Obrázek 15: Základna s výčnělky pro sledování smrštění vláknobetonu [56]

Záměs krycí vrstvy byla vyztužena čtyřmi typy polypropylenových vláken o stejné hodnotě objemové hmotnosti  $900 \text{ kg/m}^3$ , konkrétně tři typy monofilamentních vláken a jeden typ fibrilovaných, přičemž byla použita vlákna dvou různých délek a to 12,5 mm a

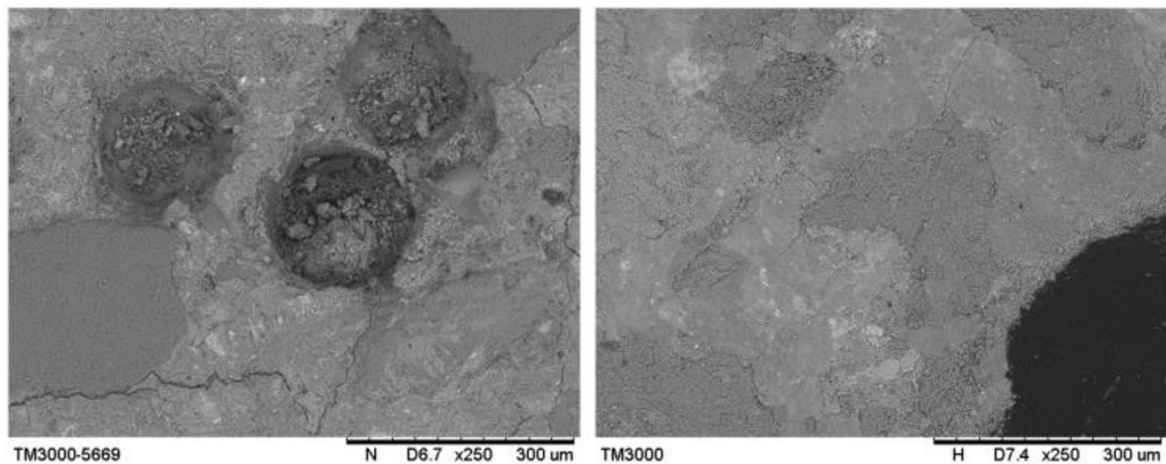
6,35 mm. Pro každé ze čtyř vláken byly zkoumány tři objemové dávky vláken 0,1 %, 0,2 % a 0,3 %.

Na základě popsaného experimentu autor studie Banthia dospěl k závěru, že při dávkách 0,1 %, 0,2 % a 0,3 % objemu bylo účinnější delší PP vlákno délky 12,5 mm při snižování trhlin a šířek trhlin než kratší PP vlákno délky 6,35 mm. Polypropylenová vlákna jsou vysoce účinná při kontrole praskání plastickým smršťováním v betonu. Vlákna obecně snižují celkovou plochu trhlin, maximální šířku trhlin a počet trhlin. Jak je zvyšován objemový podíl vláken, zvyšuje se účinnost vyztužení vláken. Ze zkoumaných vláken bylo monofilamentní PP vlákno délky 12,5 mm považováno za nejúčinnější. Delší vlákna byla obecně účinnější pro snížení vzniku trhlin a jejich šířky [56].

Z výsledků této studie lze tedy usuzovat, že polypropylenová vlákna vytváří slabou vazbu s cementovou matricí a je nutná větší délka vlákna pro efektivní přenos napětí přes trhlínu. Co se týká porovnání monofilamentního a fibrilovaného typu vlákna, tak vyšší účinnost vykazovala vlákna monofilamentní. Tato závislost je očekávána, jelikož jemnější monofilamentní vlákno vnese do betonu větší povrch pro vazbu s cementovou matricí při stejné dávce, a tedy větší přenos tahového napětí na vlákno.

Nejen Banthia věnoval pozornost této problematice. Podobné výsledky svým výzkumem získal i Shen a kol., kteří uvedli, že odolnost proti vzniku a šíření trhlin v betonu vytvrzeného PP vlákny při konstantní dávce  $8,0 \text{ kg/m}^3$  byla vyšší, když byly použity PP vlákna větší délky 60 mm, a ne kratší délky 42 mm. Zároveň byla ve studii sledována závislost množství dávky vláken u referenčního betonu bez vláken a s PP vlákny v množství  $2,76 \text{ kg/m}^3$ ,  $5,52 \text{ kg/m}^3$  a  $8,28 \text{ kg/m}^3$ . Nejpříznivější účinek na vznik a šíření trhlin měl beton s použitím nejvyšší dávky PP vláken, ovšem již při přidání nejnižší dávky vláken  $2,76 \text{ kg/m}^3$  při experimentu byl z mikroskopického snímku na obrázku č.16 patrný vliv na vznik a šířku trhlíny, kde vlevo je možno vidět snímek z mikrostruktury betonu bez obsahu PP vláken a trhlina vykazovala relativně velkou šířku, zatímco vpravo na obrázku je vyobrazena mikrostruktura betonu s použitím PP vláken, kde je patrná kompaktnější a více homogenní matrice [57].





Obrázek 16: Mikrostruktura betonu bez vláken (vlevo), betonu s PP vlákny (vpravo) [57]

Kompaktnější struktury při použití vláken bylo dosaženo snížením rychlosti uvolňování vody, což snížilo i samotné smršťování, díky tomu, že voda na povrchu vláken vytvořila adsorpční film, který bránil rychlému průchodu vody ze struktury betonu [57]. Tento jev má velký vliv i na výsledné vlastnosti betonu v zatvrdlém stavu, a to nejen pevnostní charakteristiky, ale zároveň i jeho trvanlivost a životnost celé konstrukce při vystavení extrémním podmínkám.

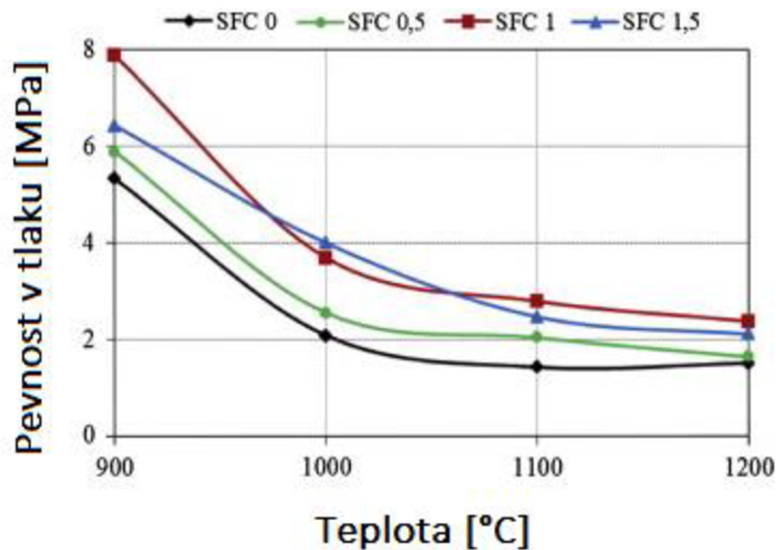
#### 4.3 Vliv druhu vlákna na odolnost betonu při působení vysokých teplot

Beton je po celou dobu své životnosti vystaven spoustě nepříznivým účinkům, jako je opotřebení, mrazu, chemickým účinkům a dynamickému zatížení, přičemž jedním z těchto účinků je působení vysokých teplot a ohně. Vždy je třeba upravit složení a kompozici v závislosti na požadavcích, které jsou na beton kladeny v konečné fázi použití. Jedním ze specifických prostředí je právě odolnost vůči vysokým teplotám, které se mohou vyskytnout v případě požáru. Skutečné chování betonu při požáru závisí ale na mnoha dalších faktorech prostředí, jako jsou dílčí vlastnosti složek v betonu, maximální teplota, které byl materiál vystaven, doba vystavení těmto extrémním podmínkám a další. Zvýšením požární odolnosti betonu se zabývá spousta studií, ve kterých jsou sledovány optimální návrhy složení betonu tak, aby došlo k eliminaci účinku tohoto dynamického působení na konstrukce zejména z bezpečnostního hlediska. Jedním z účinných řešení pro

zvýšení odolnosti betonu vystavenému extrémnímu vysokoteplotnímu zatížení je zakomponovat do kompozice betonu vlákna, což vyplývá z teoretické části práce.

Vůbec nejčastěji využívanými vlákny obecně pro vláknobeton jsou vlákna ocelová, která výrazně zvyšují houževnatost, tahové pevnosti a další mechanické vlastnosti betonu. V jednom z výzkumů se autoři věnují problematice vlivu ztráty pevnosti v tlaku po vystavení extrémně vysokým teplotám u vláknobetonu s použitím ocelových vláken. Pro výrobu zkušebních vzorků byl použit portlandský cement CEM I 42,5 v množství  $341 \text{ kg/m}^3$ , skladba kameniva byla množstevně  $700 \text{ kg/m}^3$  drceného písku,  $438 \text{ kg/m}^3$  drobného kameniva,  $613 \text{ kg/m}^3$  hrubého kameniva, s přídavkem  $3,41 \text{ kg/m}^3$  plastifikační přísady a  $205 \text{ kg/m}^3$  vody. Receptura se lišila množstvím přidaných vláken, kdy jedna byla referenční a další byly s přídavkem ocelových vláken v množství 0,5 %, 1,0 % a 1,5 % objemu betonu. Ocelové vlákno se zahnutými konci mělo délku 60 mm a průměr 0,75 mm [59].

Zkušební tělesa byla 28 dnů vložena do elektrické vysokoteplotní pece, kde byly postupně na jednotlivé receptury aplikovány teploty 900 °C, 1000 °C, 1100 °C a 1200 °C. Doba vystavení teplotním účinkům včetně doby náběhu teplot na požadovanou teplotu byla 6 hodin. Na obrázku č. 17 je graficky vyobrazena závislost pevnosti v tlaku zkušebních těles vyztužených drátky (SFC) v různých dávkách při působení různě vysokých teplotám na objemovém množství vláken v receptuře vláknobetonu.

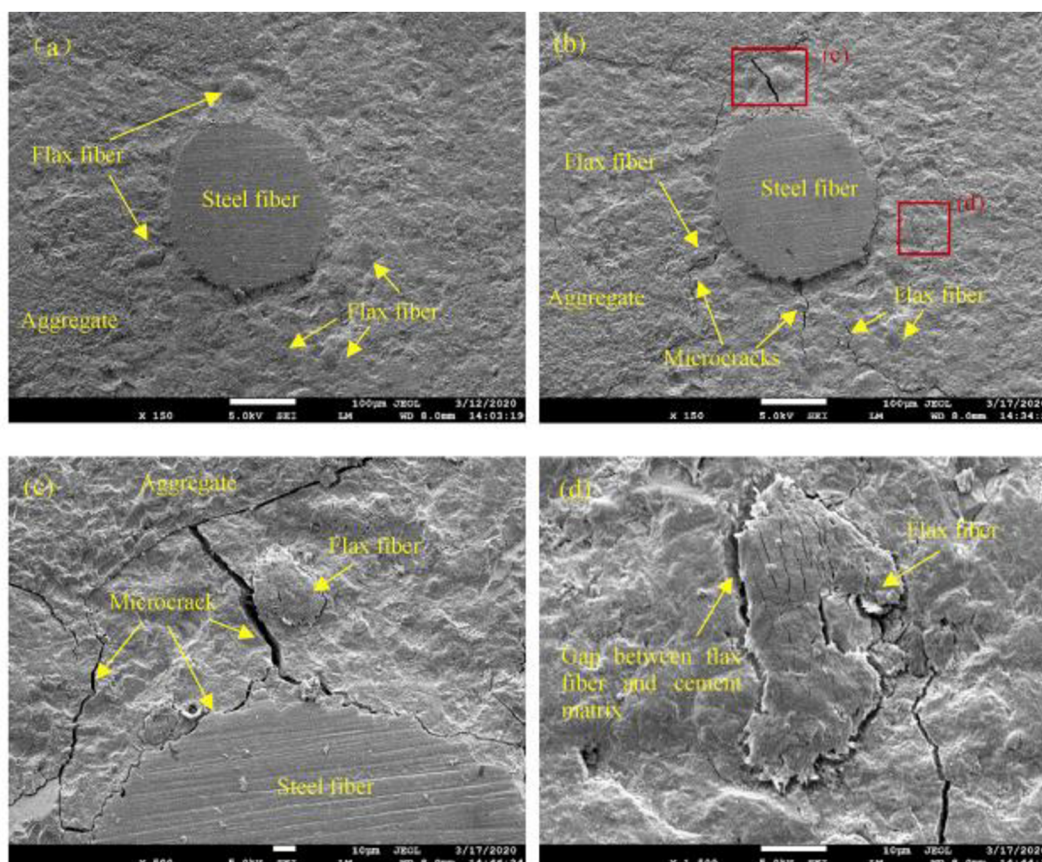


Obrázek 17: Grafická závislost pevnosti v tlaku na teplotě, které byl beton s ocelovými vlákny vystaven [59]

Nejpříznivějšího výsledku bylo dosaženo u vláknobetonu s obsahem ocelových vláken v množství 1,0 % objemu betonu vyobrazené pro 28denní pevnosti znázorněné červenou barvou, kde nejvyšších hodnot pevností v tlaku bylo dosaženo u tří teplotních zatížení 900 °C, 1100 °C a 1200 °C. Zvýšením dávky vláken ve struktuře betonu bylo dosaženo lepší kompaktnosti struktury, ovšem při nejvyšší sledované dávce ocelových vláken 1,5 % objemu betonu již tato závislost potvrzena nebyla [59].

Další studie se zabývala porovnáním působení ocelových vláken ve vysokohodnotných betonech (UHPC) s vlákny lněnými, tedy na materiálové přírodní bázi, přičemž UHPC byl opět vystaven teplotní zátěži. UHPC přitahuje pozornost ve stavebnictví především díky svým vynikajícím mechanickým vlastnostem a trvanlivost, ovšem kvůli své husté mikrostruktuře bývá materiál velmi citlivý na explozivní odprýskávání při zvýšených teplotách [60],[61],[62],[63]. Explozivní odprýskávání způsobuje vážné poškození betonové krycí vrstvy výztuže, a tak je ocelová výztuž předčasně vystavena vysoké teplotě, čímž je dosaženo snížení únosnosti konstrukčních prvků. Přidání vláken, jako jsou ocelová a polypropylenová vlákna, je jedna z široce používaných metod ochrany betonu před tímto teplotním zatížením [64],[65],[66].

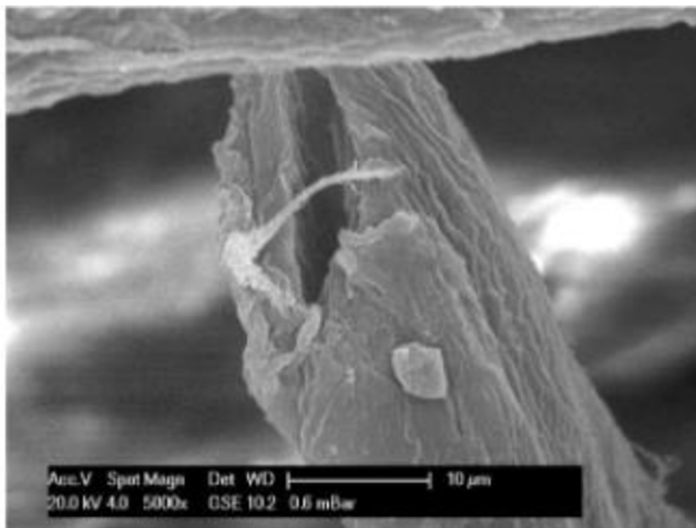
V poslední době je kladen větší důraz na udržitelnost materiálů, a to nejen u stavebních materiálů. Díky tomu se do popředí dostávají vlákna z obnovitelných zdrojů, jako jsou například juta, len, kokos a konopí. Tato vlákna jsou slibnou alternativou k vláknům syntetickým, jak ukazují některé studie, kde přírodní vlákna předkládají vysoký potenciál v prevenci spallingu UHPC při vysoké teplotě [67],[68]. Bylo zjištěno, že smrštěním přírodních vláken došlo k tvorbě mezipovrchových mezer mezi vlákny a cementovou maticí, čímž došlo k zvýšení propustnosti UHPC při vysokých teplotách. Na druhou stranu přidání přírodních vláken také vedlo k významnému snížení pevnosti v tlaku UHPC, přičemž tento nedostatek se snaží studie redukovat přidáním ocelových vláken [69]. Výzkum byl zaměřen zejména na pochopení synergických účinků přírodních a ocelových vláken ve vláknobetonu s ohledem na odolnost proti odprýskávání a mechanické vlastnosti UHPC. Při použití kombinace lněných a ocelových vláken došlo ve struktuře betonu, jak je možné pozorovat na obrázku č. 18, ke spojení mikrotrhlin od vláken ocelových (steel fibre micocracs) s mezipovrchovými mezerami od vláken lněných (flax fibre gaps), což vedlo ke zvýšení propojenosti prostoru pro možnou expanzi vodní páry při vysoké teplotě. Tento synergický účinek zvyšoval propustnost UHPC při vysoké teplotě [70].



Obrázek 18: Mikroskopické snímky UHPC s obsahem lněných a ocelových vláken a) před vystavením vysoké teplotě, b) po vystavení teplotě 200 °C, c) a d) zvětšené snímky obrazů a), b) [68]

Jednou z dalších ekologičtějších alternativ druhu vláken jsou vlákna celulózová, která v jedné ze studií byla přidávána do složení betonu pro tunelové konstrukce rychlostních železničních tratí Guiyang-Guangzhou a Hefei-Fuzhou. Nahrazením běžného železobetonového ostění tunelu vláknobetonem s použitím celulózových vláken došlo jak k finanční úspoře vyčíslené na více jak 200 milionů \$, ale také k nižšímu ekologickému dopadu. Po vystavení vysokým teplotám dochází u běžného betonu k rychlé ztrátě mechanických vlastností, zatímco u vláknobetonu vyztuženého celulózovými vlákny, dochází díky roztavení celulózových vláken k tvorbě kanálek ve struktuře betonu, které umožňují uvolnit tlak páry tepelně zatěžovaného betonu. Na stejném principu fungují i vlákna polypropylenová, která ovšem vyžadují značně větší množství energie pro výrobu než vlákna přírodního charakteru [71], [72].

Autoři zmíněného experimentu pracovali s vlákny původem z břestovce o délce vláken v rozmezí 2–5 mm s průměrem 15–20  $\mu\text{m}$ . Celulózové vlákno je duté, jak je možno vidět na obrázku č. 19, což může být důvodem jednak zpomalení deformace způsobené vnitřním napětím v betonu, nebo také zvýšením odolnosti vláknobetonu proti odprýskávání za vyšších teplot [71].



Obrázek 19: Mikroskopický snímek celulózového vlákna z břestovce [71]

Návrhové složení betonu bylo, co se týká zvoleného druhu cementu portlandského CEM I 42,5, méně příznivou variantou pro posouzení vlivu vláken na chování betonu vystavenému teplotnímu zatížení, na druhou stranu byl použit drcený vápenec jako složka hrubého kameniva frakce 5–20 mm, který je vhodnější při působení vysokých teplot než kamenivo křemičité, jak bylo uvedeno v teoretické části. Složku drobného kameniva frakce 0–2 mm tvořil křemenný písek. Vodní součinitel měl hodnotu 0,58 a pro lepší zpracovatelnost čerstvého vláknobetonu byla použita plastifikační přísada na bázi polykarboxylátů [71].

Zkušební vzorky vláknobetonu s obsahem celulózových vláken společně s referenčním betonem byly zahřívány na teploty 300, 600, 800 a 1 050  $^{\circ}\text{C}$  v peci s výdrží na dané teplotě po dobu 2,5; 4 a 5,5 hodiny. Vzhledem k působení vyšších teplot docházelo u betonu nejprve k vypařování volné vody do teplot kolem 200  $^{\circ}\text{C}$ , dehydrataci C–S–H gelu

a rozkladu  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  při teplotě 600 °C, což je možné zaznamenat na základě úbytku hmotnosti zkušebních těles před a po vystavení teplotnímu zatížení [71].

Až do konstantního zahřívání na teplotu 300 °C pro všechny doby výdrže všechny zkušební vzorky referenčního betonu a vláknobetonu byly bez výskytu makroskopických trhlin, došlo pouze ke změně barvy. U referenčních vzorků při teplotě 600 °C se začal objevovat větší počet pórů a makrotrhlin, při dalším zahřívání na vyšší teploty došlo úplné destrukci, jelikož uvolnění vody při těchto teplotách nenávratně poškodilo strukturu betonu a došlo k jevu explozivního odprýskávání. Naopak vláknobetonová tělesa tomuto vysokoteplotnímu zatěžování odolávala až do maximální teploty 1 050 °C, aniž by došlo k odprýskávání materiálu. Na povrchu vláknobetonu bylo možné zaznamenat sítě trhlin a dutiny, ovšem celistvost těles zůstala zachována. Při dosažení maximální teploty tělesa z vláknobetonu měla mírně pokrivené rohy a změnila barvu na mléčně bílou, jak je vyobrazeno na obrázku č. 20. [71].



Obrázek 20: Vláknobeton s celulózovým vláknem po vystavení teplotnímu zatížení při různých dobách výdrže [71]

Závěrem bylo uvedeno srovnání zbytkových pevností v tahu a tlaku u referenčního betonu a vláknobetonu s celulózovými vlákny, kdy jednoznačně vyšších hodnot dosahoval právě beton s obsahem celulózových vláken. Na základě těchto dosažených výsledků ze studie lze usoudit, že přidání celulózových vláken mělo příznivý účinek na odolnost betonu

proti odprýskávání při vystavení vysokým teplotám [71]. Lze očekávat, že do budoucna bude vedeno více experimentů, jako můžeme pozorovat například u ocelových a polymerních vláken, které pomohou ukázat další ubírání technologií materiálového inženýrství ve stavebnictví s využitím ekologičtějších alternativ.



## 5. Experimentální část

Beton při působení vysokých teplot ztrácí svoje mechanické vlastnosti vlivem změn ve struktuře, což nepříznivě ovlivňuje nejen finanční náklady na opravu či výstavbu, ale především bezpečnost. Cílem pro navržení vhodné skladby surovin do betonu je především zamezit vzniku možných rizik, která mohou při užívání konstrukce nastat, vlivem působení vysokých teplot. Jednou z možností, jak tohoto účinku dosáhnout, je použití vláken ve struktuře betonu. Škála druhů vláken je v dnešní době již velmi rozmanitá, nejčastěji se ovšem využívají vlákna polypropylenová a ocelová. S aktuálním trendem udržitelnosti, který se dotýká i stavebního průmyslu, je snaha o využití přírodních zdrojů či recyklovaných materiálů, za účelem snížení ekologické stopy. Toho je možné docílit začleněním například celulózových vláken nebo uměle vytvořenými polyethylentereftalátovými vlákny recyklovaných z PET lahví.

V experimentální části byly proto využity různé druhy vláken s ohledem na studium vlastností betonu před i po vystavení vysokým teplotám v peci, s cílem odpovědět na otázku, zda vlákna příznivějšího ekologického dopadu, mohou konkurovat aktuálně používanějším druhům vláken s ohledem na požární odolnost betonu.

### 5.1 Použité metody a suroviny

Cílem experimentální části této práce bylo sledování mechanických vlastností vláknobetonu v závislosti použití různých druhů materiálu vlákna, které byly popsány v teoretické části. Sledovanými vlastnostmi vláknobetonu byla pevnost v tlaku, v tahu za ohybu a chování vláknobetonu při vysokých teplotách s ohledem na použitý druh vlákna. Pevnost v tlaku byla provedena po 28 dnech dle ČSN EN 12390-3: Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles. Čtyřbodový ohyb pro stanovení pevnosti v tahu za ohybu byl proveden dle normy ČSN EN 12390-5: Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles, která je podle ČSN P 73 2452: Vláknobeton – Zkoušení ztvrdlého vláknobetonu [13] pro vláknobeton upravena velikostí normalizovaných trámů. Normalizované tráme pro vláknobeton mají rozměry 150x150x700 mm. V této práci ovšem nebyla zkouška pevnosti provedena na

normalizovaných trámčích dle ČSN P 73 2452, protože se jednalo pouze o orientační vzájemné porovnání. Zkouška tlakové pevnosti ztvrdlého betonu byla provedena také na krychlích, které byly vystaveny teplotě 1000 °C pro zjištění zbytkové pevnosti v tlaku po vystavení vysoké teplotě.

Mechanické vlastnosti vláknobetonu byly sledovány na celkem pěti různých recepturách betonu, včetně referenční (REF), přičemž množství cementu, kameniva, vody a plastifikační přísady bylo shodné pro všechny záměsi, jak je uvedeno v tabulce č. 3. Volba složení betonu nezahrnovala další opatření proti působení vysokých teplot, jako je volba cementu či kameniva, aby byla nastavena nepříznivá varianta pro teplotní zatížení betonu. Jednotlivé receptury vláknobetonu se lišily pouze přidáním různých druhů vláken z hlediska materiálu a dávkování.

*Tabulka 3: Složení betonu na 1 m<sup>3</sup>*

Označení	Cement [kg]	Hrubé kamenivo [kg]	Drobné kamenivo [kg]	Voda [kg]	Plastifikační přísada [kg]	Vlákna [kg]
REF	350	968	890	185	3,5	–
PP	350	968	890	185	3,5	1
PET	350	968	890	185	3,5	1
ST	350	968	890	185	3,5	25
CEL	350	968	890	185	3,5	1

Použita byla vlákna polypropylenová (PP), vlákna ocelová (ST), celulósová (CEL) a vlákna polyethylentereftalátové (PET), přičemž PET vlákna je možno vidět na obrázku č. 21 vlevo, kde je na mikroskopickém snímku zaznamenána i hodnota průměru vlákna v rozmezí 15–16 µm a vpravo je patrná struktura celulósových vláken ve formě tzv. pelet.



Obrázek 21: PET vlákna (vlevo), celulózová vlákna (vpravo)

Pro výrobu byl použit jeden druh cementu CEM I 42,5 R Mokrý, Českomoravský cement, a.s., který není zcela příznivý vzhledem k vysokému obsahu portlandského slínku, který je při vystavení vysokým teplotám doprovázen objemovými změnami, které jsou nežádoucí z důvodu vzniku trhlin ve struktuře betonu, což negativně ovlivňuje pevnostní charakteristiky konstrukce. Hrubé kamenivo frakce 8–16 mm Olbramovice (granodiorit) je z pohledu mineralogie kamenivo křemičité, které je při působení vysokých teplot podrobena objemovým změnám z důvodu fázové přeměny křemene už při teplotě 573 °C. Druh cementu a kameniva byl vybrán s ohledem na dosažení co nejvíce nepříznivých podmínek. Vodní součinitel s hodnotou 0,53 tj. množstvím vody 185 kg/m<sup>3</sup> byl zvolen s ohledem na vliv obsahu vláken v čerstvém betonu na zpracovatelnost a dostatečné

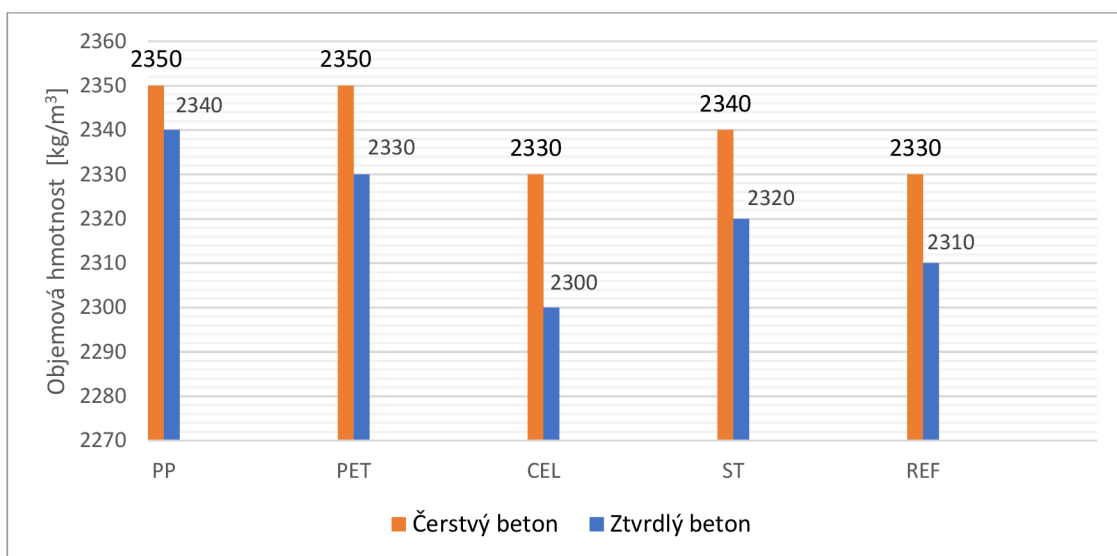
množství cementového tmele pro obalení kameniva a vláken. Pro zlepšení zpracovatelnosti čerstvého betonu byla použita i plastifikační přísada CHRYSO®Plast 761 v dávce 3,5 kg/m<sup>3</sup>. Pro vláknobeton byly použity čtyři druhy vláken na základě jiné materiálové báze s různými vlastnostmi:

- Fibrin 23D, CHRYSO®:
  - zvlněné polypropylenové vlasové vlákno (monofilamentní) bílé barvy,
  - délka 12 mm a průměr 18 µm,
  - hustota ~ 0,91 kg/dm<sup>3</sup>,
  - pevnost v tahu: 557 MPa, Youngův modul pružnosti: 4148 MPa,
  - tepelná odolnost: 160 °C.
- Namflex PET Fibre, CIUR a.s.:
  - polyethylentereftalátové vlákno získané zpětnou recyklací z odpadní suroviny (PET lahví) postupným rozvlákněním hrubě nadrcených částic (vloček) ve velikosti desítek milimetrů špinavé bílé barvy,
  - délka 20 mm,
  - odolnost proti trvalým deformacím.
- KrampeHarex De-E 304:
  - ocelová nerezová vlákna se zahnutými konci,
  - délka 60 mm a průměr 1 mm,
  - pevnost v tahu: 1,1 GPa, Youngův modul pružnosti: 210 GPa,
  - 2700 ks vláken na 1 kg.
- CIUR
  - celulózová vlákna šedé barvy ve formě tzv. pelet různých délek a průměrů v rozmezí hodnot 12–27 µm, jak bylo uvedeno na obrázku č. 21, získána rozvlákněním recyklovaného papíru.

Pro zjištění orientačních hodnot konzistence čerstvého betonu byla provedena zkouška sednutí kužele, ačkoliv hodnoty pro vláknobeton nejsou průkazné, jelikož typ této zkoušky není vhodný z důvodu hutnění čerstvého vláknobetonu propichováním tyčí, kdy

dochází k násilnému narušení struktury betonu a může dojít k deformaci vláken v případě drátkobetonu.

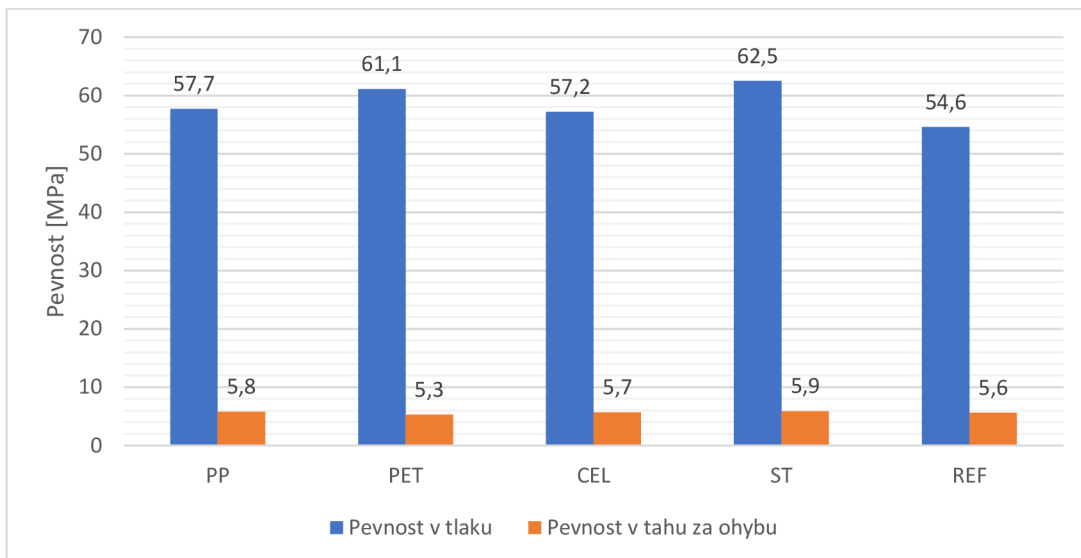
Po zhutnění čerstvého betonu na vibračním stole byly naplněné formy zváženy pro stanovení orientačních hodnot objemové hmotnosti čerstvého. Hodnoty objemových hmotností čerstvého betonu pro jednotlivé receptury se lišily minimálně, jak je graficky vyobrazeno na obrázku č. 22, kde jsou porovnány hodnoty objemových hmotností v čerstvém a ztvrdlém stavu.



Obrázek 22: Grafické porovnání objemových hmotností čerstvého a ztvrdlého betonu

## 5.2 Zkoušení mechanických vlastností

Na zkušebních krychlích ve ztvrdlém stavu byly stanoveny pevnosti v tlaku po 28 dnech a pevnosti v tahu za ohybu byly stanovovány na zkušebních trámčích. Dosažené hodnoty pevnosti v tlaku u zkušebních krychlí jsou graficky znázorněny na obrázku č. 23., kde je uvedena pevnost v tlaku a tahu za ohybu pro zkoušené betony.



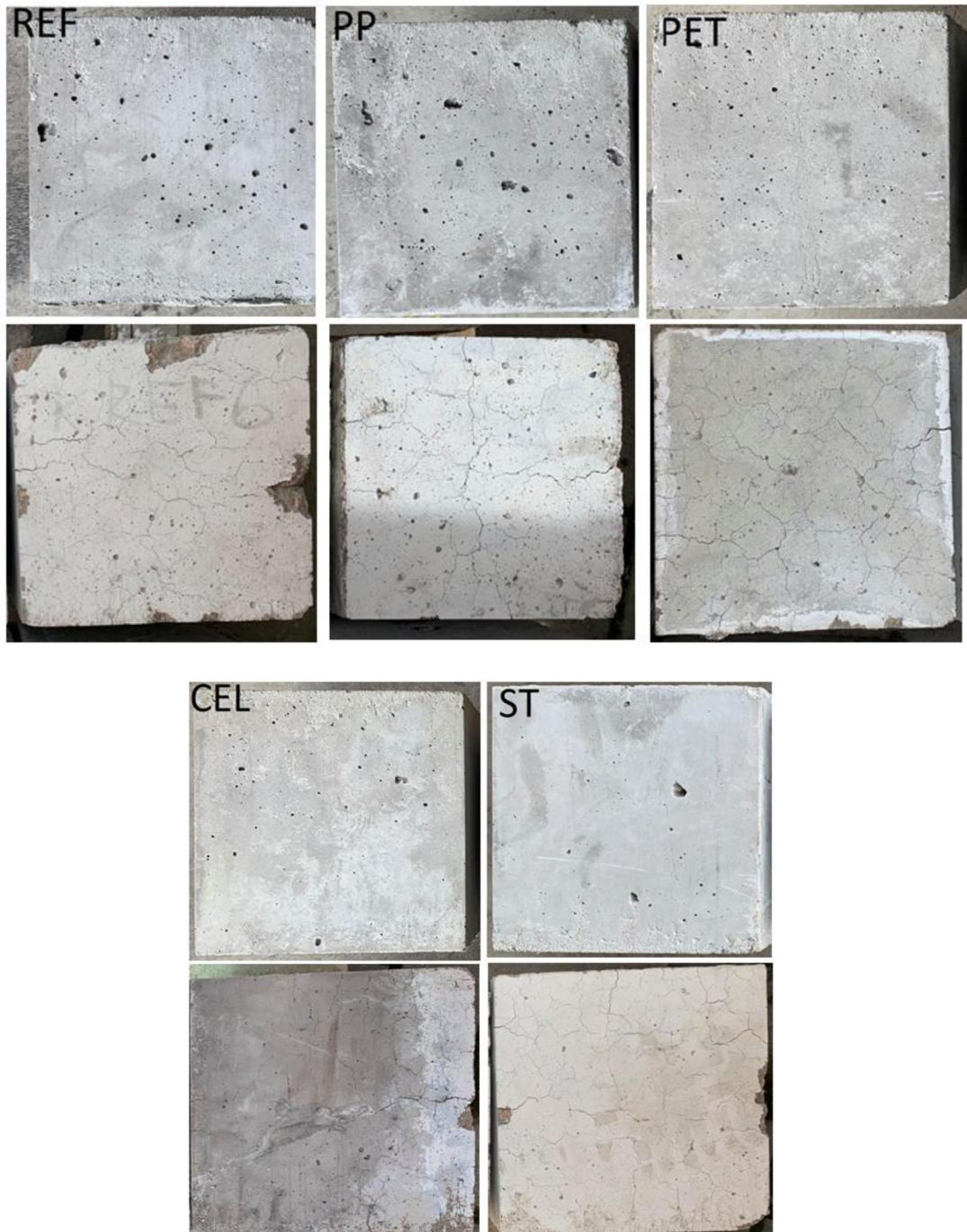
Obrázek 23: Graf vyjadřující pevnosti betonu v tlaku a tahu za ohybu

Pro posouzení chování betonu při vysoké teplotě a vlivu působení vláken byly vzorky vloženy do pece a vystaveny maximální dosažené teplotě 1 020 °C, v souladu s teplotní křivkou dle ČSN EN 1363-1 [73]. Pohled na zkušební tělesa v požární peci po ukončení zkoušky jsou vidět na obrázku č. 24.



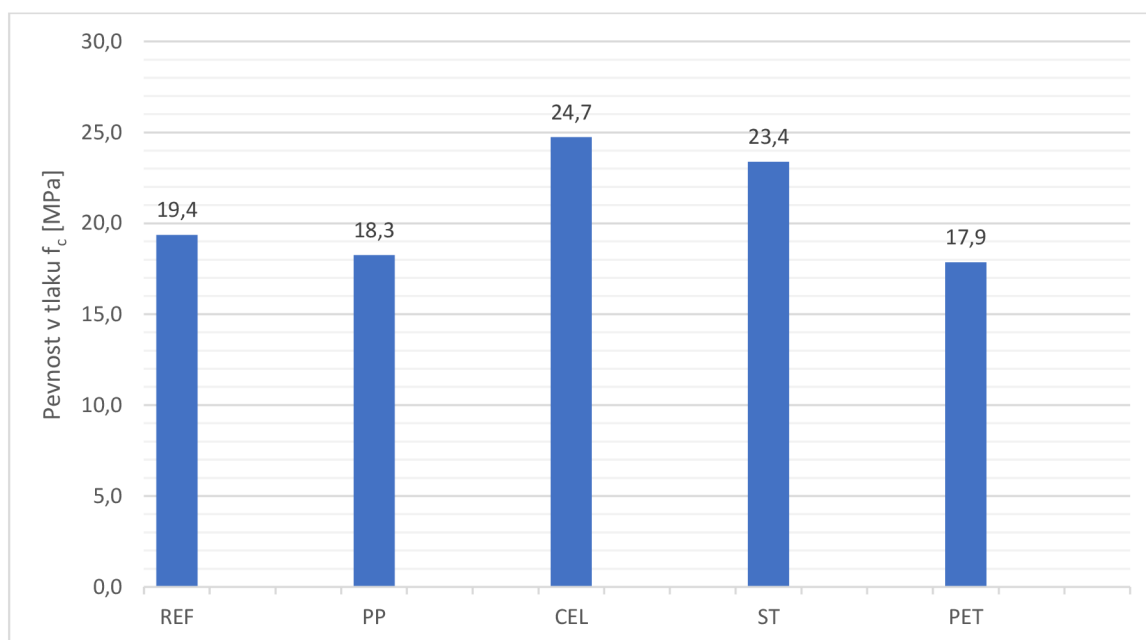
Obrázek 24: Zkušební tělesa v peci po ukončení zkoušky

Na obrázku č. 25 je vidět změna povrchu exponovaných zkušebních těles v požární peci po expozici při teplotě nad 1 000 °C. Pro porovnání je zachycen na obrázku také povrch betonu před zkouškou.



Obrázek 25: Struktura povrchu těles před (horní) a po (dolní) vystavení teplotnímu zatížení

Jako poslední byla provedena zkouška zbytkové pevnosti v tlaku po vystavení extrémně vysoké teplotě v peci, jejíž výsledky průměrných hodnot ze tří zkušebních těles jsou uvedeny v grafickém zobrazení na obrázku č. 26.



Obrázek 26: Zbytková pevnost v tlaku po vystavení betonu teplotnímu zatížení

Po zkouškách pevnosti v tlaku byla sledována struktura betonu se zaměřením pohledu na vlákna v matrici, a to jak bez teplotního zatížení, tak po teplotním zatížení. Na obrázku č. 27 nahoře je možno vidět celulózové vlákno před působením teplotního zatížení. Zároveň jsou uvedeny snímky z mikroskopu na vzorku betonu s PP vlákny před a po působení vysoké teploty, kde je na obrázku vpravo dole vidět kanálek, který vznikl vyhořením PP vlákna.





*Obrázek 27: Mikroskopický snímek vláknobetonu s celulóзовými vlákny před působením vysoké teploty (nahore), PP vlákno ve struktuře betonu před působením vysoké teploty (dole vlevo), PP vlákno po působení vysoké teploty (dole vpravo)*

## 6. Diskuze výsledků

V návaznosti na teoretickou část práce a její poznatky byly v praktické části studovány konkrétní výsledky při použití vláken. Jeden z výzkumů zaměřených na geometrii ocelového vlákna prokázal, že tvarováním (zahnuté konce vlákna, zvlněné vlákno) vlákna může být dosaženo vyšší odolnosti proti vytažení vlákna ze struktury betonu díky významnému zlepšení pevnosti vazby vlákno–matrice. Zároveň bylo při použití tvarovaného ocelového vlákna dosaženo vyšší pevnosti v ohybu a houževnatosti betonu v pořadí háčkovaná vlákna > vlnitá vlákna > rovná vlákna. Síla vazby vlákno–matrice byla u vlnitého a háčkovaného typu vlákna přibližně třikrát a sedmkrát větší než u rovných vláken. Další publikace byla zaměřena na vliv délky a charakter přidaného vlákna na výsledné vlastnosti betonu. Použita byla polypropylenová vlákna v délkách 6,35 a 12,5 mm se zaměřením jejich působení při objemových změnách betonu. Přidáním vláknem do betonu obecně bývá docíleno snížení celkové plochy trhlin a šířky těchto trhlin. PP vlákna jsou vysoce účinná při kontrole praskání plastickým smršťováním v betonu. Ze zkoumaných vláken bylo monofilamentní PP vlákno větší délky 12,5 mm účinnější pro snížení vzniku trhlin a jejich šířky. Na základě tohoto závěru lze usuzovat, že polypropylenová vlákna vytváří slabou vazbu s cementovou matricí a je nutná větší délka vlákna pro efektivní přenos napětí přes trhlínu. Co se týká charakteru vlákna, tak jemnější monofilamentní vlákna vnášejí do betonu větší povrch, tudíž je vazba s cementovou matricí pevnější, což souvisí s přenosem tahových napětí na vlákno, a proto vlákna fibrilovaná byla posouzena jako méně účinná.

Velmi zajímavé studie se zabývají využitím celulózových vláken, kdy jsou prezentovány pozitivní výsledky a jsou používána vlákna přírodní. Zde může být problém s dostatečným množstvím či kontinuitou dodávek, pokud by mělo být masivně dodáváno pro výrobu betonu. Avšak v každém případě výsledky naznačují, že je to možný směr pro využití těchto vláken. Je však možná cesta využití celulózových vláken formou recyklace, kdy tato vlákna lze úspěšně získávat i z jiných než přímých přírodních zdrojů.

Na základě dosažených výsledků z experimentální části této práce je nutné jejich porovnání se závěry, které vyplývají z vědeckých výzkumů uvedených v praktické a teoretické části práce, aby se dal zhodnotit vliv přídatku vláken na chování betonu v čerstvém, ztvrdlém stavu a při vystavení teplotnímu zatížení.

Hodnoty zkoušky sednutím kužele pro jednotlivé receptury vláknobetonu odpovídají stupni konzistence S2 v rozmezí hodnot 50–90 mm, pouze u referenčního betonu byl výsledek zkoušky odpovídající stupni S4 s hodnotou sednutí kužele 210 mm. Z těchto údajů vyplývá, že vlákna snižují zpracovatelnost čerstvého betonu, jak bylo zhodnoceno i ve studiích uvedených v teoretické části práce [48]. Jedná se o očekávaný výsledek, protože vlákna vnášejí do betonu další povrch, který na sebe váže záměsovou vodu pro ovlhčení vláken a dále vlákna také silně ovlivňují reologické vlastnosti.

Referenční beton dosahoval shodně nejnižší hodnoty objemové hmotnosti čerstvého betonu  $2330 \text{ kg/m}^3$  jako vláknobeton s obsahem celulózových vláken a nejvyšší hodnoty  $2350 \text{ kg/m}^3$  byly stanoveny pro receptury vláknobetonu s použitím polypropylenových a polyethylentereftalátových vláken. Hodnoty objemové hmotnosti čerstvého betonu u všech receptur byly vyšší v rozmezí hodnot  $10\text{--}30 \text{ kg/m}^3$  s ohledem na objemové změny betonu při procesu tuhnutí a tvrdnutí, kdy dochází k vlhkostnímu smršťování způsobeného migrací vlhkosti v kapilárách [3]. Stejně jako u hodnot objemových hmotností čerstvého betonu bylo dosaženo nejvyšších hodnot objemové hmotnosti ztvrdlého betonu u vláknobetonu s použitím vláken polypropylenových a polyethylentereftalátových vláken, i zde vláknobeton s obsahem rozptýlených vláken na polymerní bázi dosahovaly nejvyšších hodnot, oproti vláknobetonu s vlákny celulózovými, ale jedná se o minimální rozdíly, které nevykazují výrazné rozdíly k celkové hmotnosti. Nejvíce by se tak mohla projevit ocelová vlákna vzhledem ke své objemové hmotnosti.

Zkouška pevnosti v tlaku potvrdila předpoklad z teoretické části, kde bylo očekáváno, že nejvyšších hodnot pevnosti v tlaku dosáhne vláknobeton s použitím ocelových vláken, které zvyšují houževnatost materiálu, přičemž v experimentu byla dosažena hodnota  $62,5 \text{ MPa}$  [18], [48],[48] [54], [59]. Vliv na pevnost v tlaku mohlo mít i vyšší dávkování

ocelových vláken, které bylo 0,3 % objemu betonu, zatímco ostatní vlákna byla zastoupena v rozmezí hodnot 0,06–0,1 % objemu betonu. Nejnižší hodnota byla vyhodnocena pro recepturu referenčního betonu, a to 54,6 MPa, takže ve všech případech, kdy byla použita vlákna, došlo ke zvýšení pevnosti v tlaku. Přestože vlákna nejsou primárně cílena pro zvýšení pevnosti v tlaku, přesto k tomuto efektu dochází, a to vlivem distribuce napětí při zatížení, kdy je zatížení rovnoměrně distribuováno v celém objemu matrice. Vyšším pevnostem mohl také přispět fakt, kdy některé studie uvádějí, že celulózová vlákna díky vyšší absorpci vody následně vodu postupně uvolňují a zajišťují tak vnitřní ošetřování betonu.

Již podle parametrů použitých vláken a jejich mechanických vlastností bylo předpokládáno, že nejvyšší hodnoty pevnosti v tahu za ohybu za dosáhne vláknobeton s přídavkem ocelových vláken na základě jejich vysoké hodnoty modulu pružnosti 210 GPa. Naopak výrazně nižší hodnotu modulu pružnosti kolem 5 GPa mají vlákna polypropylenová nebo celulózová s hodnotou okolo 10 GPa [47], [54]. U provedeného experimentu bylo skutečně dosaženo nejvyšší tahové pevnosti u vláknobetonu s ocelovými vlákny, a to 5,9 MPa. Hned druhé nejvyšší hodnoty bylo dosažena u receptury s obsahem PP vláken 5,8 MPa. Je nutné brát v potaz, že hodnoty této zkoušky nelze považovat za zcela průkazné pro vláknobetony i kvůli tomu, že nebylo použito normalizovaných trámčů podle normy ČSN P 73 2452. Ale i tak lze na základě teoretických poznatků usuzovat, že zde je společně s modulem pružnosti samotného vlákna dominantní i délka a kotvení vlákna v matrici.

Na základě teoretické i praktické části byly v experimentální části zkušební vzorky vystaveny působení extrémně vysoké teplotě 1 000 °C. Jak bylo předpokládáno, referenční beton (REF) už na pohled vykazoval největší porušení velkým množstvím makroskopických trhlin a porušení rohů a hran tělesa, jak je možno vidět na obrázku č. 25 v experimentální části. Nejkompaktnější strukturu vykazoval beton s obsahem celulózových vláken (CEL), ačkoliv také ve struktuře obsahoval trhliny. Podobného výsledku bylo dosaženo i u betonu s obsahem vláken ocelových (ST). Ostatní struktury vláknobetonů byly taktéž

poznamenány značným množstvím trhlin a porušením na okrajích tělesa, ovšem ne tak výrazných jako u betonu referenčního. Porušení všech vzorků souvisí se záměrným použitím nevhodného složení betonu pro působení vysokých teplot, a to především volbou druhu a množstvím cementu, ale také nevhodného kameniva s vysokým obsahem křemene.

Na zkušebních tělesech vystavených vysoké teplotě byla provedena zkouška pevnosti v tlaku, pro srovnání zbytkové pevnosti po teplotním zatížení s pevností v tlaku betonu nezatěžovaného. Pozitivních výsledků bylo dosaženo u betonu s celulóзовými vlákny. Beton s přídavkem těchto vláken dosáhl nejvyšší hodnoty 24,7 MPa, hned za touto hodnotou byl beton s obsahem ocelových vláken, a to 23,4 MPa. Příznivý výsledek receptury s celulóзовými vlákny mohl být způsoben díky tvorbě kanálků po roztavení některých vláken ve struktuře betonu, které umožňují uvolnit tlak páry při tepelném zatěžování, což potvrzuje i studie popsána v teoretické části práce [71]. Při hodnocení ztráty pevnosti, se tyto ztráty pohybovaly od 29 % v případě PET vláken či 32 % u PP vláken. Vzhledem k vysokým pevnostem betonu s celulóзовými vlákny, bylo dosaženo vysokého poklesu pevnosti v tlaku, a to 43 %. Pro ocelová vlákna byl pokles pevnosti v tlaku po vystavení působení vysoké teploty 37 %.

## 7. Závěr

V souladu se zadáním, je bakalářská práce věnována studiu materiálových a geometrických vlastností vláken přidávaných do betonu za účelem dosažení příznivějších výsledných vlastností betonu. V úvodu teoretické části práce jsou představeny aktuální požadavky jak na samotná vlákna, tak na vláknobetony z pohledu legislativy. Dále jsou popsány jednotlivá vlákna z pohledu jejich geometrického tvaru, materiálu a výhody jejich použití v betonu pro konkrétní aplikaci na základě fyzikálně-mechanických vlastností vláken. S využitím vláknobetonu ve stavebnictví souvisí i jejich vliv na požární odolnost, což je shrnuto s ohledem na chování betonu při působení vysokých teplot, kdy může při požáru docházet k explozivnímu odprýskávání betonu. Tento aspekt úzce souvisí s bezpečností při požáru, proto je na tuto problematiku kladen velký důraz. S aktuálně se rozvíjícím směrem udržitelnosti materiálů ve všech odvětví průmyslu jsou popsána také vlákna na bázi přírodního charakteru nebo z recyklovaných materiálů, které lze využít ve formě rozptýlené výztuže pro betony, se zaměřením na jejich přínos na zvýšení užitečných vlastností betonu.

Praktická část práce byla věnována studiím, které pozorovaly chování jednotlivých vláken v betonu na základě jejich geometrie, materiálu a obsahu v betonu. Studie v oblasti ocelových vláken jsou již známé, ale podpora kotvení vlákna ve formě tvarování stále hledá zajištění, co možná nejúčinnějšího kotvení, jako je například háčkové ocelové vlákno, které vykazuje výrazně vyšší odolnost proti vytažení z cementové matrice, než je tomu u ocelového vlákna rovného, ke kterému jsou hodnoty vždy vztahovány. V případě polymerních vláken je shledána nižší soudržnost, ale lze tento nedostatek vyrovnat použitím monofilamentních vláken, která jsou menší a vnášejí větší povrch pro zakotvení vlákna v betonu, než je tomu u fibrilovaných vláken.

Studie věnované využití celulósových vláken pro zvýšení požární odolnosti, respektive na zvýšení odolnosti betonu při působení vysokých teplot, nám ukazují směr, kdy využitím přírodních zdrojů nebo recyklovaných materiálů, lze docílit obdobných výsledků požadovaných vlastností jako při využití vláken polymerních nebo ocelových,

která jsou do betonu přidávána nejčastěji. Nejen, že mohou být jejich použitím sníženy finanční náklady, ale především dopad na životní prostředí. Běžný beton při působení teplotního zatížení ztrácí poměrně rychle své mechanické vlastnosti, zatímco vláknobeton s obsahem celulóзовých vláken, kde dojde roztavením vláken k tvorbě kanálků, umožní uvolnění tlaku vodní páry a nedochází k explozivnímu odprýskávání tepelně zatěžovaného betonu. Na podobném principu fungují i vlákna polypropylenová, ta ovšem vyžadují vynaložení značného množství energie pro výrobu než vlákna z druhotných materiálů.

V experimentální části práce se také projevila velmi pozitivní vliv celulóзовých vláken, a to jak na mechanické vlastnosti betonu, tak na vlastnosti betonu po vystavení extrémním teplotám, které simulují vliv požáru. Ve srovnání se standardně využívanými vlákny jako jsou vlákna ocelová či polypropylenová, byla sledována právě vlákna celulóзова společně s polyetylentereftalátovými (PET), která jsou získávána recyklací, a to recyklací papíru anebo PET lahví. V případě PET vláken se jedná o velmi jemná vlákna, nikoliv stříhaná makrovlákna, která jsou prezentována v některých studiích. Je tedy cesta využití těchto alternativních variant, protože oba druhy těchto vláken vykazovaly velmi zajímavé výsledky a poukazují na možný potenciál pro širší využívání v tomto směru.

Zájem o využití ekologicky příznivějších materiálů roste a na základě publikovaných výsledků jejich zkoušení i ve stavebním materiálovém inženýrství se dá konstatovat, že do budoucna se s nimi dá počítat na denní bázi. Je nutno dodat, že bude muset být provedena ještě značná iniciativa pro získání většího množství výsledků z experimentů, aby bylo možné nejen s vlákny přírodní báze bezpečně pracovat a nebyly nepříznivým způsobem ovlivněny fyzikálně-mechanické vlastnosti betonu.

## 8. Seznam použité literatury

- [1] ACI Committee 544, "State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete", May 1982, pp 411-413.
- [2] HELA, Rudolf. Studijní opora pro komb. st. - Modul BJ04 – M01 Technologie betonu I. Brno, 2005. 110 s. Elektronická opora
- [3] HELA, R. Technologie betonu II. BJ15-Technologie betonu II. Brno: 2007.
- [4] HARVINDER, Singh-Steel Fiber Reinforced Concrete\_ Behavior, Modelling and Design (2017)
- [5] NAAMAN, A.E., "Fiber Reinforcement for Concrete" Concrete International Journal, March 1985, pp 21-25.
- [6] KRÁTKÝ, Jiří, Jan VODIČKA a Karel TRTÍK. Drátkobetonové konstrukce: úvodní část a příklady použití: směrnice pro navrhování, provádění, kontrolu výroby a zkoušení drátkobetonových konstrukcí. Praha: Informační centrum České komory 61 autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě, 1999. Betonové stavitelství. ISBN 80-863-6400-3.
- [7] BENTUR, Arnon, Sidney MINDESS, Fibre Reinforced Concrete, Taylor & Francis, 2007
- [8] ČSN P 73 2450. Vláknobeton-Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.
- [9] ČSN EN 12350-2. Zkoušení čerstvého betonu. Praha: Český normalizační institut, 2020.
- [10] ČSN EN 12350-3. Zkoušení čerstvého betonu. Praha: Český normalizační institut, 2020.
- [11] ČSN P 73 2451. Vláknobeton: Zkoušení čerstvého vláknobetonu. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.
- [12] Přísady, příměsi, urychlovače. Hornbach [online]. [cit. 2021-04-14]. Dostupné z: <https://www.hornbach.cz/>
- [13] ČSN P 73 2452. Vláknobeton: Zkoušení ztvrdlého vláknobetonu. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.
- [14] ČSN EN 14889-1. Vlákná do betonu: Ocelová vlákna-Definice, specifikace a shoda. Praha: Český normalizační institut, Květen 2017.
- [15] ČSN EN 14889-2. Vlákná do betonu: Polymerová vlákna-Definice, specifikace a shoda. Praha: Český normalizační institut, Květen 2017.
- [16] MAHASNEH, B., Z., (2005). The Effect of Addition of Fiber Reinforcement on Fire Resistant Composite Concrete Material. Journal of Applied Sciences, 5: 373-379. DOI: 10.3923/jas.2005.373.379. [online]. [cit. 2021-03-18]. Dostupné z: <https://scialert.net/abstract/?doi=jas.2005.373.379>
- [17] Elite-indus: Concrete fibers [online]. [cit. 2021-04-09]. Dostupné z: <http://www.elite-indus.com>
- [18] HARTE J., HOLDREN C., SCHNEIDER R., SHIRLEY Ch.: Toxics A to Z, A Guide to Everyday Pollution Hazards, University of California Press, 1991
- [19] BALVÍN, Petr. Negativní účinky azbestu v rámci navrhování staveb, současný stav. Časopis stavebnictví [online]. 2008, 04/08, [cit. 2021-02-06]. Dostupný z: <http://www.casopisstavebnictvi.cz/clanek.php?detail=735>
- [20] BENTUR, Arnon; MINDESS, Sidney. Fibre reinforced cementitious composites. London: Spon press Taylor & Francis Group, 1990. 451 s. ISBN 1-85166-393-2.
- [21] Dogmning: Steel fibers [online]. [cit. 2021-04-09]. Dostupné z: <https://www.galwire.com/galvanizedmetalwire/metal-alloy-wire/steel-fiber.html>



- [22] BODNÁROVÁ, Lenka. Kompozitní materiály ve stavebnictví. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002, 122 s.: il. ISBN 80-214-2266-1.
- [23] Základní princip výroby skleněných vláken [online]. [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: <http://www.btto.cz/cs/zakladni-princip-vyroby-sklenenych-vlaken>
- [24] Glass Fibres [online]. [cit. 2021-02-06]. Dostupné z: <https://source4me.co.uk/?product=glass-fibres>
- [25] Sklocement Beneš, (2020). BeneSteel 55. [online]. [cit. 2021-02-06]. Dostupné z: <http://sklocement.cz/polymerova-vlakna-benesteel/>
- [26] LAŠ, V.: Mechanika kompozitních materiálů. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2004. ISBN 80-7043-273 - X.
- [27] Concrete exchange: CX Basalt Fiber Concrete [online]. [cit. 2021-04-09]. Dostupné z: [https://store.concreteexchange.com/products/chopped-basalt-fiber\\_2](https://store.concreteexchange.com/products/chopped-basalt-fiber_2)
- [28] FIORE, V., T. SCALICI, G. DI BELLA a A. VALENZA. A review on basalt fibre and its composites. Composites Part B: Engineering [online]. 2015, 106 (74), 74-94 [cit. 2021-04-09]. DOI: 10.1016/j.compositesb.2014.12.034. ISSN 13598368. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359836815000062>
- [29] KREZEL, Z.A., and McManus, K.J. Recycled Aggregate Concrete Sound Absorbing Barriers for Urban Freeways. Ecorecycle Victoria Market Development Grant – Final Report 2002
- [30] Nařízení Evropského parlamentu a Rady EU č. 305/2011 ze dne 9. března 2011, kterým se stanoví harmonizované podmínky uvádění stavebních výrobků na trh a kterým se zrušuje směrnice Rady 89/106/EHS. Ústřední věstník Evropské unie L 88/5, 4. 4. 2011. Dostupné z WWW: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:088:0005:0043:CS:PDF>.
- [31] FOTI, Dora. Preliminary analysis of concrete reinforced with waste bottles PET fibers. In: ScienceDirect [online]. Elsevier, 2010. [cit. 2021-04-03]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061810005969>
- [32] SANJAYAN, HEO Y-S a J.G. HAN. Effect of fiber type, length and numbers of fibers per unit volume on spalling, protection of high strength concrete: First International Workshop on Concrete Spalling due to Fire Exposure, Edited by F. DEHN, E. KOENDERS, Leipzig 2009.
- [33] BENTUR, Arnon; MINDESS, Sidney. Fibre reinforced cementitious composites. London: Spon press Taylor & Francis Group, 1990. 451 s. ISBN 1-85166-393-2
- [34] KOLÍSKO, Jiří. Vliv krátkých všesměrně rozptýlených polypropylénových mikro a makrovláken na vlastnosti cementových malt a betonů. Praha: ČVUT v Praze, 2008. 24 s. ISBN 978-80-01-04072-0.
- [35] HOLUB, Petr. Návrh jemnozrnné betonové směsi pro vyztužení uhlíkovými vlákny [online]. Praha, 2016 [cit. 2021-03-13]. Dostupné z: [https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/65707/F1-BP-2016-Holub-Petr-Kapitola\\_1\\_2.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/65707/F1-BP-2016-Holub-Petr-Kapitola_1_2.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Bakalářská práce. ČVUT.
- [36] Elektronická učebnice. In: Eluc [online]. Olomouc: Olomoucký kraj [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz>.
- [37] The basic structure and functions of starch, glycogen and cellulose and the relationship of structure to function of these substances in animals and plants. AS Biology[online]. Anglie: Hannahhelpbiologyas, 2014 [cit. 2021-03-14]. Dostupné z:

- <http://hannahelpbiologyas.blogspot.com/2014/04/the-basic-structure-and-functions-of.html>
- [38] GAWESKA, Izabela. Thermal behavior of high performance concretes at high temperature - evolution of mechanical properties. Engineering Sciences. Ecole des Ponts ParisTech, 2004. English.
- [39] VÍTEK, J. L., SMIRŔINSKÝ, S., VESELÝ, P. Fibres effect in SFRC. Proc. of the 11th Central European Congress on Concrete Engineering CCC, Austrian Concrete Society, Hainburg, Oct. 1-2, 2015
- [40] VARONA, F.B. , F.J. BAEZA, D. BRU, S. IVORRA, Influence of high temperature on the mechanical properties of hybrid fibre reinforced normal and high strength concrete, Construction and Building Materials, Volume 159, 2018, ISSN 0950-0618, Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.129>.
- [41] ASB, Uplatnění vláknobetonu v prefabrikovaných prvcích [online]. [cit. 2021-02-06]. Dostupné z: <https://www.asb-portal.cz/>
- [42] PETER JM BARTOŠ, Vláknobeton [online]. [cit. 2021-02-06]. Dostupné z: <https://www.betontks.cz/sites/default/files/2012-7-68.pdf>
- [43] 20 Jahre nach Mont-Blanc-Unglück [online]. 2019 [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: <https://www.zdf.de/nachrichten/heute/20-jahre-nach-mont-blanc-katastrophe-sind-tunnel-viel-sicherer-100.html>
- [44] Concrete for Construction Industry, November 2006, str. 62-64
- [45] AÏTCIN, Pierre-Claude. Vysokohodnotný beton. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) a Českou betonářskou společnost vydalo Informační centrum ČKAIT, 2005. Betonové stavitelství. ISBN 80-867-6939-9.
- [46] OZAWA, Mitsuo, Shinya UCHIDA, Toshiro KAMADA, Hiroaki MORIMOTO, Study of mechanisms of explosive spalling in high-strength concrete at high temperatures using acoustic emission, 2012, ISSN 0950-0618.
- [47] Introduction to UltraFiber500 Cellulose Polymer Fibres. [Online]. Multiform, 2007. [cit. 2021-02-06]. Dostupné z: <http://multiform.co.nz/Background.pdf>
- [48] ABDALLAH, Sadoon, Mizi FAN a K.A. CASHELL. Bond-slip behaviour of steel fibres in concrete after exposure to elevated temperatures. Construction and Building Materials [online]. 2017, 140, 542-551 [cit. 2021-04-01]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.02.148. ISSN 09500618. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061817303495>
- [49] DESTREE, X., M. SAHLOUL. Total Anchorage Fibres for Concrete: Fibre-Reinforced Cementitious Materials. MRS Online Proceedings Library (OPL) , Volume 211: Symposium O – Fiber-Reinforced Cementitious Materials , 1990 , 189. DOI: <https://doi.org/10.1557/PROC-211-189>
- [50] ROSSI, P., CHANVILLARD, 'Steel fiber reinforced concrete (SFRC): An example of French research ,ACI Mat. J. 91 (3) (May-June 1994) 273-279.
- [51] MOHAMED, M.A.S., GHORBEL, E., WARDEH, G. Valorization of microcellulose fibers in self-compacting concrete. [Online] Science Direct, December 2010. [Cit. 2021-02-06.]. ISSN 0950-0618. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061810002588>
- [52] FURST, R. Fire specifics of building load-bearing structures of textile reinforced concrete. Prague: CTU in Prague, 2019.
- [53] BRAMESHUBER, Wolfgang (ed.). Report 36: textile reinforced concrete-state-of-the-art report of RILEM TC 201-TRC. RILEM publications, 2006.

- [54] JOHNSTON, Colin, *Fiber-Reinforced Cements and Concretes*, Taylor & Francis, 2010
- [55] WANG, Lei, Tingshu HE, Yongxiang ZHOU, Shengwen TANG, Jianjun TAN, Zhentao LIU, Jianwen SU: The influence of fiber type and length on the cracking resistance, durability and pore structure of face slab concrete. *Construction and Building Materials*, 2021, ISSN 0950-0618.
- [56] BANTHIA, N., R. GUPTA: Influence of polypropylene fiber geometry on plastic shrinkage cracking in concrete. *Cem. Concr. Res.*, 36 (7) (2006), pp. 1263-1267.
- [57] SHEN, D.J., C. LIU, C.C. LI, X.G. ZHAO, G.Q. JIANG: Influence of Barchip fiber length on early-age behavior and cracking resistance of concrete internally cured with super absorbent polymers. *Constr. Build. Mater.*, 214 (2019), pp. 219-231.
- [58] WU, Zemei, Caijun SHI, Kamal Henri KHAYAT, Investigation of mechanical properties and shrinkage of ultra-high performance concrete: Influence of steel fiber content and shape, 2019, ISSN 1359-8368, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107021>.
- [59] DUGENCI, Oğuz, Tefaruk HAKTANIR, Fatih ALTUN. Experimental research for the effect of high temperature on the mechanical properties of steel fiber-reinforced concrete, *Construction and Building Materials*, Volume 75, 2015, Pages 82-88, ISSN 0950-0618, Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.005>.
- [60] FAN, D.Q., R. YU, Z.H. SHUI, C.F. WU, Q.L. SONG, Z.J. LIU, Y. SUN, X. GAO, Y.J. HE: A new design approach of steel fibre reinforced ultra-high performance concrete composites: experiments and modeling. *Cement Concr. Compos.*, 110 (2020), p. 103597.
- [61] SHI, C., Z. WU, J. XIAO, D. WANG, Z. HUANG, Z. FANG. A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design, *Construct. Build. Mater.*, 101 (2015), pp. 741-751
- [62] LIANG, X., C. WU, Y. SU, Z. CHEN, Z. LI. Development of ultra-high performance concrete with high fire resistance. *Construct. Build. Mater.*, 179 (2018), pp. 400-412
- [63] PARK, J.-J., D.-Y. YOO, S. KIM, S.-W. KIM. Benefits of synthetic fibers on the residual mechanical performance of UHPFRC after exposure to ISO standard fire. *Cement Concr. Compos.*, 104 (2019), p. 103401
- [64] BILODEAU, A., V.K.R. KODUR, G.C. HOFF. Optimization of the type and amount of polypropylene fibres for preventing the spalling of lightweight concrete subjected to hydrocarbon fire, *Cement Concr. Compos.*, 26 (2) (2004), pp. 163-174
- [65] LI, Y., K.H. TAN. Effects of polypropylene and steel fibers on permeability of ultra-high performance concrete at hot state. M.E.M. Garlock, V.K.R. Kodur (Eds.), *Structures in Fire (Proceedings of the Ninth International Conference)*, DEStech Publications, Princeton University (2016), pp. 145-152
- [66] ZHANG, D., A. DASARI, K.H. TAN. On the mechanism of prevention of explosive spalling in ultra-high performance concrete with polymer fibers, *Cement Concr. Res.*, 113 (2018), pp. 169-177
- [67] OZAWA, M., H. MORIMOTO. Effects of various fibres on high-temperature spalling in high-performance concrete. *Construct. Build. Mater.*, 71 (2014), pp. 83-92
- [68] OZAWA, M., S. SUBEDI PARAJULI, Y. UCHIDA, B. ZHOU. Preventive effects of polypropylene and jute fibers on spalling of UHPC at high temperatures in combination with waste porous ceramic fine aggregate as an internal curing material. *Construct. Build. Mater.*, 206 (2019), pp. 219-225
- [69] ZHANG, D., K.H. TAN, A. DASARI, Y. WENG. Effect of natural fibers on thermal spalling resistance of ultra-high performance concrete. *Cement Concr. Compos.*, 109 (2020), p. 103512

- [70] ZHANG, Dong, Guan Yu TAN, Kang Hai TAN, Combined effect of flax fibers and steel fibers on spalling resistance of ultra-high performance concrete at high temperature, *Cement and Concrete Composites*, volume 121, 2021, 104067, ISSN 0958-9465, dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104067>.
- [71] GUO, Liping, Wenxiao ZHANG, Wei SUN, Bo CHEN a Yafan LIU. High-Temperature Performance and Multiscale Damage Mechanisms of Hollow Cellulose Fiber Reinforced Concrete. *Advances in Materials Science and Engineering* [online]. 2016, 2016, 1-14 [2021-05-09]. DOI: 10.1155/2016/2503780. ISSN 1687-8434. Dostupné z: <http://www.hindawi.com/journals/amse/2016/2503780/>
- [72] TONOLI, G.H.D., U.P.R. FILHO, H.S. Jr, J. BRAS, M.N. BELGACEM, F.A.R. LAHR. Cellulose modified fibres in cement based composites. *Compos. Part A*, 40 (12) (2009), pp. 2046-2053
- [73] ČSN EN 1363-1: Zkoušení požární odolnosti- Část 1: Obecné požadavky. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.

## 9. Seznam tabulek

<i>Tabulka 1: Hodnoty teplot tání polymerových vláken.....</i>	<i>26</i>
<i>Tabulka 2: Vlastnosti polymerních vláken [33].....</i>	<i>34</i>
<i>Tabulka 3: Složení betonu na 1 m<sup>3</sup>.....</i>	<i>66</i>

## 10. Seznam obrázků

Obrázek 1: Řezy betonem s různými druhy kameniva: 1 - přírodní těžené, 2 - přírodní těžené drcené, 3 - umělé, 4 - recyklované z betonu, 5 - recyklované ze zdiva [1].....	16
Obrázek 2: Jmenovitá délka vlákna $l_{nom}$ ocelového vlákna (vlevo) a polymerového vlákna (vpravo) [12] .....	23
Obrázek 3: Monofilamentní polypropylenová vlákna (vlevo) a fibrilovaná polypropylenová vlákna (vpravo) [17].....	27
Obrázek 4: Druhy ocelových vláken do vláknobetonu [21].....	30
Obrázek 5: Skleněná vlákna [24].....	31
Obrázek 6: Čedičová vlákna [27] .....	32
Obrázek 7: Struktura celulóзовého vlákna [37] .....	36
Obrázek 8: Vlákna z PET proužků (vlevo), kruhová PET vlákna (vpravo) [31] .....	39
Obrázek 9: Požární katastrofa v tunelu Mont Blanc ve Francii [43] .....	44
Obrázek 10: Mechanismus explozivního odprýskávání betonu při požáru [46] .....	45
Obrázek 11: Různé tvary ocelových vláken [42].....	51
Obrázek 12: Varianty geometrických tvarů ocelových vláken [54].....	51
Obrázek 13: Porovnání odolnosti proti vytažení rovných a zahnutých ocelových vláken [54].....	52
Obrázek 14: Vliv tvaru vlákna na pevnost vazby vlákno–matrice [58] .....	53
Obrázek 15: Základna s výčnělky pro sledování smrštění vláknobetonu [56].....	55
Obrázek 16: Mikrostruktura betonu bez vláken (vlevo), betonu s PP vlákny (vpravo) [57].....	57
Obrázek 17: Grafická závislost pevnosti v tlaku na teplotě, které byl beton s ocelovými vlákny vystaven [59].....	59
Obrázek 18: Mikroskopické snímky UHPC s obsahem $l_n$ ěných a ocelových vláken a) před vystavením vysoké teplotě, b) po vystavení teplotě 200 °C, c) a d) zvětšené snímky obrazů a), b) [68] .....	61
Obrázek 19: Mikroskopický snímek celulóзовého vlákna z břestovce [71].....	62
Obrázek 20: Vláknobeton s celulóзовým vláknem po vystavení teplotnímu zatížení při různých dobách výdrže [71].....	63
Obrázek 21: PET vlákna (vlevo), celulóзовá vlákna (vpravo).....	67
Obrázek 22: Grafické porovnání objemových hmotností čerstvého a ztvrdlého betonu .....	69
Obrázek 23: Graf vyjadřující pevnosti betonu v tlaku a tahu za ohybu .....	70
Obrázek 24: Zkušební tělesa v peci po ukončení zkoušky.....	70
Obrázek 25: Struktura povrchu těles před (horní) a po (dolní) vystavení teplotnímu zatížení.....	71
Obrázek 26: Zbytková pevnost v tlaku po vystavení betonu teplotnímu zatížení.....	72
Obrázek 27: Mikroskopický snímek vláknobetonu s celulóзовými vlákny před působením vysoké teploty (nahore), PP vlákno ve struktuře betonu před působením vysoké teploty (dole vlevo), PP vlákno po působení vysoké teploty (dole vpravo) .....	73